



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LEONARDO MEDEIROS DA COSTA

**REABILITAÇÃO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM NSM CFRP**

Recife

2022

LEONARDO MEDEIROS DA COSTA

**REABILITAÇÃO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM NSM CFRP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva

Recife

2022

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- C837r      Costa, Leonardo Medeiros da.  
Reabilitação após incêndio de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com NSM CFRP / Leonardo Medeiros da Costa. 2022.  
189 f: figs., tabs., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.  
Coorientador: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.  
Inclui referências, apêndices e anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Resistência residual. 3. Cisalhamento pós-incêndio. 4. modelos analíticos. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Silva, José Jéferson do Rêgo (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 404

**LEONARDO MEDEIROS DA COSTA**

**REABILITAÇÃO APÓS INCÊNDIO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM NSM CFRP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Aprovada em 09/11/2022

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva – UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência

Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Alexandre Gouveia Henriques (examinador externo)  
Hasselt University

participação por videoconferência

Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques (examinador externo)  
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência

Dr. Cristiano Corrêa (examinador externo)  
Ten. Cel. do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

A meu pai Luiz Costa (*in memoriam*).

A minha mãe Ana Costa, que beira ao tudo!

A minha irmã (Lu), irmãos (Celi e Fil), sobrinhos (Eduardo, Diogo e Laura),  
e amigos (me isento de listar) que, de quando em quando, confundem-se em um.

A minha companheira Emanuelle Galdino, por todo amor e incentivo,  
e aos nossos estimados gatos Otto e Ikki, que tornam os dias mais leves.

Ao professor Jéferson, pela orientação e contribuições desde o mestrado até o doutoramento.

Ao professor Tiago, pela orientação e dedicação para que esta pesquisa pudesse ser finalizada.

Aos amigos/engenheiros que foram imprescindíveis na realização do programa experimental:  
Cristóvão, Geilson e Marcus Wagner.

Aos amigos da Paraíba e que residem no Recife que me acolheram:

Chiquinho e Fabiano.

Aos membros examinadores que se disponibilizaram a contribuir com o trabalho.

A SIKA pelo fornecimento dos materiais de reforço estrutural.

A UFPE, UEPB e aos colegas de trabalho, todos!

Ao empecilho – que dá tropeço, empurra e em um golpe inverso, lança-me à frente.

Àquele dia, que nem lembro bem. Mas sim, a ele.

E sem fuçar à busca de elo: laçar todos num aperto cego.

Sou grato.

## RESUMO

É imprescindível conhecer a resistência residual das estruturas após incêndio e definir um diagnóstico: liberação, demolição, reparo ou reforço estrutural. Após o fogo, as vigas de concreto armado normalmente perdem capacidade resistente, necessitando de reforço. Uma solução é o uso da técnica de reforço NSM (*near-surface mounted*) usando laminados de CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*). Apesar da comprovada eficiência do sistema de reforço ao cisalhamento de vigas, os modelos analíticos apresentam grande dispersão comparados aos poucos resultados experimentais disponíveis. Quanto ao reforço das vigas após incêndio, o cenário é ainda mais escasso e sem proposta de uma formulação analítica. Então, o presente trabalho desenvolveu uma série experimental com 16 vigas em concreto armado, analisadas à temperatura ambiente e após incêndio, com e sem reforço ao cisalhamento. Um grupo de vigas foi aquecido durante tempos de exposição de 60, 90 e 120 min, conforme curva de incêndio da ISO 834 (2014). Após o resfriamento até à temperatura ambiente, as vigas foram reforçadas com laminados de CFRP usando a técnica NSM. Os laminados foram aplicados a 45° e espaçados a 75, 150 e 200 mm. As vigas foram ensaiadas até a ruptura no ensaio de flexão em 3 pontos, avaliando a capacidade de carga, ductibilidade e rigidez. O sistema NSM CFRP foi eficiente, recuperando a capacidade de cisalhamento inicial das vigas, e até aumentando consideravelmente. Os menores espaçamentos entre os laminados resultaram em maiores capacidades de carga, deformabilidade e rigidez. Complementando a pesquisa, um estudo analítico foi realizado, e apresentados três procedimentos: (1) verificou a capacidade residual das vigas e foi validado com resultados experimentais de 62 vigas disponíveis na literatura. A proposta estimou com precisão o momento fletor e esforço cortante residuais. Em (2) dimensionou o reforço ao cisalhamento à temperatura ambiente e foi validado com 70 resultados experimentais de sete autores, além de comparar a quatro modelos analíticos. O procedimento apresentou boa precisão e menor coeficiente de variação (CV). Em (3) uma proposta de dimensionamento após incêndio do reforço ao cisalhamento foi baseada nas contribuições (1) e (2) supracitadas, e validada com base nos resultados experimentais de oito vigas desenvolvidas nesta pesquisa. A capacidade ao cisalhamento (analítico/experimental) apresentou uma relação média de 0,82 e CV de 12,2%, apresentando-se como procedimento simplificado promissor e pioneiro.

**Palavras-chave:** resistência residual; cisalhamento pós-incêndio; modelos analíticos.

## ABSTRACT

It is essential to know the residual strength of structures after fire, and to define a diagnosis: release, demolition, repair or structural strengthening. After fire, reinforced concrete (RC) beams usually lose their strength, requiring strengthening. One solution is the use of the NSM (near-surface mounted) technique in strengthening with CFRP (carbon fiber reinforced polymer) laminates. Despite the proven efficiency of the beam shear strengthening system, the analytical models present great dispersion compared to the few experimental results available. As for the strengthening of the beams after fire, the scenario is even more scarce and without a proposal for an analytical formulation. Therefore, the present work developed an experimental series with 16 RC beams, analyzed at room temperature and after fire, with and without shear strengthening. A group of beams was heated during exposure times of 60, 90 and 120 min, according to fire curve ISO 834 (2014). After cooling to room temperature, the beams were strengthened with CFRP laminates using the NSM technique. The laminates were applied at 45° and spaced at 75, 150 and 200 mm. The beams were tested to failure in the 3-point bending test, evaluating the load capacity, ductility and stiffness. The NSM CFRP system was efficient, recovering the beams' initial shear capacity, and even increasing it considerably. The smaller spacings between the laminates resulted in greater load capacities, deformability and stiffness. Complementing the research, an analytical study was carried out, and three procedures were presented: (1) it estimated the residual capacity of the beams and was validated it with experimental results of 62 beams available in the literature. The proposal accurately estimated the residual bending moment and shear force. In (2) a design proposal the shear strengthening at room temperature and was validated with 70 experimental results from seven authors, in addition to comparing to four analytical models. The proposed procedure showed good precision and lower coefficient of variation (CV). In (3) a design proposal after fire of the shear strengthening was based on the contributions (1) and (2) above, and validated based on the experimental results of eight beams developed in this research. The shear capacity (analytical/experimental) presented an average ratio of 0.82 and CV of 12.2%, showing to be a promising simplified procedure and pioneer.

**Keywords:** residual strength; post-fire shear capacity; analytical models.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Motivação da pesquisa .....                                                 | 24 |
| Figura 2 – Fluxograma da estrutura do texto.....                                       | 28 |
| Figura 3 – Modos de transmissão (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto.....         | 32 |
| Figura 4 – Modos de falha por descolagem na ligação .....                              | 34 |
| Figura 5 – Relação aderência-deslizamento encontrada experimentalmente.....            | 39 |
| Figura 6 – Reforço à flexão usando a técnica SNSM.....                                 | 40 |
| Figura 7 – Temperatura do forno aplicada nas amostras.....                             | 41 |
| Figura 8 – Detalhe do ensaio mecânico da viga .....                                    | 42 |
| Figura 9 – Ranhuras no concreto para aderência CFRP-concreto.....                      | 43 |
| Figura 10 – Reforço ao cisalhamento nas vigas .....                                    | 44 |
| Figura 11 – Resultados de $V_f$ : analítico vs. experimental .....                     | 47 |
| Figura 12 – Modelo Bui e Stitmannathum (2020) e ACI440.1R-15.....                      | 47 |
| Figura 13 – Parâmetros geométricos relativos à contribuição do CFRP.....               | 49 |
| Figura 14 – Características físico-mecânicas e propriedades geométricas do modelo..... | 51 |
| Figura 15 – Procedimento de cálculo: algoritmo principal .....                         | 52 |
| Figura 16 – Bloco equivalente em função dos laminados interceptados.....               | 57 |
| Figura 17 – Modelo de aderência para tensão-deslizamento da ligação .....              | 57 |
| Figura 18 – Evolução da resistência à compressão do concreto.....                      | 62 |
| Figura 19 – Detalhamento da armadura da viga de concreto .....                         | 64 |
| Figura 20 – Disposição da instrumentação nas vigas .....                               | 65 |
| Figura 21 – Fluxograma das etapas de ensaios.....                                      | 67 |
| Figura 22 – Esquema para aquecimento das vigas .....                                   | 68 |
| Figura 23 – Leituras indiretas através do ultrassom .....                              | 69 |
| Figura 24 – Realização das leituras indiretas .....                                    | 70 |
| Figura 25 – Esquema do teste de arrancamento do substrato.....                         | 70 |
| Figura 26 – Etapas de execução do teste de arrancamento.....                           | 71 |
| Figura 27 – Spalling durante incêndio.....                                             | 72 |
| Figura 28 – Etapas para execução do reparo devido ao spalling.....                     | 72 |
| Figura 29 – Viga reparada com graute após incêndio .....                               | 73 |
| Figura 30 – Viga reforçada com laminados a cada 200 mm .....                           | 73 |
| Figura 31 – Ensaio de flexão em 3 pontos.....                                          | 74 |
| Figura 32 – Ensaio de flexão em 3 pontos nas vigas de concreto armado .....            | 74 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33 – Identificação das variáveis para determinar rigidez e deformabilidade..... | 75  |
| Figura 34 – Curvas temperatura-tempo .....                                             | 76  |
| Figura 35 – Temperaturas ao longo da seção transversal da viga .....                   | 77  |
| Figura 36 – Região de ocorrência do spalling .....                                     | 79  |
| Figura 37 – Variação da VPU_D em função do tempo de incêndio .....                     | 80  |
| Figura 38 – Variação da VPU_I em função do tempo de incêndio .....                     | 82  |
| Figura 39 – Modos de falha no teste de arrancamento .....                              | 83  |
| Figura 40 – Extração das barras de aço para ensaio da resistência residual.....        | 85  |
| Figura 41 – Barras extraídas após aquecimento e ensaio de tração.....                  | 86  |
| Figura 42 – Tensão de escoamento residual do aço em função da temperatura.....         | 87  |
| Figura 43 – Tensão última residual do aço em função da temperatura .....               | 87  |
| Figura 44 – Tensão-alongamento das barras de 6,3 mm .....                              | 88  |
| Figura 45 – Tensão-alongamento das barras de 10,0 mm .....                             | 88  |
| Figura 46 – Tensão-alongamento das barras de 16,0 mm .....                             | 89  |
| Figura 47 – Tensão-alongamento das barras de 20,0 mm .....                             | 89  |
| Figura 48 – Detalhes da falha da viga por peeling-off .....                            | 94  |
| Figura 49 – Carga-deslocamento das vigas à temperatura ambiente.....                   | 94  |
| Figura 50 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 60 min de incêndio .....      | 95  |
| Figura 51 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 90 min de incêndio .....      | 95  |
| Figura 52 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 120 min de incêndio .....     | 95  |
| Figura 53 – Carga-deformação no estribo .....                                          | 97  |
| Figura 54 – Carga-deformação na armadura longitudinal.....                             | 97  |
| Figura 55 – Deformação no laminado de CFRP em função do tempo de incêndio .....        | 98  |
| Figura 56 – Deformação no laminado de CFRP em função do tempo de incêndio .....        | 98  |
| Figura 57 – Fluxograma para determinação da resistência residual.....                  | 100 |
| Figura 58 – Seção transversal reduzida do concreto .....                               | 101 |
| Figura 59 – Equilíbrio de forças na seção à flexão.....                                | 103 |
| Figura 60 – Esquemas de (a) aquecimento da seção transversal e (b) flexão pura .....   | 105 |
| Figura 61 – Momentos fletores residuais: analítico vs. experimental. ....              | 110 |
| Figura 62 – Momentos fletores residuais: analítico vs. experimental. ....              | 110 |
| Figura 63 – Momentos fletores residuais: analítico corrigido vs. experimental. ....    | 111 |
| Figura 64 – Resistência residual ao cisalhamento: analítico vs. experimental.....      | 113 |
| Figura 65 – Fluxograma para o procedimento de dimensionamento do reforço.....          | 114 |
| Figura 66 – Curva " $\tau$ -s": identificação dos parâmetros de entrada.....           | 115 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 67 – Identificação dos laminados interceptados e parâmetros ..... | 116 |
| Figura 68 – Laminados adjacentes no bloco equivalente .....              | 117 |
| Figura 69 – Dispersão dos resultados analíticos vs. experimental .....   | 124 |
| Figura 70 – Resistência ao cisalhamento analítico-experimental.....      | 131 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Qualidade do concreto em função da VPU.....                                            | 32  |
| Tabela 2 – Modos de falha e fatores de influência .....                                           | 35  |
| Tabela 3 – Modelos analíticos .....                                                               | 36  |
| Tabela 4 – Tipos de ensaio, adesivos, modos de falha e as conclusões dos autores .....            | 37  |
| Tabela 5 – Valores médios para os parâmetros de entrada de cada modelo .....                      | 38  |
| Tabela 6 – Distribuição das amostras ensaiadas.....                                               | 42  |
| Tabela 7 – Formulações analíticas para a contribuição do NSM CFRP ao cortante.....                | 45  |
| Tabela 8 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre modelos .....                              | 46  |
| Tabela 9 – Relações médias $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ .....                                            | 46  |
| Tabela 10 – Fator ( $\beta_H$ ) das vigas reforçadas ao cisalhamento após incêndio.....           | 59  |
| Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos materiais.....                                             | 61  |
| Tabela 12 – Traço e materiais constituintes do concreto.....                                      | 61  |
| Tabela 13 – Caracterização do concreto à temperatura ambiente .....                               | 62  |
| Tabela 14 – Identificação, características e condições experimentais das vigas.....               | 66  |
| Tabela 15 – Monitoramento da ocorrência do spalling .....                                         | 78  |
| Tabela 16 – VPU média através da leitura direta .....                                             | 79  |
| Tabela 17 – Qualidade e resistência residual do concreto.....                                     | 80  |
| Tabela 18 – VPU médias através da leitura indireta .....                                          | 81  |
| Tabela 19 – Tensão de tração no teste de arrancamento .....                                       | 84  |
| Tabela 20 – Propriedades mecânicas do aço ambiente e após incêndio.....                           | 86  |
| Tabela 21 – Cargas máximas de ruptura das vigas.....                                              | 90  |
| Tabela 22 – Identificação do modo de falha e padrão de fissuração das vigas .....                 | 91  |
| Tabela 23 – Rigidez e ductibilidade das vigas .....                                               | 96  |
| Tabela 24 – Fator de redução para resistência residual do aço .....                               | 102 |
| Tabela 25 – Identificação e características das vigas analisadas à flexão .....                   | 106 |
| Tabela 26 – Identificação e características das vigas analisadas ao cisalhamento.....             | 107 |
| Tabela 27 – Resultados analítico e experimental para momento fletor.....                          | 109 |
| Tabela 28 – Resultados analítico e experimental para o esforço cortante.....                      | 111 |
| Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental.....                  | 119 |
| Tabela 30 – Relações médias $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ e coeficiente de variação .....                 | 125 |
| Tabela 31 – Relações médias $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ em função do perímetro e área do laminado ..... | 125 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 32 – Modos de falha, incidência e relações médias $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ .....       | 126 |
| Tabela 33 – Capacidade de cisalhamento residual das vigas .....                            | 129 |
| Tabela 34 – Capacidade de cisalhamento das vigas reforçadas à temperatura ambiente.....    | 129 |
| Tabela 35 – Resistência residual do concreto e parcela do cortante devido ao reforço ..... | 130 |
| Tabela 36 – Resistência ao cisalhamento experimental e analítica .....                     | 130 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                     |
| ABECE   | Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural |
| ACI     | <i>American Concrete Institute</i>                           |
| ARI     | Alta Resistência Inicial                                     |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials</i>            |
| CA      | Concreto armado                                              |
| CDC     | <i>Critical Diagonal Crack</i>                               |
| CEB     | <i>Comité Européen du Béton</i>                              |
| CEE     | Comissão de Estudos Especiais                                |
| CF      | <i>Concrete Failure</i>                                      |
| CFRP    | <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>                       |
| CNR     | <i>National Research Council</i>                             |
| CP      | Corpo de Prova                                               |
| CP-V    | Cimento Portland Tipo V                                      |
| CT      | Comitê Técnico                                               |
| CS      | <i>Cross Section</i>                                         |
| CSA     | <i>Canadian Standards Association</i>                        |
| CV      | Coefficiente de Variação                                     |
| DP      | Desvio-padrão                                                |
| EBR     | <i>Externally-Bonded Reinforced</i>                          |
| EN      | <i>European Standard</i>                                     |
| END     | Ensaio não-destrutivo                                        |
| ETS     | <i>Embedded Thought-Section</i>                              |
| FIB     | <i>Fédération Internationale du Béton</i>                    |
| FRP     | <i>Fiber Reinforced Polymer</i>                              |
| GB      | <i>Chinese Code</i>                                          |
| GT      | Grupo de Trabalho                                            |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto                             |
| IC      | Intervalo de confiança                                       |
| ISO     | <i>International Organization for Standardization</i>        |
| LVDT    | <i>Linear Variable Differential Transformer</i>              |
| MEF     | Método dos Elementos Finitos                                 |

|       |                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------|
| MPTM  | <i>Modified Pull-Off Testing Method</i>                |
| NBR   | Norma Brasileira                                       |
| NS    | Amostras sem reforço de FRP                            |
| NSM   | <i>Near-surface mounted</i>                            |
| PO    | <i>Peeling-off</i>                                     |
| PXT   | Especificação do fabricante para o superplastificante  |
| RCB   | <i>Reinforced Concrete Beam</i>                        |
| RCBS  | <i>Reinforced Concrete Beam Strengthened</i>           |
| RS    | Resistente a Sulfatos                                  |
| RT    | Seção retangular                                       |
| SED   | <i>Structural Engineering Documents</i>                |
| SF    | Espaçamento entre laminados                            |
| SG    | <i>Strain gage</i>                                     |
| SIA   | <i>Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein</i> |
| SL    | <i>Sliding</i>                                         |
| SNSM  | <i>Side near-surface mounted</i>                       |
| TP    | Termopar                                               |
| UEPB  | Universidade Estadual da Paraíba                       |
| UFPE  | Universidade Federal de Pernambuco                     |
| VPU   | Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico         |
| VPU_D | VPU pelo método direto                                 |
| VPU_I | VPU pelo método indireto                               |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas

|                |                                                                                                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$            | Parâmetros Zhang et al. (2013)                                                                                                        |
| $B$            | Parâmetros Zhang et al. (2013)                                                                                                        |
| $A_2$          | Constante de integração da modelagem da ligação                                                                                       |
| $A_3$          | Constante de integração da modelagem da ligação                                                                                       |
| $A_b$          | Parâmetro do modelo de Bui e Stitmannathum (2020)                                                                                     |
| $A_{cp}$       | Área da seção do prisma do concreto circundante                                                                                       |
| $A_f$          | Área da seção transversal de um laminado de FRP                                                                                       |
| $A_{fv}$       | Área da seção transversal de dois laminados de FRP                                                                                    |
| $A_c$          | Área da seção transversal do prisma do concreto circundante                                                                           |
| $A_{sw}$       | Área de aço transversal                                                                                                               |
| $B_b$          | Parâmetro do modelo de Bui e Stitmannathum (2020)                                                                                     |
| $C_3$          | Constante de integração da modelagem da ligação                                                                                       |
| $C_{falha}$    | Perímetro da seção transversal da superfície de falha composta pelas três superfícies laterais da ranhura em torno da camada adesiva. |
| $E_c$          | Módulo de elasticidade do concreto                                                                                                    |
| $E_s$          | Módulo de elasticidade do aço                                                                                                         |
| $E_f$          | Módulo de elasticidade do FRP                                                                                                         |
| $F_{out}$      | Força de arrancamento do FRP-concreto                                                                                                 |
| $G_f$          | Energia de Fratura Interfacial                                                                                                        |
| $J_1$          | Constante de integração da modelagem da ligação                                                                                       |
| $K$            | Rigidez das vigas com base da curva carga-deslocamento                                                                                |
| $K_{CR}$       | Fator de redução da resistência à compressão com concreto após aquecido;                                                              |
| $K_{VR}$       | Fator de redução da VPU depois de aquecido                                                                                            |
| $L$            | Vão livre da viga                                                                                                                     |
| $L_{Rfi}$      | Comprimento médio do laminado disponível                                                                                              |
| $L_{Rfi}^{eq}$ | Comprimento equivalente médio do laminado colado                                                                                      |
| $L_b$          | Comprimento colado do laminado                                                                                                        |
| $L_d$          | Comprimento da CDC                                                                                                                    |
| $L_e$          | Comprimento efetivo do laminado FRP                                                                                                   |

|                    |                                                                                 |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $L_{Rfe}$          | Comprimento efetivo do laminado colado                                          |
| $L_{fim}$          | Comprimento médio dos laminados interceptados pela CDC                          |
| $L_i$              | Comprimento efetivo da barra $i$ que cruza a fissura de cisalhamento            |
| $L_p$              | Perímetro efetivo do laminado FRP                                               |
| $L_f$              | Comprimento colado do FRP                                                       |
| $L_{fi}$           | Menor comprimento colado do FRP que é interceptado pela CDC                     |
| $L_{per}$          | Comprimento do perímetro colado do FRP                                          |
| $M_r^{ana}$        | Momento fletor residual determinado analiticamente                              |
| $M_{r1}^{ana}$     | Momento fletor residual determinado analiticamente sem fator de redução         |
| $M_{r2}^{ana}$     | Momento fletor residual determinado analiticamente com fator de redução         |
| $M_r^{exp}$        | Momento fletor residual determinado experimentalmente                           |
| $N_f$              | Número de laminados interceptados pela CDC                                      |
| $N_{fe}$           | Número de laminados interceptados pela CDC com 10% maior que $L_e$              |
| $N_{fint}^1$       | Número inteiro mínimo de tiras que podem efetivamente cruzar o CDC              |
| $P_f$              | Perímetro do laminado                                                           |
| $P_{max}$          | Carga última aplicada no ensaio das vigas                                       |
| $P_{amb}$          | Carga última aplicada no ensaio das vigas de referência ambiente                |
| $P_{75}$           | Carga correspondente a 75% $P_{max}$                                            |
| $R^2$              | Coefficiente de determinação                                                    |
| $V_{Rd2}$          | Força cortante relativa à biela comprimida de concreto                          |
| $V_{c0}$           | Resistência residual do concreto ao cisalhamento em vigas                       |
| $V_{R0}$           | Resistência residual ao cisalhamento das vigas em concreto armado               |
| $V_c$              | Contribuição do concreto para o cortante                                        |
| $V_{c0}$           | Parcela cortante do concreto resistida por mecanismos complementares            |
| $V_f$              | Contribuição ao cortante do NSM CFRP                                            |
| $V_f^{ana}$        | Resistência analítica ao cisalhamento do reforço de FRP                         |
| $V_f^{exp}$        | Resistência experimental ao cisalhamento do reforço de FRP                      |
| $V_r^{ana}$        | Resistência cortante residual das vigas determinadas analiticamente             |
| $V_r^{exp}$        | Resistência cortante residual das vigas determinadas experimentalmente          |
| $V_{ana}$          | Resistência ao cisalhamento analítica de vigas em concreto armado reforçadas    |
| $V_{exp}$          | Resistência ao cisalhamento experimental de vigas em concreto armado reforçadas |
| $V_{fi,eff}^{max}$ | Máxima capacidade efetiva                                                       |

|               |                                                                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_f^{tr}$    | Resistência à tração do laminado de FRP                                                                           |
| $V_{fl}^{bd}$ | Força de ligação máxima do FRP                                                                                    |
| $V_n$         | Resistência nominal ao cortante                                                                                   |
| $V_r^{ana}$   | Esforço cortante residual determinado analiticamente                                                              |
| $V_r^{exp}$   | Esforço cortante residual determinado experimentalmente                                                           |
| $V_s$         | Contribuição do aço para o cortante                                                                               |
| $V_{s0}$      | Contribuição residual após incêndio do aço para o cortante                                                        |
| $V_{sw}$      | é a parcela do cortante resistida pelos estribos                                                                  |
| $a$           | Vão de cisalhamento                                                                                               |
| $ag$          | Quantidade de água                                                                                                |
| $a_f$         | Espessura do laminado de FRP                                                                                      |
| $a_g$         | Espessura da ranhura para inserção do laminado                                                                    |
| $b_f$         | Largura do laminado de FRP                                                                                        |
| $b_{fi}$      | largura reduzida da viga após incêndio                                                                            |
| $b_g$         | Profundidade da ranhura para inserção do laminado                                                                 |
| $b_w$         | Largura da viga                                                                                                   |
| $ci$          | Quantidade de cimento                                                                                             |
| $d$           | Altura útil da viga                                                                                               |
| $d_f$         | Diâmetro da barra de FRP                                                                                          |
| $d_{75}$      | Deslocamento no meio do vão da viga para 75% $P_{max}$                                                            |
| $d_{final}$   | Deslocamento no meio do vão da viga para 85% $P_{max}$ pós-pico                                                   |
| $d_{fe}$      | distância limite para um laminado exercer influência no adjacente                                                 |
| $d_{sw}$      | Diâmetro do estribo de aço                                                                                        |
| $d_{fv}$      | a distância perpendicular entre laminados no bloco de concreto equivalente                                        |
| $d_{fi}$      | altura útil da viga após incêndio                                                                                 |
| $d_f$         | Comprimento do laminado de acordo com Shomali et al. (2020)                                                       |
| $d_v$         | Profundidade efetiva de cisalhamento: maior entre $0,72h_w$ e $0,9d$                                              |
| $d_{500}$     | Profundidade da isoterma dos 500 °C                                                                               |
| $f_0$         | Resistência que envolve a qualidade do concreto, resistência à tração e influência do intertravamento do agregado |
| $f_c$         | Resistência à compressão do concreto                                                                              |
| $f_{ck}$      | Resistência característica à compressão do concreto                                                               |

|               |                                                                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $f_{ct}$      | Resistência à tração do concreto                                                                                    |
| $f_{cta}$     | Resistência à tração do concreto a partir do teste de arrancamento                                                  |
| $f_y$         | Tensão de escoamento do aço                                                                                         |
| $f_u$         | Tensão última do aço                                                                                                |
| $f_{cm}$      | Resistência média à compressão do concreto                                                                          |
| $f_{ctm}$     | Resistência média à tração do concreto                                                                              |
| $f_{ctm}^*$   | Valor da resistência média à tração do concreto para valores maiores do que os quais não ocorre fratura do concreto |
| $f_{c\theta}$ | Resistência residual à compressão do concreto após aquecimento                                                      |
| $f_{fe}$      | Tensão efetiva no laminado de FRP                                                                                   |
| $f_{rupt}$    | Tensão de ruptura do laminado FRP                                                                                   |
| $f_{fu}$      | Tensão de tração última do FRP                                                                                      |
| $h$           | Altura da viga                                                                                                      |
| $h_{c,ef}$    | Altura onde surge as primeiras fissuras de cisalhamento a partir da base da viga                                    |
| $h_w$         | Altura da viga a ser reforçada                                                                                      |
| $k_p$         | coeficiente empírico em relação ao espaçamento entre o NSM FRP                                                      |
| $k_{sr}$      | Fator de redução para resistência residual do aço                                                                   |
| $l_{eff}$     | Comprimento vertical efetivo do laminado                                                                            |
| $p_r$         | Perímetro do laminado FRP                                                                                           |
| $s$           | Deslizamento entre FRP-concreto                                                                                     |
| $s_1$         | Deslizamento final de aderência do FRP, por Sena Cruz et al. (2006)                                                 |
| $s_1$         | Deslizamento na tensão máxima de aderência do FRP, por Cruz et al. (2020) e Wang e Cheng (2020)                     |
| $s_2$         | Deslizamento final no patamar da curva, por Cruz et al. (2020)                                                      |
| $s_3$         | Deslizamento máximo no descolamento do FRP, por Cruz et al. (2020)                                                  |
| $s_f$         | Deslizamento máximo do descolamento do FRP, por Wang e Cheng (2020)                                                 |
| $s_f$         | Espaçamento entre laminados adotado por Bianco et al. (2014)                                                        |
| $s_{fv}$      | Espaçamento horizontal entre os laminados                                                                           |
| $s_m$         | Deslizamento na tensão máxima de aderência FRP-concreto                                                             |
| $s_{sw}$      | Espaçamento entre estribos                                                                                          |
| $s_{max}$     | Deslocamento máximo na descolagem do FRP                                                                            |

|            |                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| $s_u$      | Deslizamento último entre FRP-concreto, por Bianco et al. (2014) |
| $s_{sw}$   | Espaçamento entre os estribos da armadura de aço transversal     |
| $y_\theta$ | Posição da linha neutra após incêndio                            |
| $y_M$      | Fator de redução do momento fletor residual resistente           |

### Letras Gregas

|                       |                                                                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$              | Parâmetro de que define a forma da curva ascendente                                                 |
| $\alpha_b$            | Ângulo para interferência entre laminados adjacentes de Bianco et al. (2014).                       |
| $\alpha$              | Inclinação do laminado por Bui e Stitmannathum (2020)                                               |
| $\alpha'$             | Parâmetro de que define a forma da curva descendente                                                |
| $\alpha_f$            | Inclinação da fissural diagonal de cisalhamento (CDC)                                               |
| $\beta$               | Inclinação dos laminados em relação ao eixo da viga, por Bianco et al. (2014)                       |
| $\beta_0$             | Constante                                                                                           |
| $\beta_H$             | Fator de eficiência que considera a resistência residual entre FRP-concreto após altas temperaturas |
| $\beta_L$             | Fator de redução devido o comprimento colado insuficiente do FRP                                    |
| $\beta_e$             | Fator de redução devido à proximidade entre laminados NSM FRP-concreto                              |
| $\beta_f$             | Inclinação do laminado em relação ao eixo da viga                                                   |
| $\theta$              | Temperatura (°C)                                                                                    |
| $\theta$              | Inclinação da CDC por Bianco et al. (2014), e Bui e Stitmannathum (2020)                            |
| $\varepsilon_{femax}$ | Deformação máxima efetiva no laminado de FRP                                                        |
| $\gamma_{Rd}$         | Fator de segurança parcial de Bianco et al. (2014)                                                  |
| $\gamma_{fB}$         | Fator de redução proposto por Dias e Barros (2013)                                                  |
| $\gamma_{max}$        | Ângulo de abertura do CDC para o qual a capacidade efetiva máxima é atingida                        |
| $\delta_{Lu}$         | Deslizamento imposto devido a força de pico transmitida pelo comprimento $L_{Rfi}^{eq}$             |
| $\delta_u$            | Deslocamento último                                                                                 |
| $\delta_{max}$        | Deslocamento máximo do FRP                                                                          |
| $\mu$                 | Fator de deformabilidade em vigas                                                                   |
| $\varepsilon_{fe}$    | Deformação efetiva do FRP                                                                           |
| $\rho_f$              | Taxa de reforço de FRP na viga                                                                      |
| $\rho_{sw}$           | Taxa de armadura transversal de aço                                                                 |
| $\rho_t$              | Taxa de armadura transversal de aço                                                                 |

|                      |                                                                                                                                      |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\rho_l$             | Taxa de armadura de aço longitudinal tracionado                                                                                      |
| $\sigma$             | Desvio padrão                                                                                                                        |
| $\tau_0$             | Tensão máxima de aderência FRP-concreto, por Bianco et al. (2014)                                                                    |
| $\tau_b$             | Tensão média de aderência                                                                                                            |
| $\tau_f$             | Tensão residual no descolamento do FRP, por Cruz et al. (2020) e Wang e Cheng (2020)                                                 |
| $\tau_{\max}$        | Tensão máxima de aderência FRP-concreto                                                                                              |
| $\tau_m$             | Tensão máxima de aderência FRP-concreto                                                                                              |
| $\varphi_f$          | Relação do plano de falha de descolagem                                                                                              |
| $\varphi_g$          | Relação entre $b_g/a_g$                                                                                                              |
| $\varphi_{gm}$       | Relação entre $b_g$ e $a_g$ , por Mofidi et al. (2018)                                                                               |
| $\psi_3$             | Constante necessária para avaliar a capacidade efetiva máxima fornecida pelo comprimento médio equivalente da ligação de resistência |
| $\psi_f$             | Fator de ponderação de acordo com ACI 440 2R-17                                                                                      |
| $\Delta l$           | Distância entre extensômetros adjacentes                                                                                             |
| $\Delta \varepsilon$ | Variação de deformação entre extensômetros adjacentes                                                                                |
| $\eta$               | Fator de redução do comprimento médio inicial disponível da ligação                                                                  |
| $\phi$               | Fator de ponderação de acordo com ACI 440 2R-17                                                                                      |

## SUMÁRIO

|                |                                                                             |           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                      | <b>23</b> |
| <b>1.1</b>     | <b>Contextualização e justificativa .....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>1.2</b>     | <b>Objetivos .....</b>                                                      | <b>27</b> |
| <b>1.3</b>     | <b>Estrutura do texto .....</b>                                             | <b>27</b> |
| <b>2</b>       | <b>ESTADO DA ARTE .....</b>                                                 | <b>29</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Vigas de concreto armado após incêndio.....</b>                          | <b>29</b> |
| <b>2.1.1</b>   | <i>Verificação da resistência residual.....</i>                             | <i>29</i> |
| <b>2.1.2</b>   | <i>Técnicas não destrutivas para resistência residual do concreto .....</i> | <i>30</i> |
| <b>2.2</b>     | <b>Modelos de aderência NSM CFRP-concreto .....</b>                         | <b>34</b> |
| <b>2.2.1</b>   | <i>Contexto geral (overview) .....</i>                                      | <i>34</i> |
| <b>2.2.2</b>   | <i>Modelos de deslizamento à temperatura ambiente .....</i>                 | <i>35</i> |
| <b>2.2.3</b>   | <i>Modelos de deslizamento após altas temperaturas .....</i>                | <i>38</i> |
| <b>2.3</b>     | <b>Reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado .....</b>            | <b>40</b> |
| <b>2.3.1</b>   | <i>Trabalhos experimentais sobre reforço após incêndio.....</i>             | <i>40</i> |
| <b>2.3.1.1</b> | <i>Haddad e Almasaeid (2016) .....</i>                                      | <i>41</i> |
| <b>2.3.1.2</b> | <i>Al-Rousan (2021) .....</i>                                               | <i>43</i> |
| <b>2.3.2</b>   | <i>Dimensionamento do reforço à temperatura ambiente.....</i>               | <i>44</i> |
| <b>2.3.2.1</b> | <i>Islam (2009) .....</i>                                                   | <i>48</i> |
| <b>2.3.2.2</b> | <i>Dias e Barros (2013) .....</i>                                           | <i>48</i> |
| <b>2.3.2.3</b> | <i>Bianco et al. (2014).....</i>                                            | <i>50</i> |
| <b>2.3.2.4</b> | <i>Mofidi et al. (2018) .....</i>                                           | <i>55</i> |
| <b>2.3.2.5</b> | <i>Shomali et al. (2020).....</i>                                           | <i>56</i> |
| <b>2.3.2.6</b> | <i>Bui e Stitmannathum (2020) .....</i>                                     | <i>57</i> |
| <b>2.3.3</b>   | <i>Dimensionamento do reforço após altas temperaturas .....</i>             | <i>58</i> |
| <b>2.3.3.1</b> | <i>Haddad e Almasaeid (2016) .....</i>                                      | <i>59</i> |
| <b>2.3.3.2</b> | <i>Haddad e Obaidat (2018) .....</i>                                        | <i>60</i> |
| <b>3</b>       | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>                                          | <b>61</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>Propriedades dos materiais .....</b>                                     | <b>61</b> |
| <b>3.1.1</b>   | <i>Concreto .....</i>                                                       | <i>61</i> |
| <b>3.1.2</b>   | <i>Barras de aço e laminado de CFRP .....</i>                               | <i>63</i> |
| <b>3.1.3</b>   | <i>Graute.....</i>                                                          | <i>63</i> |
| <b>3.2</b>     | <b>Amostras .....</b>                                                       | <b>63</b> |

|         |                                                                              |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1   | <i>Detalhamento das vigas</i> .....                                          | 63  |
| 3.2.2   | <i>Instrumentação</i> .....                                                  | 64  |
| 3.2.3   | <i>Plano experimental</i> .....                                              | 66  |
| 3.3     | <b>Métodos de ensaios</b> .....                                              | 66  |
| 3.3.1   | <i>Aquecimento das vigas</i> .....                                           | 67  |
| 3.3.2   | <i>Ensaio não destrutivo no concreto</i> .....                               | 69  |
| 3.3.3   | <i>Reparo e reforço após incêndio</i> .....                                  | 71  |
| 3.3.4   | <i>Flexão em 3 pontos</i> .....                                              | 73  |
| 3.3.5   | <i>Ensaio residual do aço</i> .....                                          | 75  |
| 3.4     | <b>Resultados experimentais</b> .....                                        | 76  |
| 3.4.1   | <i>Temperaturas</i> .....                                                    | 76  |
| 3.4.2   | <i>Spalling</i> .....                                                        | 77  |
| 3.4.3   | <i>Ultrassom</i> .....                                                       | 79  |
| 3.4.3.1 | <i>Método direto</i> .....                                                   | 79  |
| 3.4.3.2 | <i>Método indireto</i> .....                                                 | 81  |
| 3.4.4   | <i>Teste de arrancamento</i> .....                                           | 82  |
| 3.4.5   | <i>Resistência residual do aço</i> .....                                     | 85  |
| 3.4.6   | <i>Comportamento mecânico</i> .....                                          | 90  |
| 3.4.6.1 | <i>Capacidade de carga ao cisalhamento</i> .....                             | 90  |
| 3.4.6.2 | <i>Modos de falha</i> .....                                                  | 91  |
| 3.4.6.3 | <i>Rigidez e deformabilidade das vigas</i> .....                             | 94  |
| 3.4.6.4 | <i>Carga vs. deformação nos estribos e laminados de CFRP</i> .....           | 97  |
| 4       | <b>PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS</b> .....                                        | 100 |
| 4.1     | <b>Resistência residual de vigas de concreto armado</b> .....                | 100 |
| 4.1.1   | <i>Procedimento para determinação da capacidade residual das vigas</i> ..... | 101 |
| 4.1.1.1 | <i>Análise térmica</i> .....                                                 | 101 |
| 4.1.1.2 | <i>Resistência residual à flexão</i> .....                                   | 102 |
| 4.1.1.3 | <i>Resistência residual ao cisalhamento</i> .....                            | 103 |
| 4.1.2   | <i>Dados experimentais</i> .....                                             | 105 |
| 4.1.3   | <i>Resultados e discussão</i> .....                                          | 109 |
| 4.1.3.1 | <i>Resistência residual à flexão</i> .....                                   | 109 |
| 4.1.3.2 | <i>Resistência residual ao cisalhamento</i> .....                            | 111 |
| 4.2     | <b>Dimensionamento do reforço à temperatura ambiente</b> .....               | 113 |
| 4.2.1   | <i>Procedimento para dimensionamento</i> .....                               | 113 |

|       |                                                                                                     |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2 | <i>Dados experimentais</i> .....                                                                    | 118 |
| 4.2.3 | <i>Resultados e discussão</i> .....                                                                 | 124 |
| 4.3   | Proposta de dimensionamento do reforço em vigas após incêndio .....                                 | 127 |
| 4.3.1 | <i>Procedimento</i> .....                                                                           | 127 |
| 4.3.2 | <i>Dados experimentais</i> .....                                                                    | 128 |
| 4.3.3 | <i>Resultados e discussão</i> .....                                                                 | 128 |
| 5     | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                          | 132 |
| 5.1   | Conclusões .....                                                                                    | 132 |
| 5.2   | Trabalhos futuros.....                                                                              | 133 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                                   | 134 |
|       | APÊNDICE A – CAPACIDADE DE CISALHAMENTO RESIDUAL DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO APÓS INCÊNDIO .....   | 145 |
|       | APÊNDICE B – CAPACIDADE DE CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO REFORÇADAS .....               | 148 |
|       | APÊNDICE C – CAPACIDADE DE CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO REFORÇADAS APÓS INCÊNDIO ..... | 152 |
|       | APÊNDICE D – INDICATIVO DE PRODUTIVIDADE.....                                                       | 156 |
|       | ANEXO A – CARGA-DESLOCAMENTO DAS VIGAS SEM REFORÇO .....                                            | 157 |
|       | ANEXO B – CARGA-DESLOCAMENTO DAS VIGAS COM REFORÇO .....                                            | 172 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e justificativa

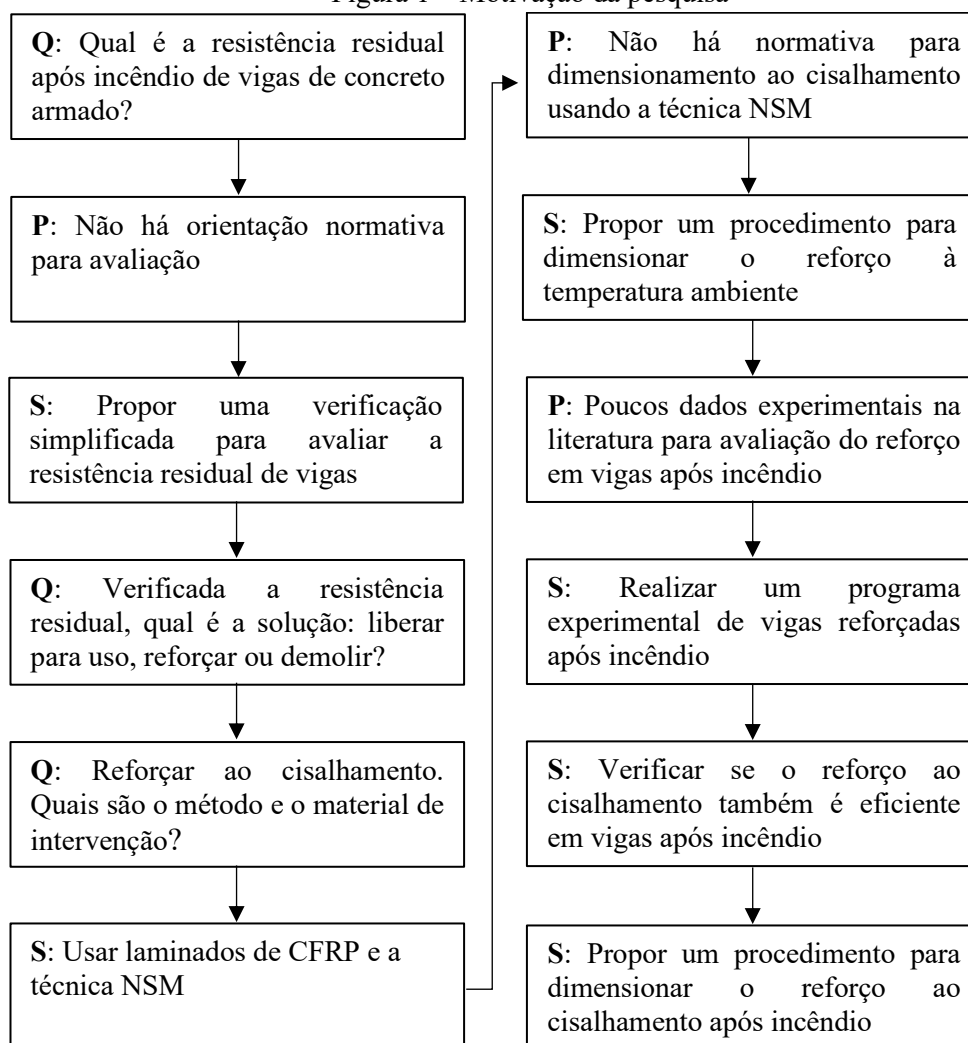
A análise estrutural após incêndio de elementos em concreto armado é imprescindível na análise sobre a existência de perda da capacidade resistente. Neste âmbito, elementos sujeitos a cargas transversais ao seu eixo longitudinal, como as vigas, esforços de flexão e cisalhamento surgem, e precisam ser avaliados com prudência.

A determinação da capacidade residual das vigas, então, é decisiva na definição das medidas a serem adotadas: liberar, reparar, reabilitar ou reforçar a estrutura. No processo de intervenção nos elementos de concreto, diferentes expressões em diferentes referências são usadas como “termos gerais”, e até como “sinônimos”, para descrever essas atividades (SED, 2010). As definições dos termos adotados neste documento seguem a norma americana ACI 562-19 e são apresentadas a seguir. Reparo é a reconstrução ou renovação de partes de concreto de uma estrutura existente para fins de manutenção ou correção de deterioração. Reforço é o processo de aumentar a capacidade de carga de uma estrutura existente ou parte dela. Reabilitação inclui os conceitos de reparo e reforço, com objetivo de retornar características originais de carga do elemento. A partir do entendimento desses conceitos é possível avançar na discussão desenvolvida nesta pesquisa.

A Figura 1 apresenta um fluxograma com a motivação para desenvolvimento da pesquisa e a problematização do tema abordado na presente tese, com destaque ao questionamento (Q), problema (P) e solução (S).

As estruturas em concreto armado têm bom desempenho em situação de incêndio devido às propriedades térmicas do concreto, e Molken et al. (2017) ressaltam a baixa probabilidade de falha dessas estruturas em incêndio. No entanto, há uma tendência de que vigas de concreto armado após submetidas a incêndio se tornem mais propensas a falha por cisalhamento do que por flexão (SHANG et al., 2020). Essa mudança no modo de falha foi observada por Thanaraj et al. (2020), onde as vigas com ruptura à flexão sob temperatura ambiente, começaram a falhar ao cisalhamento após incêndio. Apesar dessa tendência, Jiang et al. (2018) destacam a pequena quantidade de trabalhos a respeito da resistência residual ao cortante, sendo a maioria dos estudos conduzidos sobre a capacidade residual à flexão. Segundo Diab (2014), a ruptura governada por cisalhamento é repentina e indesejada, sendo pertinente uma avaliação criteriosa para decidir sobre a necessidade de reforço estrutural.

Figura 1 – Motivação da pesquisa



Fonte: O autor (2022)

Na literatura, alguns autores propuseram formulações analíticas para determinar a resistência residual de vigas em concreto armado, como Hsu e Lin (2008), Kodur et al. (2010), e Xu et al. (2013), mas não há orientação normativa que respalde o projetista. Neste sentido, há a necessidade de mais trabalhos a fim de consolidar o conhecimento à busca de padronização. No exercício profissional do engenheiro estrutural, ao avaliar a resistência residual de uma estrutura com algum procedimento validado na literatura, e ao verificar a necessidade de reabilitação, outra questão a resolver é a definição do método de reforço estrutural a utilizar.

Uma solução adotada no reforço de estruturas em concreto armado tem sido o uso de materiais compósitos como o FRP (*fiber reinforced polymer*). A fibra de carbono utilizada na composição do CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) merece destaque devido à sua maior resistência e módulo de elasticidade em comparação a outras fibras, como a fibra de vidro e a fibra de aramida. Além disso, é leve, fácil de aplicar, e resistente à corrosão. A aplicação do CFRP tem a finalidade de, principalmente, reforçar e reabilitar elementos estruturais devido a

uma diversidade de motivações, como mudança do uso e ocupação, correção de manifestações patológicas, danos mecânicos e/ou térmicos na estrutura.

Os produtos de CFRP são usualmente comercializados em forma de vergalhões/barras, mantas e laminados. As técnicas de aplicação do CFRP em estruturas de concreto armado mais difundidas são: *externally-bonded reinforced* (EBR) e *near-surface mounted* (NSM). Enquanto a técnica EBR é caracterizada por colar o reforço na superfície do concreto com material adesivo, a técnica NSM consiste em realizar ranhuras no concreto para inserir e colar o elemento de reforço. A técnica NSM tem se mostrado mais eficiente do que a técnica EBR em vigas de concreto armado no reforço à flexão e ao cisalhamento, como relatam Dias (2008), Arruda et al. (2015), Khalifa (2016), Firmo et al. (2017), Jiangtao et al. (2017) e Yu et al. (2018). As vantagens da técnica NSM comparada a técnica EBR são elencadas por Coelho et al. (2015): (i) quantidade reduzida de trabalho na preparação do substrato; (ii) menos propenso a descolamento prematuro porque a área colada é maior; (iii) facilidade em estender o reforço aos elementos adjacentes; (iv) maior proteção do FRP contra agentes agressivos externos, como temperatura ou atos de vandalismo; e (v) menor impacto visual.

Mesmo com eficiência já comprovada em programas experimentais e numéricos, as proposições analíticas para mensurar a contribuição do reforço ao cisalhamento ainda são poucas e com resultados sem a precisão que uma formulação de caráter normativa necessita. Neste sentido, pesquisadores têm se dedicado a propor formulações analíticas para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento com laminados de CFRP e a técnica NSM, a citar: Dias (2008), Bianco et al. (2014), Mofidi et al. (2018), Shomali et al. (2020), e Bui e Stitmannathum (2020). No entanto, as propostas analíticas ainda apresentam grande coeficiente de variação comparadas com os poucos resultados experimentais disponíveis na literatura, e foram desenvolvidas para o reforço de vigas íntegras, ou seja, sem a consideração do efeito deletério das altas temperaturas no concreto.

Recentemente, Al-Saadi et al. (2019) reiteraram que apesar da eficiência dos sistemas NSM FRP, todas as diretrizes e códigos atualmente disponíveis sobre o reforço de estruturas de concreto se concentram no sistema EBR FRP. Os códigos de dimensionamento orientados para a técnica EBR que se destacam são SIA 166 (2004), CNR-DT 200 R1 (2013), CAN/CSA-S806-12 (2017), ACI 440 2.R (2017) e *fib* Bulletin 90 (2019). Prado (2016) ressaltou que no Brasil não existem normas para a utilização do reforço com CFRP em concreto, sendo essencial o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o tema. No cenário atual, existe o CT-303/GT-2, um comitê técnico (CT) do IBRACON/ABECE, cujas atividades são organizadas em um Grupo de Trabalho (GT) com objetivo de desenvolver trabalhos técnicos, visando auxiliar na

normalização brasileira sobre o reforço de estruturas existentes de concreto com materiais não convencionais.

É consenso na literatura, que a compreensão sobre a eficiência do reforço passa pela aderência entre o NSM CFRP e o concreto. O mecanismo da ligação CFRP-adesivo-concreto é complexo, e sua qualidade é determinante no desempenho das estruturas de concreto reforçadas/reabilitadas com os materiais compósitos, como destacam Al-Saadi et al. (2019) e Wang e Cheng (2021). O conhecimento sobre a contribuição de laminados de CFRP inseridos no cobrimento do concreto para reforçar ao cisalhamento as vigas de concreto armado é ainda mais complexo, principalmente quando aplicado após incêndio.

Al-Jadooe et al. (2017a) analisaram a aderência na ligação NSM CFRP-concreto após o fogo, e concluíram que o reforço não foi eficiente para temperaturas do concreto entre 800 e 1000 °C. Um estudo experimental relevante sobre vigas de concreto armado foi apresentado por Haddad e Almasaeid (2016), que analisaram a eficiência do reforço ao cisalhamento após fogo com laminados de CFRP e a técnica NSM, e recomendaram o uso do reforço em vigas expostas a temperaturas até 500 °C. No entanto, um cenário de incêndio pode atingir temperaturas acima de 1000 °C, o que pode inviabilizar o uso deste sistema. Porém, os trabalhos realizados analisaram as amostras no estado estacionário de temperatura, o que não representa um cenário de incêndio onde ocorre um gradiente de temperatura ao longo da seção transversal do elemento.

O pequeno número de estudos experimentais analisando o reforço aplicado em vigas danificadas pelo fogo limita o desenvolvimento de procedimentos de dimensionamento para utilização do sistema NSM CFRP. Não há, até então, uma proposta analítica disponível para dimensionamento ao cisalhamento do sistema NSM CFRP, após incêndio, de vigas em concreto armado. Neste sentido, há a necessidade de mais campanhas experimentais para compreensão da efetividade do reforço após incêndio e, se o sistema for eficiente, surgirem propostas analíticas para dimensionamento.

Este trabalho, a fim de contribuir para uma maior quantidade de dados experimentais, avaliou o reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado danificadas pelo fogo. Para tanto, foi desenvolvido um programa experimental com 16 vigas de concreto armado estudadas à temperatura ambiente e após incêndio, com e sem reforço ao cisalhamento. O grupo de vigas aquecido foi exposto durante os tempos de 60, 90 e 120 min, conforme a curva de incêndio padrão da ISO 834 (2014). Após o resfriamento até a temperatura ambiente, as vigas foram reforçadas com laminados de CFRP e a técnica NSM. Os laminados foram aplicados a 45° em relação ao eixo da longitudinal das vigas, e usados espaçamentos de 75, 150 e 200 mm. As

vigas foram ensaiadas até a ruptura no ensaio de flexão em 3 pontos, avaliando a capacidade de carga, deformabilidade e rigidez. Complementando a pesquisa, um estudo analítico foi realizado com a finalidade de propor um procedimento simplificado para dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado após incêndio.

## **1.2 Objetivos**

O trabalho teve a proposta de desenvolver um programa experimental e analítico com o objetivo geral de compreender o comportamento de vigas em concreto armado reforçadas ao cisalhamento à temperatura ambiente e após incêndio, utilizando laminados de CFRP e a técnica NSM. Os objetivos específicos foram:

- Fornecer dados experimentais para literatura técnica;
- Utilizar ensaios não destrutivos (ultrassom e arrancamento) para avaliar a perda de resistência do concreto promovida pela temperatura;
- Avaliar a influência da temperatura na eficiência do sistema NSM CFRP após incêndio;
- Avaliar um procedimento simplificado na verificação da resistência residual após incêndio de vigas em concreto armado;
- Propor um procedimento simplificado para dimensionar o reforço ao cisalhamento de vigas à temperatura ambiente;
- Propor um procedimento simplificado para dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas após incêndio.

O cumprimento da pesquisa, portanto, contempla a limitação de dados experimentais e formulações analíticas relacionados ao reforço de vigas em concreto armado após incêndio.

## **1.3 Estrutura do texto**

O texto é organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução, justificativa, objetivos, e estrutura do texto.

O Capítulo 2 traz o estado da arte sobre o tema, apresentado uma revisão sobre os trabalhos experimentais, os modelos analíticos disponíveis e limitações dos métodos.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental, os resultados e as discussões.

O Capítulo 4 apresenta o estudo analítico desenvolvido, contemplando três abordagens: (1) determinação da resistência residual de vigas em concreto armado, (2) dimensionamento à temperatura ambiente do reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado, e (3) dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado após incêndio.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões observadas nos estudos experimental e analítico, e propõe temas para futuras pesquisas. A Figura 2 apresenta o fluxograma com organização do texto da Tese.

Figura 2 – Fluxograma da estrutura do texto



Fonte: O autor (2022)

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Vigas de concreto armado após incêndio

#### 2.1.1 *Verificação da resistência residual*

Os padrões normativos NBR 15200 (ABNT, 2012), EN 1991 1-2 (2002) e EN 1992 1-2 (2004) não apresentam uma recomendação clara a respeito da avaliação da resistência residual de elementos em concreto armado após situação de incêndio. Inclusive, se a tendência de falha por flexão (esperada em situação de incêndio) ainda continua prevalecendo nas vigas após incêndio.

Na literatura, alguns autores têm se dedicado a propor formulações analíticas para determinar a resistência residual de vigas em concreto armado, e cabe destacar os mais relevantes a seguir.

Hsu e Lin (2008) propuseram uma abordagem a partir das expressões à temperatura ambiente do ACI 318 (2002), considerando a compatibilidade de deformações para avaliar a resistência residual de vigas expostas ao fogo. Foi observado que a resistência residual para o momento fletor e esforço cortante são diferentes: a resistência ao cisalhamento após incêndio foi de 53,05% e 40,8%, enquanto o momento fletor residual foi de 65,13% e 52,83% para 120 e 180 min, respectivamente. Indicando que a redução da capacidade ao cisalhamento é maior do que a capacidade à flexão após incêndio.

Kodur et al. (2010) apresentaram uma abordagem simplificada para cálculo da resistência residual de vigas com base nas expressões do ACI 318 (2008) à temperatura ambiente. Foram adotados de fatores de redução para a resistência do aço e do concreto com base na estimativa da temperatura máxima e duração do incêndio, identificados a partir de observações visuais do concreto exposto. Como resultado, os cálculos para o momento fletor residual mostraram-se conservadores.

Bai e Wang (2011) propuseram um método de cálculo do momento residual em vigas de concreto armado após incêndio com base no dimensionamento à temperatura ambiente, porém, considerando as seções de concreto e dos vergalhões reduzidos para compensar os danos causados pelo incêndio. Em estudo paramétrico, concluíram que a resistência do concreto e do aço têm pouca influência sobre a resistência residual.

Xu et al. (2012, 2013, 2015) apresentaram uma sequência de trabalhos experimentais analisando a resistência residual ao esforço cortante e momento fletor de vigas em concreto armado com seção retangular e “T”. Foi feita uma estimativa da resistência após incêndio a

partir das expressões do código chinês (GB 50010, 2010) para temperatura ambiente, reduzindo as resistências do concreto e do aço em função da temperatura. Os resultados experimentais foram usados para validar trabalhos numéricos.

Abordagens numéricas também foram desenvolvidas por Kodur e Agrawal (2015), Sun et al. (2018) e Cai et al. (2019), mas exigem um custo computacional para análise mais rigorosa.

Kodur e Agrawal (2015) conduziram uma análise não linear em elementos finitos com o pacote ABAQUS para prever a resistência residual após incêndio de estruturas de concreto armado. Os resultados numéricos mostraram-se mais próximos aos resultados experimentais do que a proposta simplificada, destacando que as vigas preservam de 60 a 70% da sua capacidade resistente à temperatura ambiente.

Sun et al. (2018) apresentaram uma análise numérica termoestrutural para estimar a resistência residual, os deslocamentos, e a rigidez de vigas de concreto armado após diferentes tempos de exposição. Os resultados numéricos foram validados com o programa experimental apresentado em Kumar e Kumar (2003), e tiveram boa correlação.

Cai et al. (2019) aplicaram um método de verificação utilizando um sistema em rede de inteligência artificial para determinar a resistência residual ao cisalhamento de vigas de concreto armado após incêndio. O estudo paramétrico realizado envolveu a variação da base, altura, tempo de exposição, área e espaçamento do estribo, resistência do concreto e cobrimento. Os resultados mostram que a proposta conseguiu prever as resistências com boa aproximação com os resultados experimentais confrontados.

Como é possível observar nos trabalhos elencados, poucas propostas analíticas para estimar a resistência residual de vigas de concreto armado após incêndio foram formuladas. Ainda mais escassa é a análise do cisalhamento residual, sendo as pesquisas muitas vezes condicionadas à verificação da capacidade resistente à flexão.

### ***2.1.2 Técnicas não destrutivas para resistência residual do concreto***

Mensurar a resistência residual de uma estrutura de concreto após incêndio é um processo decisivo para elaboração de um projeto de reparo e reabilitação após o sinistro. Neste sentido, Lorenzi et al. (2015) ressaltam que usar técnicas menos invasivas que permitam estimar a resistência dos elementos são importantíssimas, pois apesar de ser mais confiável, a extração de amostras pode danificar ainda mais a estrutura.

Apesar de não ser o principal foco do trabalho, a análise da resistência residual do concreto correlacionada a técnicas não destrutivas é pertinente. Então, foram utilizados os testes

de ultrassom (teste não destrutivo) e de arrancamento do cobrimento do concreto (teste semi-destrutivo), a fim de identificar a sensibilidade da técnica na identificação da qualidade do concreto, resistência residual do concreto e critérios para aplicação do reforço.

O teste de arrancamento (*Pull-off Test*) se apresenta como uma técnica simples e que pode ser efetiva sobre a qualidade do concreto na região do cobrimento da armadura, local destinado a aplicação do reforço. A técnica consiste em fazer uma incisão de profundidade fixa e área circular para colagem do disco de arrancamento, impondo a localização da falha esperada causada pela força de tração. Com base na resistência à tração, a resistência à compressão do concreto pode ser avaliada usando as correlações experimentais (YANG et al., 2020; WRÓBLEWKA e KOWALSKI, 2020).

Alguns fatores afetam a resistência à tração do concreto, como tipo de agregado, relação água/cimento, idade, método de cura, e tamanho do corpo de prova. Um extenso programa experimental avaliando concretos com essas variáveis foi realizado por Yang et al. (2020), e uma expressão empírica (1) com base na regressão exponencial de 320 amostras foi apresentada para o teste *pull-off* padrão, além de uma proposta de modificação no teste padrão (MPTM). A Equação (1) relaciona a tensão de tração ( $f_{ta}$ ) encontrada no teste de arrancamento e a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ).

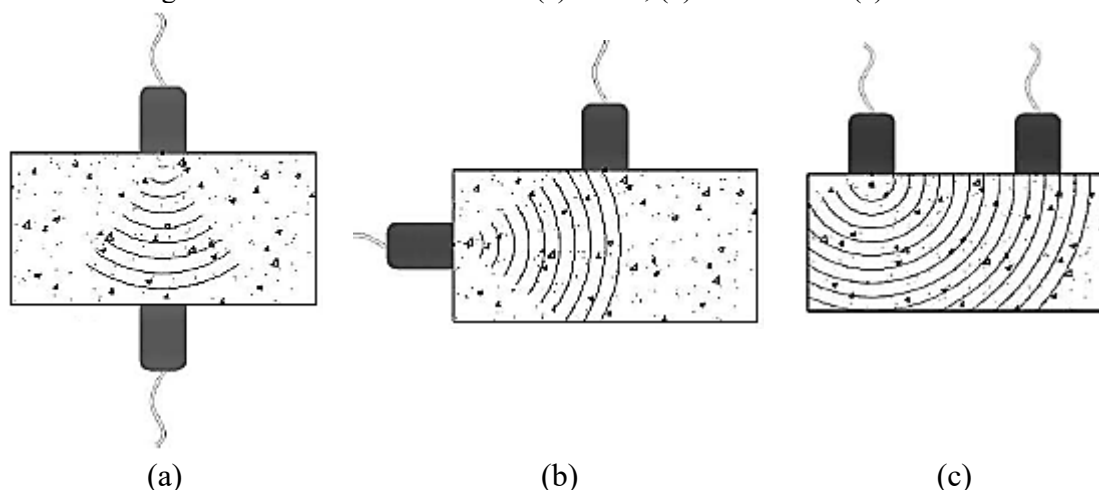
$$f_c = 35,2 \cdot f_{ta}^{0,76} \quad (1)$$

Neste trabalho, o teste de arrancamento foi realizado de acordo com o procedimento da ASTM C1583/C1583M. A aplicação da técnica semi-destrutiva teve o objetivo de auxiliar na predição da resistência do concreto na região do cobrimento.

O uso do ultrassom para medir a Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico (VPU) vem sendo utilizado comumente em diversas áreas da Engenharia Civil, devido à facilidade da operação, ao seu baixo custo, à rapidez na execução dos testes, e à ausência de danos ao material analisado (ADAMATI et al. 2017).

A NBR 8802 (ABNT, 2019) apresenta condições para realização de ensaios para permitir a determinação da VPU. Três métodos são apresentados, conforme Figura 3: método direto, semidireto e indireto. A respeito da efetividade do método para determinação da resistência residual em elementos submetidos ao fogo, a norma não entra no mérito.

Figura 3 – Modos de transmissão (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto



Fonte: Ndagi et al. (2019)

As primeiras escalas de VPU para avaliação da qualidade do concreto através da leitura do ultrassom que surgiram foram de Leslie e Chessemann (1949), Whitehurst (1966), e Feldman (1977), e continuam sendo referenciadas na literatura para avaliação qualitativa do concreto até os trabalhos atuais. A Tabela 1 apresenta a classificação da qualidade do concreto proposta por Whitehurst (1966), ressaltando que as escalas são muito semelhantes e, portanto, não implicam em uma avaliação discrepante a depender da referência adotada.

Tabela 1 – Qualidade do concreto em função da VPU

| <b>VPU</b><br>(m/s) | <b>Qualidade do concreto</b><br>- |
|---------------------|-----------------------------------|
| > 4500              | Excelente                         |
| 3500 < VPU < 4500   | Ótimo                             |
| 3000 < VPU < 3500   | Bom                               |
| 2000 < VPU < 3000   | Regular                           |
| VPU < 2000          | Ruim                              |

Fonte: Adaptado de Whitehurst (1966)

Há uma diversidade de variáveis que envolvem a análise do concreto, e alguns fatores que interferem na propagação da VPU no concreto são elencados por Adamati et al. (2017), a destacar: condições da superfície do elemento, umidade, tipo e dimensão do agregado, presença de aço, e frequência do ultrassom. Ahmed et al. (2019) destacam que a velocidade das ondas ultrassônicas no aço é duas vezes superior à do concreto e, portanto, pode produzir resultados irregulares.

Wendt (2006) observou que as perdas de VPU foram maiores do que as perdas de resistência a compressão e menores do que o módulo de elasticidade, concluindo que tanto o módulo de elasticidade quanto o ultrassom possuem uma maior sensibilidade em detectar microfissuras na matriz do concreto do que a resistência à compressão.

Yang et al. (2009) correlacionaram a VPU e a resistência residual do concreto. Apresentaram uma equação ajustada a partir de regressão linear com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,94 para as amostras ensaiadas até 600 °C. Em trabalho semelhante, Lin et al. (2011) desenvolveram um estudo experimental e apresentaram a Equação 2 para estimativa da resistência residual à compressão do concreto com base na leitura da VPU em amostras submetidas até 1000 °C. A expressão foi desenvolvida a partir de regressão linear dos dados experimentais, e apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,93.

$$K_{CR}=1,03 \cdot K_{VR} - 0,063 \quad (2)$$

$$K_{VR} = \frac{VPU_{\theta}}{VPU_a} \quad (3)$$

$$f_{c\theta}=K_{CR} \cdot f_c \quad (4)$$

onde:  $K_{CR}$  é o fator de redução da resistência à compressão com concreto após aquecido;  $K_{VR}$  é o fator de redução da VPU depois de aquecido;  $VPU_{\theta}$  é a leitura do VPU no concreto após aquecido;  $VPU_a$  é a leitura da VPU no concreto de referência à temperatura ambiente;  $f_c$  é a resistência do concreto de referência à temperatura ambiente; e  $f_{c\theta}$  é a resistência do concreto após aquecido.

Alcaíno et al. (2020) apresentaram uma proposta simplificada para mensurar a resistência residual em elementos de concreto armado com base na VPU. Os procedimentos que apresentaram melhores resultados para as vigas foram com emissor e receptor em transmissão indireta (mesma face) e semidireta (faces adjacentes), já para as colunas o procedimento melhor foi com transmissão direta (faces opostas). Em todas as análises a curva exponencial foi a que teve o melhor ajuste.

Wróblewska e Kowalski (2020) apresentam uma revisão sobre métodos não destrutivos, e destacam que os valores de VPU encontrados através da transmissão direta não permitem determinar a espessura da camada de concreto danificada.

Araújo et al. (2022) apresentam um estudo sobre a resistência residual de concreto de alta resistência e o uso do ultrassom para estimativa da resistência residual do concreto. Os autores avaliaram apenas uma classe de concreto e amostras submetidas a temperaturas de até 600 °C.

Como é possível observar na breve abordagem, a estimativa da degradação no concreto pode ser realizada através de teste de arrancamento e da velocidade de pulsos ultrassônicos. Portanto, os ensaios de arrancamento e ultrassom foram utilizados no programa experimental desta pesquisa com a adoção das expressões propostas por Yang et al. (2020) e Lin et al. (2011), respectivamente.

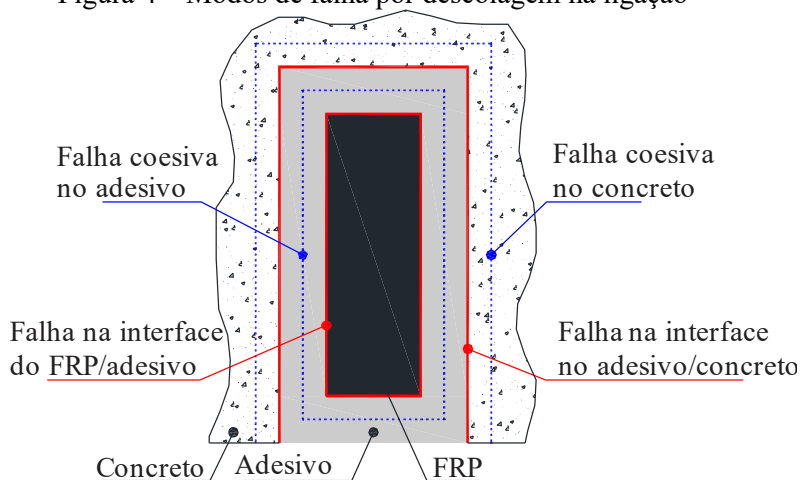
## 2.2 Modelos de aderência NSM CFRP-concreto

### 2.2.1 Contexto geral (overview)

O desempenho da ligação é influenciado diretamente por muitos parâmetros. Na perspectiva de compreender o funcionamento da ligação, essa sessão é destinada a abordar os modelos analíticos desenvolvidos para prever o comportamento do sistema FRP-adesivo-concreto.

As formulações disponíveis descrevem uma lei de deslizamento (*bond-slip law*) que contempla a tensão de cisalhamento promovida entre os materiais e o deslizamento relativo entre eles. Conhecida a lei de deslizamento é possível determinar a força de arrancamento da ligação ( $F_{out}$ ), usualmente proposta com base no modo de falha observado nos experimentos. Os modos de falha nas ligações NSM FRP-concreto podem ser associados ao fenômeno de descolagem na interface, e não somente aos materiais (concreto, adesivo ou FRP) usados. Coelho et al. (2015) dividiram em quatro os modos de falha, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Modos de falha por descolagem na ligação



Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2015)

Al-Saadi et al. (2019) aprontam alguns fatores que interferem no modo de ruptura (Tabela 2). Elencando, ainda, os parâmetros que mais afetam a eficiência da colagem: dimensões do FRP e da ranhura, resistência do concreto, tipo do adesivo, e comprimento de colagem.

Em análise sobre os modos de falha, e baseado nos resultados de De Lorenzis e Teng (2007), Zhang et al. (2013) observaram que o modo de falha coesiva no concreto (próximo a interface concreto/adesivo) é mais eficaz para predizer um modelo com segurança sobre o comportamento da ligação. A falha no concreto, então, fica relacionada às propriedades do material substrato (concreto), facilitando a análise por dispensar a difícil predição sobre as

interfaces concreto/adesivo e adesivo/FRP devido a diversidade de fatores que influenciam no comportamento de aderência.

Tabela 2 – Modos de falha e fatores de influência

| <b>Modo de falha</b>                                | <b>Fatores de influência</b>                                                                                        |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ruptura do FRP                                      | Quando há um confinamento eficiente do FRP e um comprimento de colagem adequado                                     |
| Falha nas interfaces concreto/adesivo e adesivo/FRP | Comprimentos de colagem insuficientes ou adesivo de baixa resistência à tração                                      |
| Falha coesiva no concreto                           | Concreto de menores resistência e adesivos com alta resistência à tração                                            |
| Falha coesiva no adesivo                            | Pequena profundidade na ranhura para inserção do laminado, levando a fissuração no adesivo sem fissuras no concreto |

Fonte: Adaptado de Al-Saadi et al. (2019)

Uma quantidade razoável de trabalhos estudou a ligação à temperatura ambiente, mas poucos analisando após altas temperaturas a relação tensão-deslizamento e a força de arrancamento da ligação NSM FRP-concreto, com destaque para os trabalhos de Haddad e Almasaeid (2016), Al-Jadooe et al. (2017b, c), e Haddad e Obaidat (2018).

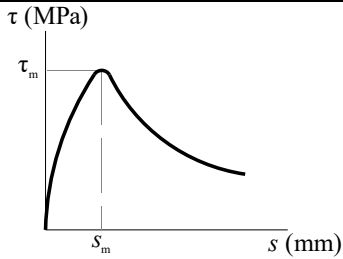
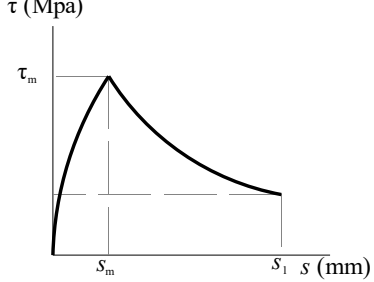
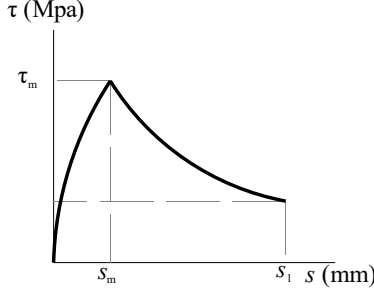
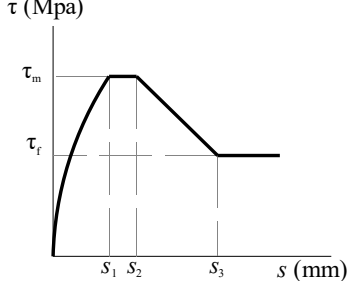
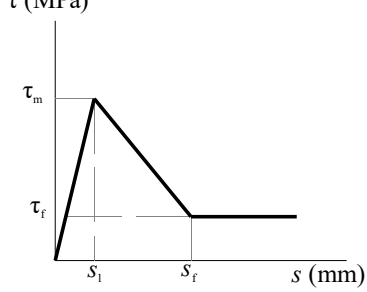
As próximas subseções são destinadas, portanto, a apresentar os modelos analíticos da ligação NSM CFRP-concreto, ou seja, aplicação do sistema de reforço no concreto com laminados de CFRP, usando a técnica NSM, e adesivos rígidos do tipo Epóxi. A revisão é dividida em duas partes: os modelos à temperatura ambiente e os modelos após altas temperaturas.

### **2.2.2 Modelos de deslizamento à temperatura ambiente**

Os modelos propostos para o sistema de reforço, mais relevantes e recentes, são apresentados na Tabela 3, destacando as equações de cada proposta e os dados de entrada necessários. Na Tabela 4 são apresentadas as conclusões dos autores destacando o tipo de ensaio utilizado na análise e o modo de ruptura que o modelo é capaz de prever.

A eficiência da ligação é influenciada diretamente por parâmetros como: tipo do adesivo (rígido ou flexível) e da seção transversal do FRP (CRUZ et al. 2020), das dimensões da ranhura para inserção do laminado (ZHANG et al. 2013), da técnica de aplicação (NSM ou EBR) que podem implicar em diferentes modos de falha (SIDDIKA et al. 2020), entre outros. A predição da força de arrancamento também é dependente de variáveis que autores ao longo dos anos foram introduzindo aos modelos, como: cobertura do laminado (OEHLERS et al., 2008), distância entre laminados e distância entre laminado/borda do concreto (RASHID et al., 2008; ZHANG et al. 2018), comprimento do laminado colado (ZHANG et al. 2014), e presença de armadura de aço no concreto (HADDAD e AL-RABADI, 2020).

Tabela 3 – Modelos analíticos

| Autor | Dados de entrada                           | Modelo de deslizamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Curva $\tau - s$                                                                      |
|-------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | $\tau_m, s_m, \alpha$<br>e $\alpha'$       | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & \text{se } s \leq s_m \\ \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'}, & \text{se } s > s_m \end{cases}$                                                                                                                                                                                                                                     |    |
| 2     | $\tau_m, s_m, \alpha$<br>e $\alpha'$       | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & \text{se } s \leq s_m \\ \tau_m \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{s - s_m}{s_1}\right)^{\alpha'}}\right)^\alpha, & \text{se } s > s_m \end{cases}$                                                                                                                                                                                              |    |
| 3     | $f_c, a_g$ e $b_g$                         | $\begin{aligned} \tau(s) &= A \cdot \left(\frac{2 \cdot B - s}{B}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2 \cdot B - s}{B}\right) \text{ para } s \leq 2 \cdot B \\ \tau_m &= 1,15 \cdot \varphi_g^{0,138} \cdot f_c^{0,613} \\ G_f &= 0,4 \cdot \varphi_g^{0,422} \cdot f_c^{0,619} \\ A &= 0,72 \cdot \varphi_g^{0,138} \cdot f_c^{0,613} \\ B &= 0,37 \cdot \varphi_g^{0,284} \cdot f_c^{0,006} \end{aligned}$ |   |
| 4     | $\tau_m, \tau_f, s_1, s_2, s_3$ e $\alpha$ | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_m, & s_1 < s \leq s_2 \\ \tau_m - (\tau_m - \tau_f) \cdot \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2}\right), & s_2 < s \leq s_3 \\ \tau_f, & s > s_3 \end{cases}$                                                                                                                                                                   |  |
| 5     | $\tau_f, \tau_r, s_1$ e $s_f$              | $\tau(s) = \begin{cases} \frac{s}{s_1} \cdot \tau_f, & 0 \leq s \leq s_1 \\ \frac{s_f - s}{s_f - s_1} \cdot \tau_f, & s_1 < s \leq s_f \\ \tau_r, & s > s_f \end{cases}$                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| 1     | Sena Cruz e Barros (2004)                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |
| 2     | Sena Cruz et al. (2006)                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |
| 3     | Zhang et al. (2013)                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |
| 4     | Cruz et al. (2020)                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |
| 5     | Wang e Cheng (2021)                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |

Fonte: O autor (2022)

Tabela 4 – Tipos de ensaio, adesivos, modos de falha e as conclusões dos autores

| Autor                                                                                                                           | Ensaio                  | Adesivo                                           | Falha                                                     | Conclusões                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                               | <i>Pullout-bending</i>  | Epoxi                                             | FRP-Epóxi                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Força de arrancamento (<math>F_{out}</math>) aumentou com <math>L_b</math>;</li> <li>- Influência insignificativa de <math>f_c</math>;</li> <li>- <math>s_m</math> tendência de aumento com o aumento de <math>L_b</math>;</li> <li>- <math>\tau_m</math> tendência de diminuição com o aumento de <math>L_b</math>.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 2                                                                                                                               | <i>Pullout-bending</i>  | Epoxikleber 220                                   | FRP-Epóxi                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>s_m</math> aumenta com <math>L_b</math> (não considerou deformação no adesivo);</li> <li>- A força de arrancamento (<math>F_{out}</math>) aumenta com <math>L_b</math>;</li> <li>- A tensão média de aderência (<math>\tau_b</math>) diminui com o aumento de <math>L_b</math>.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 3                                                                                                                               | <i>Direct Pull Test</i> | Epoxi                                             | Concreto na interface adesivo/concreto                    | - A energia de fratura interfacial ( $G_f$ ) aumenta com a resistência do concreto ou com a relação altura-largura da ranhura.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 4                                                                                                                               | <i>Direct Pull Test</i> | Epoxi Pak CF<br>Epoxi S32 Hi-Mod<br>ETI-GV<br>ADH | FRP-Epóxi                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A força de arrancamento foi correlacionada com as propriedades do adesivo epóxi;</li> <li>- A resistência do concreto teve influência, apesar da quantidade limitada de amostras;</li> <li>- O modelo tri-linear com tensão residual pós-descolagem teve boa correlação com dados experimentais.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 5                                                                                                                               | <i>Direct Pull Test</i> | Epóxi 1<br>Epóxi 2<br>Flexível                    | FRP-Epóxi e FRP<br>FRP-Epóxi e FRP<br>FRP-Epóxi + Adesivo | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo baseado na lei de deslizamento do CEB-FIP 90 para concreto e aço, apresentou com base nos experimentos os valores médios para <math>\tau_m</math>, <math>\tau_f</math>, <math>s_1</math>, <math>s_2</math>, <math>s_3</math>;</li> <li>- A força de arrancamento aumenta com <math>L_b</math>;</li> <li>- Adesivos rígidos têm maiores forças de arrancamento e os adesivos flexíveis são mais dúcteis;</li> <li>- A distribuição de tensão ao longo do comprimento colado para adesivos rígidos são claramente não uniformes, enquanto os adesivos flexíveis são uniformes</li> </ul> |
| 1. Sena Cruz e Barros (2004); 2. Sena Cruz et al. (2006); 3. Zhang et al. (2013); 4. Cruz et al. (2020); 5. Wang e Cheng (2021) |                         |                                                   |                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Fonte: O autor (2021)

Dentre os modelos apresentados, apenas o modelo de deslizamento de Zhang et al. (2013) apresenta expressões que dependem da resistência do concreto ( $f_c$ ) e dimensões da ranhura para inserir o laminado ( $a_g$  e  $b_g$ ). Os demais modelos precisam do conhecimento de parâmetros de entrada como tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e deslizamento ( $s$ ), que são variáveis identificadas experimentalmente e, para tanto, os autores sugerem valores médios conforme cada programa experimental desenvolvido. Os valores médios recomendados pelos autores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios para os parâmetros de entrada de cada modelo

| Variável          | Un.   | Sena Cruz e Barros (2004) | Sena Cruz et al. (2006) | Wang e Cheng (2020) | Cruz et al. (2020) |
|-------------------|-------|---------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| $\tau_m$          | (MPa) | 19,81 (6,6%)              | 15,8 (10,1%)            | 10,97 (4,68%)       | 18,25 (15,8%)      |
| $\tau_f$          | (MPa) | -                         | -                       | -                   | 7,54 (10,3%)       |
| $s_m$             | (mm)  | 0,25 (36,19%)             | 0,39 (29,5%)            | 0,07 (28,39%)       | -                  |
| $s_1$             | (mm)  | -                         | 1,9 (6,0%)              | -                   | 0,31 (28,1%)       |
| $s_2$             | (mm)  | -                         | -                       | -                   | 0,36 (19,7%)       |
| $s_3$ (ou $s_f$ ) | (mm)  | -                         | -                       | 0,20 (7,39%)        | 0,96 (4,2%)        |
| $\alpha$          | -     | 0,21 (29,05%)             | 0,45 (11,1%)            | -                   | 0,36 (31,3%)       |
| $\alpha'$         | -     | 0,32 (21,49%)             | 0,39 (8,3%)             | -                   | -                  |

**Nota:** Os valores entre parênteses são os coeficientes de variação

Fonte: O autor (2022)

Como é possível observar, há uma dispersão nos valores médios propostos pelos autores. O único modelo que adotou a falha no concreto ou interface de aderência concreto/adesivo foi Zhang et al. (2013), apresentando um modelo promissor por usar dados de entrada que independem de valores experimentais previamente conhecidos ou da adoção de valores médios sugeridos sob diferentes formas de ensaio, adesivo, resistência do concreto, e comprimento colado. O modelo de Zhang et al. (2013) também se mostrou válido na modelagem numérica desenvolvida por Haddad e Al-Rabadi (2020). Sendo, então, também adotado no estudo analítico desenvolvido neste trabalho.

### 2.2.3 Modelos de deslizamento após altas temperaturas

Resultados experimentais foram apresentados por Jadooe et al. (2017a, b) para validar uma análise numérica em 3D no *software* ATENA-GiD. Conseguiram prever com razoável precisão a força de arrancamento, o modo de falha das amostras e o padrão de fissuração. A relação tensão-deslizamento usada no modelo em elementos finitos foi determinada experimentalmente com base da deformação observada, e usando as equações (5, 6). A Figura

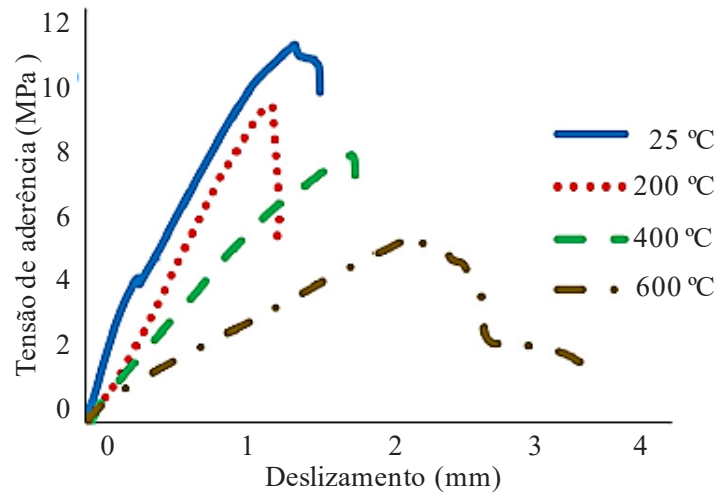
5 mostra as curvas para ligação NSM CFRP-Concreto após incêndio determinadas experimentalmente.

$$\tau = \frac{\Delta \varepsilon \cdot E_f \cdot A_f}{\Delta l \cdot P_f} \quad (5)$$

$$s_i = \frac{\Delta \varepsilon \cdot \Delta l}{2} + s_{i-1} \quad (6)$$

onde  $P_f$  é o perímetro do laminado;  $A_f$  é a área do FRP;  $E_f$  é o módulo de elasticidade do FRP;  $\Delta \varepsilon$  é a diferença no valor de deformação entre medidores de deformação adjacentes; e  $\Delta l$  é a distância entre os dois medidores de deformação.

Figura 5 – Relação aderência-deslizamento encontrada experimentalmente



Fonte: Adaptado de Jadooe et al. (2017b)

É possível observar que a tensão de pico e rigidez da ligação são reduzidos, além de maiores deslizamentos com o aumento da temperatura. No entanto, o estudo só conseguiu relacionar as curvas tensão-deslizamento para temperaturas de até 600 °C.

Obaidat et al. (2020) não formularam um modelo de deslizamento, mas apresentaram um estudo experimental sobre a ligação entre concreto normal e concreto com adição de agregado reciclado com NSM CFRP. Foram avaliados a resistência do concreto, a taxa de agregado reciclado, a temperatura de exposição, o comprimento colado, e o espaçamento entre laminados. Como conclusão, observaram que a força de aderência diminuiu com o aumento da temperatura, mas o deslizamento aumentou. A força de arrancamento foi reduzida de 14,5 e 32,5% para temperaturas de exposição de 400 e 600 °C, respectivamente. A deformação diminuiu com o aumento da temperatura e a falha ocorreu por separação do concreto quando utilizou dois e três laminados adjacentes, esse comportamento ficou mais evidente para maiores temperaturas.

Há, como apresentado, uma quantidade muito pequena de trabalhos estudando a ligação NSM CFRP-concreto após incêndio. Sendo, portanto, uma linha de pesquisa ainda a ser desenvolvida. Uma questão a ser considerada, é o tamanho das amostras para a análise da ligação, porque amostras com pequenas dimensões submetidas a temperaturas acima de 800 °C tendem a inviabilizar o uso do reforço devido ao nível de fissuração do concreto.

## 2.3 Reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado

O subcapítulo foi dividido em três abordagens: (1) trabalhos experimentais no reforço do cortante de vigas de concreto armado após incêndio, utilizando CFRP; (2) métodos analíticos para dimensionamento do cortante à temperatura ambiente usando laminados NSM CFRP; e (3) métodos analíticos para dimensionamento do cortante após incêndio usando laminados NSM CFRP.

### 2.3.1 Trabalhos experimentais sobre reforço após incêndio

São poucos os trabalhos sobre o uso de FRP no reforço de vigas em concreto armado após incêndio. O presente subtópico foi destinado a detalhar os experimentos sobre o reforço ao cisalhamento usando CFRP, e é detalhado nos próximos subitens.

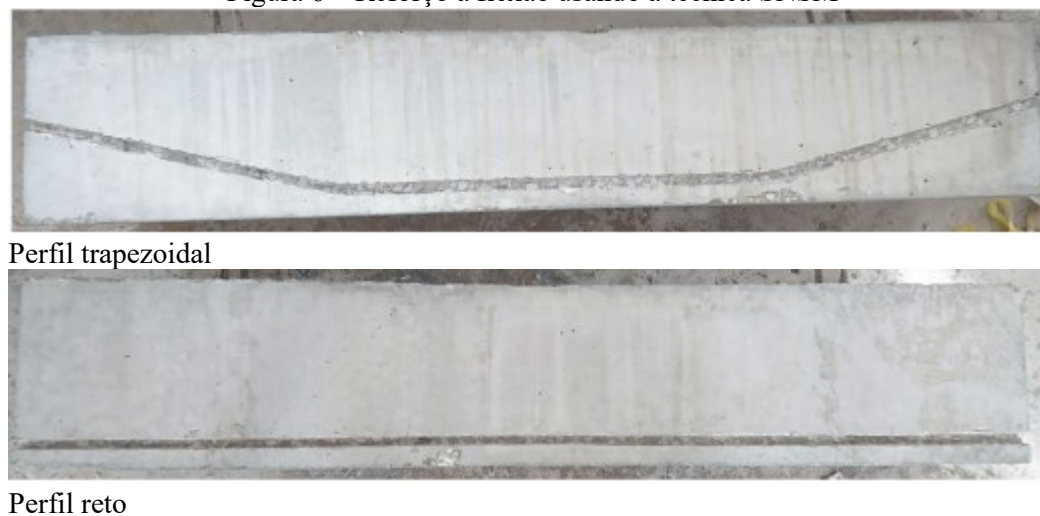
Além do reforço ao cisalhamento, alguns estudos sobre o reforço à flexão de vigas após incêndio usando laminados de CFRP e a técnica NSM foram realizados, saber: Al-Jadooe et al. (2017c; 2018a, b) e Al-Rjoub et al. (2021), onde os autores conseguiram observar que as vigas reforçadas após incêndio conseguiram recuperar sua resistência inicial para temperaturas de exposição de até 800 °C. Enquanto Haddad e Yaghmour (2020) realizaram o reforço à flexão, após incêndio, com laminados de CFRP usando a técnica SNSM (*side near-surface mounted*) com diferentes perfis de aplicação, ver Figura 6. Haddad e Harb (2021) desenvolveram uma série experimental com o mesmo sistema SNSM, mas utilizando barras circulares. Ambos os trabalhos submeteram as vigas a temperaturas até 500 °C, e então reforçaram.

Figura 6 – Reforço à flexão usando a técnica SNSM



Perfil parabólico

Figura 6 – Reforço à flexão usando a técnica SNSM



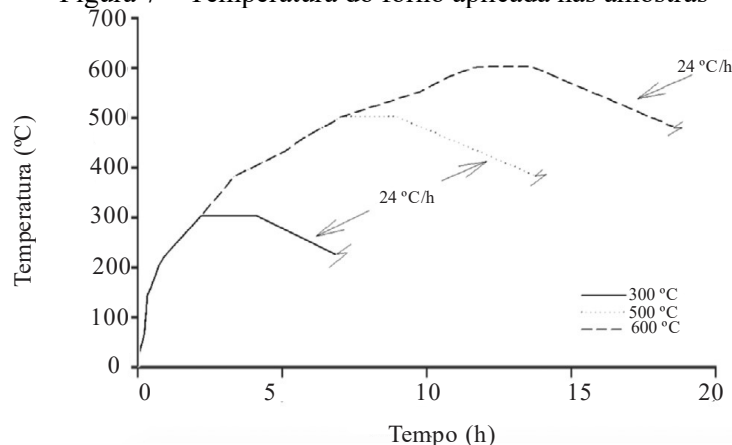
Fonte: Adaptado de Haddad e Yaghmour (2020)

Os programas experimentais de Haddad e Yaghmour (2020) e Haddad e Harb (2021) conseguiram recuperar a resistência inicial das vigas à condição inicial para temperaturas até 500 °C. Quanto ao modo de falha, algumas vigas passaram a falhar por cisalhamento e não mais por flexão. Ressaltando a importância do reforço ao cisalhamento após incêndio também.

#### 2.3.1.1 Haddad e Almasaeid (2016)

Os autores relatam os resultados de 22 vigas em concreto armado (150 mm × 250 mm × 1400 mm), sendo 4 vigas controle à temperatura ambiente e 18 vigas em situação de incêndio, analisadas em duplicata. Todas as vigas foram dimensionadas para romper ao cisalhamento e aquecidas sob diferentes temperaturas (300, 500 e 600 °C), e após atingir a temperatura de ensaio, foram mantidas durante 2 h, e depois resfriadas lentamente, antes de reforçar. A taxa de aquecimento não seguiu nenhuma curva de incêndio padrão e apresentou um aquecimento muito lento, ver Figura 7.

Figura 7 – Temperatura do forno aplicada nas amostras



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

As amostras variaram o espaçamento entre os laminados de CFRP aplicados a 100, 150 e 200 mm, sempre dispostos a 90° em relação ao eixo da viga e usando a técnica NSM. A distribuição das vigas pode ser observada na Tabela 6.

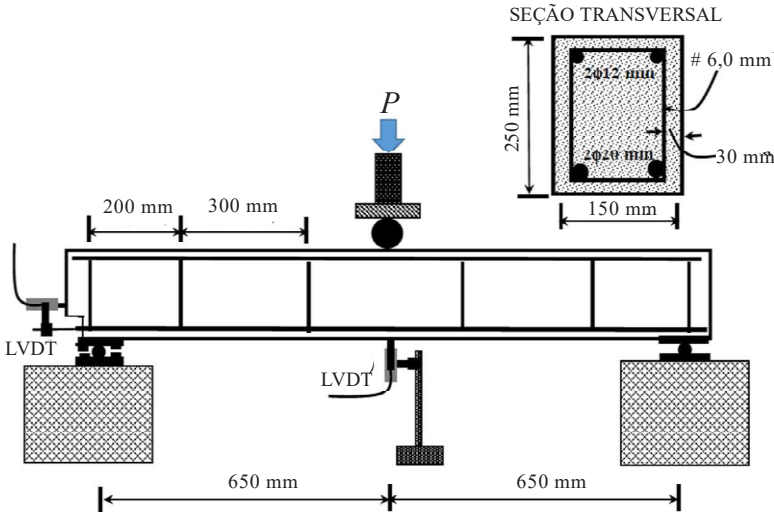
Tabela 6 – Distribuição das amostras ensaiadas

| Grupo | Amostras | Temperatura (°C) | Reforço NSM CFRP | Espaçamento (mm) |
|-------|----------|------------------|------------------|------------------|
| 1     | 2        | 23               | Não              | -                |
| 2     | 2        | 23               | Sim              | 200              |
| 3     | 2        | 300              | Não              | -                |
| 4     | 2        | 300              | Sim              | 200              |
| 5     | 2        | 500              | Não              | -                |
| 6     | 2        | 500              | Sim              | 100              |
| 7     | 2        | 500              | Sim              | 200              |
| 8     | 2        | 600              | Não              | -                |
| 9     | 2        | 600              | Sim              | 100              |
| 10    | 2        | 600              | Sim              | 150              |
| 11    | 2        | 600              | Sim              | 200              |

Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

Após aquecidas e resfriadas, as vigas foram reforçadas. Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos, conforme Figura 8.

Figura 8 – Detalhe do ensaio mecânico da viga



Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

Os resultados experimentais indicaram que a eficiência do reforço nas vigas em concreto armado danificadas pelo calor usando laminados NSM CFRP dependeu principalmente do nível de dano e do espaçamento entre os laminados. O uso do NSM CFRP permitiu restaurar a capacidade de carga das vigas danificadas a 300 e 500 °C, mas não para aquelas aquecidas a 600 °C. Este último alcançou uma recuperação da capacidade de carga máxima em cerca de 91% do valor de referência inicial.

A redução do espaçamento entre os laminados de CFRP contribuiu para aumentar a capacidade de carga ao cisalhamento das vigas reparadas, desde que a falha no cobrimento de concreto (*peeling-off*) ao longo da profundidade da viga fosse evitada. A rigidez à flexão não foi recuperada para vigas danificadas pelo calor e reforçadas, enquanto a ductilidade foi notavelmente melhorada.

Não foi aplicada carga durante a fase de aquecimento, nem analisada inclinação dos laminados, e a taxa de aquecimento lenta e prolongada podem ter influência relevante nos resultados, pois não representam uma condição de incêndio real onde existe um gradiente de temperatura ao longo da seção transversal do elemento.

#### 2.3.1.2 Al-Rousan (2021)

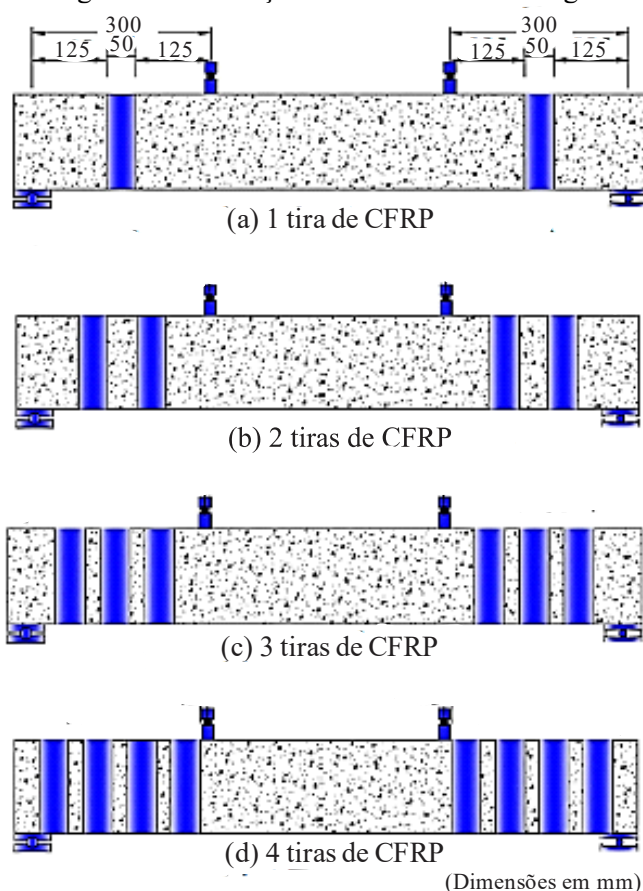
Apresentou um programa experimental de 25 vigas em concreto armado com seção transversal de 100 mm × 200 mm, aquecidas a temperaturas de 23, 150, 200, 250 e 500 °C, resfriadas, e então reforçadas externamente ao cisalhamento com mantas de CFRP de largura de 50 mm e espessura de 0,167 mm. As vigas foram ensaiadas até a falha no teste de flexão em quatro pontos. As vigas permaneceram aquecidas por 2 h ao atingir a temperatura desejada, não foi seguida nenhuma curva-padrão de incêndio, e apresentou uma baixa taxa de aquecimento onde atingiu os 500 °C depois de 3 h. Foi avaliada a influência de ranhuras no concreto na região de colagem das tiras para melhorar a aderência, ver Figura 9. A taxa de reforço foi variável com 1, 2, 3 e 4 tiras de CFRP, ver Figura 10.

Figura 9 – Ranhuras no concreto para aderência CFRP-concreto  
Ranhuras de 50 mm x 10 mm  
(largura x profundidade)  
Espaçamento a cada 50 mm



Fonte: Adaptado de Al-Rousan (2021)

Figura 10 – Reforço ao cisalhamento nas vigas



Fonte: Adaptado de Al-Rousan (2021)

Foi observado que as vigas perderam resistência após aquecimento, e que a ranhura aumentou a resistência do sistema à temperatura ambiente e após-incêndio. Uma maior taxa de reforço, através do aumento de laminados implicou em uma maior capacidade de carga. O reforço conseguiu aumentar a resistência das vigas após incêndio, mas não conseguiu recuperar a resistência inicial depois de aquecida a 500 °C.

### 2.3.2 Dimensionamento do reforço à temperatura ambiente

A dificuldade em dimensionar o reforço é destacada por Prado (2016) pela falta de uma norma brasileira específica para sistemas de reforço e nos poucos estudos no Brasil. Uma revisão sobre as formulações disponíveis na literatura internacional, então, foi imprescindível.

A Tabela 7 apresenta uma compilação dos trabalhos, em ordem cronológica, para dimensionamento de NSM CFRP no reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado, bem como, elenca as principais características que são contempladas nos modelos.

Tabela 7 – Formulações analíticas para a contribuição do NSM CFRP ao cortante

| <b>Autores</b>             | <b>Seção CFRP</b>   | <b>Modelo <math>\tau</math>-s</b>                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| De Lorenzis e Nanni (2001) | Barras circulares   | Baseado nos testes de De Lorenzis (2000), no qual obteve uma tensão de adesão média ( $\tau_b$ ) de 6,9 MPa                                                                                                                   |
| Nanni et al. (2004)        | Barras retangulares | Baseado nos testes de De Lorenzis (2000), no qual obteve uma tensão de adesão média ( $\tau_b$ ) de 6,9 MPa                                                                                                                   |
| Parretti e Nanni (2004)    | Barras              | O uso de adesivo epóxi e a ranhura com $1,5 \cdot d_f$ recomenda de forma conservadora $\tau_b$ de 6,9 MPa. Quando o modo de falha não é conhecido, sugere-se $\tau_{\max}$ de 3,5 MPa. Onde $\tau_b = 0,5 \cdot \tau_{\max}$ |
| Dias e Barros (2004)       | Laminados           | $\tau_b$ de 16,1 MPa e $\varepsilon_{f\max}$ de 0,59% apresentaram resultados menos conservadores do que os valores propostos por De Lorenzis (2000)                                                                          |
| Dias (2008)                | Laminados           | Propõe uma expressão para deformação máxima efetiva no laminado de FRP ( $\varepsilon_{f\max}$ )                                                                                                                              |
| Islam (2009)               | Barras              | Função da tensão de tração do FRP ( $f_{rupt}$ )                                                                                                                                                                              |
| Bianco et al. (2014)       | Laminados           | Modelo proposto pelos autores, trecho rígido e linear decrescente. Após simplificação adotou-se $\tau_0 = 20,1$ MPa e $s_u = 7,12$ mm                                                                                         |
| Mofidi et al. (2018)       | Laminados e barras  | Baseado no modelo de Seracino et al. (2007)                                                                                                                                                                                   |
| Shomali et al. (2020)      | Laminados           | Usou o modelo de Lu et al. (2005) para análise numérica e propôs uma expressão para deformação efetiva máxima no FRP.                                                                                                         |
| Bui e Stitmannathum (2020) | Laminados e Barras  | Propuseram um modelo de deslizamento usando regressão a partir de dados experimentais                                                                                                                                         |

Fonte: O autor (2022)

Há, como observado, uma variedade de abordagens diferentes no que diz respeito ao modelo de deslizamento. Existindo outras variáveis ainda sem consenso, como a influência dos estribos no desempenho do reforço utilizado para resistir ao cisalhamento das vigas de concreto armado, onde Dias (2008) e Shomali et al. (2020) consideram a influência da presença de estribos, enquanto Mofidi et al. (2015, 2018) desconsideram.

O desempenho dos modelos tem sido analisado por estudos comparativos, a citar: Mofidi et al. (2015) que confrontaram sua formulação com alguns modelos analíticos propostos até a época. Mais recentemente, Mofidi et al. (2018) apresentaram uma modificação na sua proposta e tornou a comparar o desempenho com os mesmos modelos analíticos e dados experimentais. A Tabela 8 compila a precisão através de uma regressão linear, e apresenta o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado pelos autores comparando os modelos teóricos e experimentais que falharam ao cisalhamento: devido à descolagem do NSM FRP ou destacamento da cobertura de concreto.

Tabela 8 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre modelos

| Modelo Analítico           | $R^2$  |           |
|----------------------------|--------|-----------|
|                            | Barras | Laminados |
| De Lorenzis e Nanni (2001) | 0,34   | -         |
| Parretti e Nanni (2004)*   | -      | 0,15      |
| Islam (2009)               | -      | <0,10     |
| Dias e Barros (2013)**     | -      | 0,44      |
| Mofidi et al. (2015)       | 0,53   | 0,58      |
| Mofidi et al. (2018)       | 0,65   | 0,67      |

\* Adaptado de De Lorenzis e Nanni (2001) para laminados, originalmente calibrado para barras.  
 \*\* Modelo de Dias (2008). Se os resultados experimentais dos autores são retirados, o coeficiente  $R^2$  cai para <0,1.

Fonte: O autor (2022)

Apesar de ( $R^2$ ) não ser um parâmetro eficiente para avaliação dos modelos, é trivial perceber que os modelos ainda apresentam uma baixa eficiência. Um outro parâmetro analisado foi a relação média ( $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ ) entre a parcela resistente do cisalhamento relativo ao reforço, calculados analítica ( $V_f^{ana}$ ) e experimentalmente ( $V_f^{exp}$ ). A Tabela 9 resume os resultados médios encontrados no trabalho desenvolvido por Bianco et al. (2014), Mofidi et al. (2015, 2018), e Bui e Stitmannathum (2020).

Tabela 9 – Relações médias  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ 

| Modelo analítico           | $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ |
|----------------------------|-----------------------|
| De Lorenzis e Nanni (2001) | 0,90                  |
| Islam (2009)               | 1,91                  |
| Bianco et al. (2009)*      | 0,98                  |
| Bianco et al. (2010)*      | 0,67                  |
| Dias e Barros (2013)       | 1,17                  |
| Bianco et al. (2014)       | 0,69                  |
| Mofidi et al. (2015)       | 0,89                  |
| Mofidi et al. (2018)       | 0,80                  |
| Bui e Stitmannathum (2020) | 1,10                  |

\* Resultados apresentados em Bianco et al. (2014)

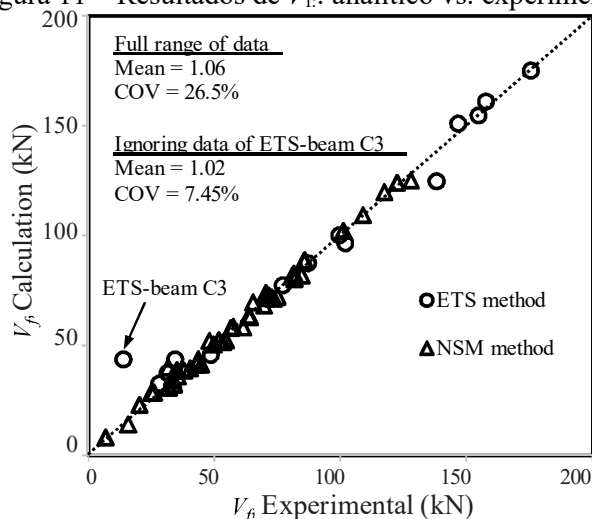
Fonte: O autor (2022)

Destaca-se que o modelo apresentado por Bianco et al. (2009) é complicado de ser implementado e tem um alto custo computacional, não à toa, os autores introduziram simplificações nos anos seguintes chegando ao modelo analítico simplificado de 2014, com correlação razoável e de aplicação facilitada.

Bui e Stitmannathum (2020) apresentaram um modelo baseado na lei de deslizamento FRP-adesivo-concreto e prescreveram uma formulação dependente de parâmetros experimentais como deformação e deslizamento. As expressões propostas utilizando o modelo

de deslizamento apresentaram uma ótima correlação como pode ser visto na Figura 11. O estudo foi conduzido utilizando a técnica de reforço ETS (*Embedded Thought-Section*), mas também adaptada e validada para a técnica NSM na comparação com os resultados experimentais de Dias e Barros (2013).

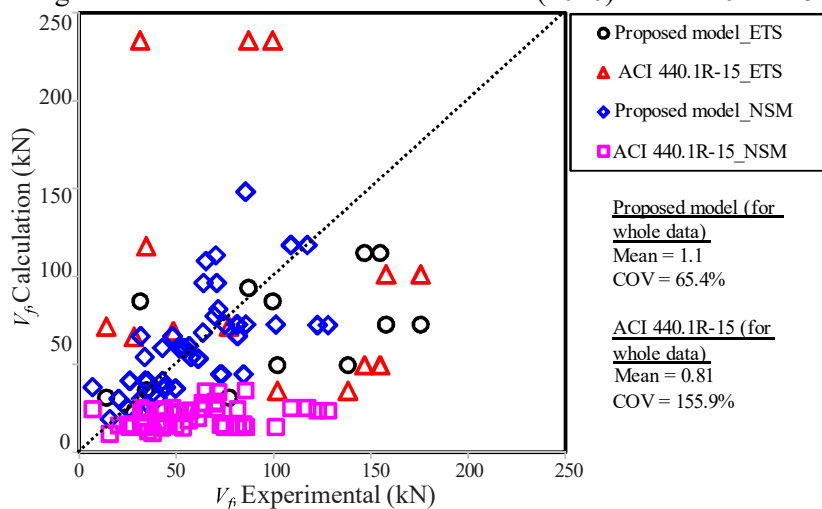
Figura 11 – Resultados de  $V_f$ : analítico vs. experimental



Fonte: Bui e Stitmannathum (2020)

O desempenho do modelo, no entanto, fica prejudicado quando não se tem conhecimento dos dados experimentais. Neste caso, os autores sugerem utilizar formulações disponíveis na literatura ou códigos para determinar as variáveis de entrada  $\tau_m$ ,  $s_m$  e  $s_f$  relativas ao comportamento de colagem do laminado, e utilizaram no trabalho uma expressão do ACI 440.1R-15 para a tensão média de aderência e valores sugeridos por Harajli e Abouniaj (2010) para os deslizamentos. A Figura 12 apresenta os resultados do modelo proposto utilizando as expressões disponíveis no código e autores supracitados.

Figura 12 – Modelo Bui e Stitmannathum (2020) e ACI440.1R-15



Fonte: Bui e Stitmannathum (2020)

Os resultados da proposta analítica, sem dados de entrada experimentais, apresentaram alta dispersão com coeficiente de variação de 65,4%. Portanto, apesar do modelo apresentar boa correlação quando utiliza os dados experimentais conhecidos, sua eficiência é perdida quando não se tem essas informações, gerando insegurança na utilização por projetistas.

Como é possível observar, todos os modelos ainda divergem entre si e dos resultados experimentais, apresentando alta dispersão. Uma descrição dos modelos é importante para fundamentar sobre as principais variáveis e hipóteses das formulações propostas pelos autores elencados. Uma breve abordagem, então, é detalhada na sequência apenas para os modelos referentes ao uso de laminados de CFRP e a técnica NSM. As formulações estão apresentadas de acordo com o Sistema Internacional de unidades.

### 2.3.2.1 *Islam (2009)*

O modelo foi conduzido com a suposição de que nenhum descolamento ou nenhuma fratura das barras de FRP ocorre antes da falha, e a técnica de NSM FRP funciona de maneira semelhante aos estribos. As contribuições do concreto e dos estribos na resistência ao cisalhamento foram adotadas conforme o ACI 318 (2005). A Equação 7 propõe um fator de 1/3 para reduzir a contribuição de cisalhamento total das barras NSM FRP, que foi definido de acordo com a tensão de tração última do FRP ( $f_{fu}$ ) encontrado em seu experimento.

$$V_f = \frac{1}{3} \cdot \frac{A_{fv} \cdot f_{fu} \cdot d}{s_{fv}} \quad (7)$$

Uma limitação da formulação proposta é a quantidade de amostras para a qual foi validada, apenas quatro vigas formaram o programa experimental. O desempenho da equação foi avaliado por Mofidi et al. (2018) comparando o resultado analítico com os experimentos de Dias e Barros (2013), mostrando-se pouco efetivo com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) <0,1.

### 2.3.2.2 *Dias e Barros (2013)*

Desenvolveram um extenso estudo experimental avaliando vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com a técnica NSM, os parâmetros analisados foram: espaçamento e orientação dos laminados de CFRP, espaçamento entre estribos, resistência do concreto, relação entre vão de cisalhamento e altura útil da viga ( $a/d$ ).

A partir do programa experimental, foi proposta uma formulação analítica baseada no cálculo da deformação efetiva do laminado ( $\varepsilon_{fe}$ ). A resistência ao cisalhamento nominal ( $V_n$ ) da

viga reforçada (a soma das parcelas referentes ao concreto, aço e fibra de carbono) é representada pela Equação 8. A Figura 13 identifica as variáveis geométricas das vigas com seção T analisadas pelos autores.

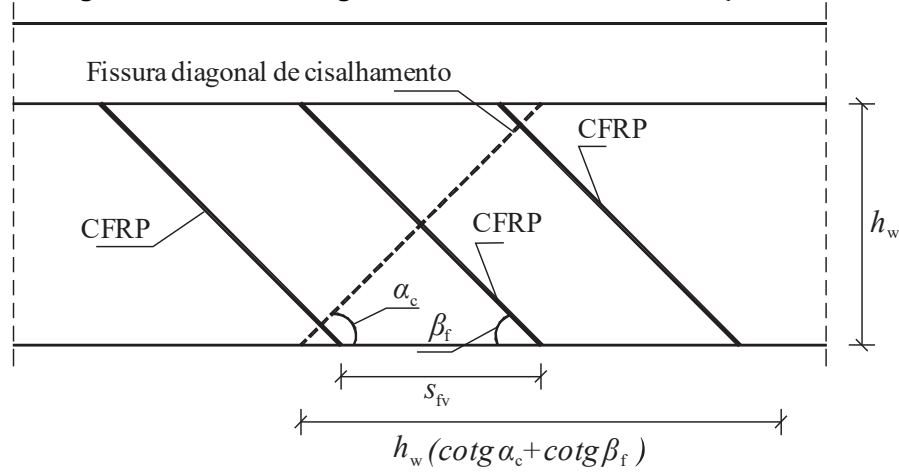
$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (8)$$

$$V_f = \frac{N_f \cdot A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot \sin(\alpha_c)}{\gamma_{fB}} \quad (9)$$

$$N_f = \frac{h_w \cdot (\cot\beta_f + \cot\alpha_c)}{s_{fv}} \quad (10)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (11)$$

Figura 13 – Parâmetros geométricos relativos à contribuição do CFRP



Fonte: Adaptado de Dias e Barros (2013)

Analisando os resultados experimentais, os autores identificaram que há uma mobilização diferente na parcela referente ao aço do estribo, ou seja, na maioria das vigas sem CFRP o estribo é mais solicitado do que nas vigas reforçadas com CFRP. Neste sentido, foi admitida uma redução da tensão de escoamento em função da quantidade de estribos atravessados pela fissura de cisalhamento na ruptura, no entanto, não foi proposto nenhum critério para a ser contemplado no modelo analítico.

Os parâmetros que têm maior relevância na determinação da eficiência e resistência devido ao reforço de CFRP são: porcentagem e orientação dos laminados de CFRP, resistência do concreto, e a taxa de armadura transversal. No estudo conduzido para chegar à formulação, os autores correlacionaram a deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) com o parâmetro  $(E_f \cdot \rho_f + E_s \cdot \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$  e a inclinação do laminado, ver Equação 12.

$$\varepsilon_{fe} = 3,76888 \cdot e^{(-0,1160261 \cdot \alpha_c + 0,0010437 \cdot \alpha_c^2)} \cdot \left[ \frac{E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}}{(f_{cm}^{2/3})} \right]^{-0,460679 \cdot e^{(0,0351199 \cdot \alpha_c - 0,0003431 \cdot \alpha_c^2)}} \quad (12)$$

$$\rho_f = \frac{A_{fv}}{b_w \cdot s_{fv} \cdot \sin \alpha_c} = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_{fv} \cdot \sin \alpha_c} \quad (13)$$

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_{sw}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{sw}^2 / 4}{b_w \cdot s_{sw}} \quad (14)$$

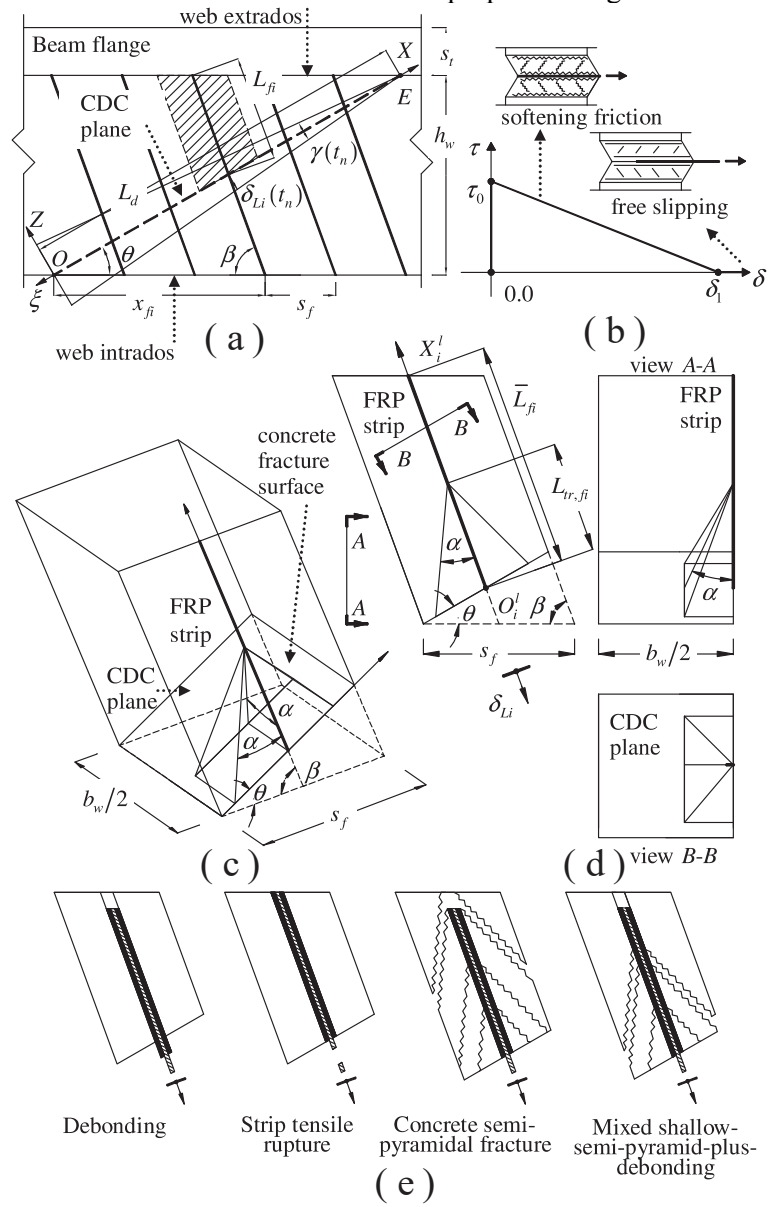
Os resultados analíticos foram validados com os experimentais dos autores através da relação  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ . Foi proposto um fator  $\gamma_{IB}$  igual a 1,3 como critério para que 95% das vigas analisadas o valor analítico seja igual ou inferior ao experimental.

### 2.3.2.3 Bianco et al. (2014)

Introduziram simplificações a um modelo mecânico mais complexo de Bianco et al. (2010). O objetivo foi tornar a formulação aplicável a um algoritmo que tornasse a determinação da contribuição ao cisalhamento do laminado de CFRP mais simples.

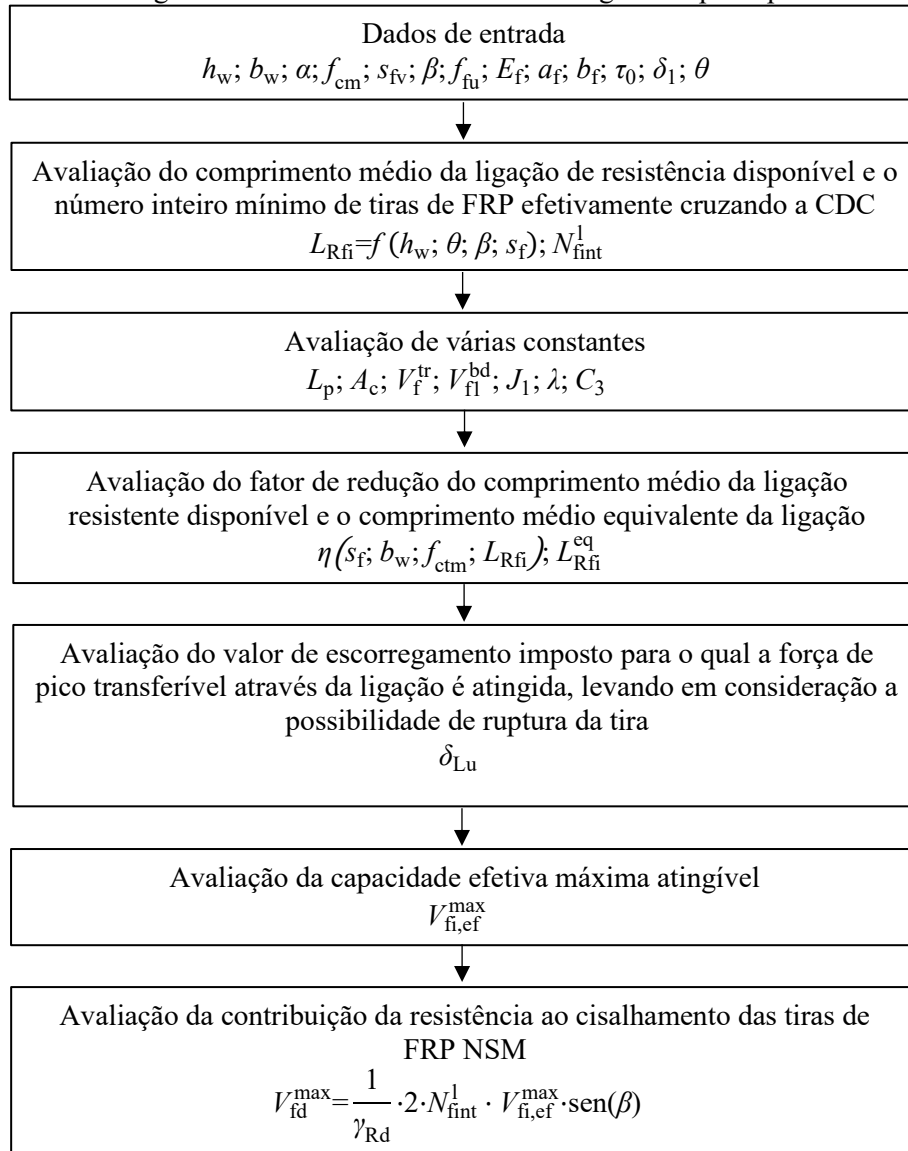
O desenvolvimento da formulação e critérios adotados podem ser encontrados em Bianco et al. (2014). A formulação apresentada neste documento é sucinta e contempla apenas as informações pertinentes para aplicação das expressões. A Figura 14 apresenta as principais características físico-mecânicas do modelo teórico e a identificação dos parâmetros. A implementação do procedimento de cálculo proposto compreende as etapas da Figura 15, e são descritas em seguida.

Figura 14 – Características físico-mecânicas e propriedades geométricas do modelo



Fonte: Bianco et al. (2014)

Figura 15 – Procedimento de cálculo: algoritmo principal



Fonte: Adaptado de Bianco et al. (2014)

As etapas do processo de cálculo são descritas abaixo:

- a) Valor médio do comprimento da ligação de resistência disponível  $L_{Rfi}$  e número mínimo de tiras  $N_{fint}^l$  cruzando efetivamente o CDC (*Critical Diagonal Crack*):

$$L_{Rfi} = \frac{h_w \cdot \sin(\theta) \cdot (\cot(\theta) + \cot(\beta))}{4 \cdot \sin(\theta + \beta)} \quad (15)$$

$$N_{fint}^l = h_w \cdot \frac{\cot(\theta) + \cot(\beta)}{s_f} \quad (16)$$

- b) Avaliação de constantes

As constantes geométricas:

$$L_p = 2 \cdot b_f + a_f \quad \text{perímetro efetivo do laminado} \quad (17)$$

$$A_c = s_f \cdot \frac{b_w}{2} \quad \text{área da seção transversal do prisma do concreto circundante} \quad (18)$$

$$L_d = \frac{h_w}{\sin(\theta)} \quad \text{o comprimento do CDC} \quad (19)$$

As constantes mecânicas:

$$V_f^{tr} = a_f \cdot b_f \cdot f_{fu} \quad \text{resistência à tração do laminado} \quad (20)$$

$$f_{ctm} = 1,4 \cdot \left( (f_{cm} - 8) / 10 \right)^{2/3} \quad \text{resistência média à tração do concreto} \quad (21)$$

$$E_c = 2,15 \cdot 10000 \cdot (f_{cm} / 10)^{1/3} \quad \text{módulo de elasticidade do concreto} \quad (22)$$

onde:  $E_c$  e  $f_{ctm}$  são avaliados por meio das fórmulas presentes no CEB-FIP, com  $f_{cm}$  em MPa.

As constantes de modelagem da ligação:

$$J_1 = \frac{L_p}{A_f} \cdot \left( \frac{1}{E_f} + \frac{A_f}{A_c \cdot E_c} \right) \quad (23)$$

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{\delta_1}{\tau_0 \cdot J_1} \quad (24)$$

$$C_3 = \frac{V_f^{tr} \cdot J_1}{L_p \cdot \lambda} \quad (25)$$

O comprimento efetivo da ligação de resistência e a força de ligação máxima correspondente, são:

$$L_{Rfe} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \quad (26)$$

$$V_{fl}^{bd} = \frac{L_p \cdot \lambda \cdot \delta_1}{J_1} \quad (27)$$

c) Fator de redução  $\eta$  e valor equivalente do comprimento médio da ligação resistente  $L_{Rfi}^{eq}$

$$\eta = \begin{cases} f_{ctm} / f_{ctm}^*, & \text{para } f_{ctm} < f_{ctm}^* \\ 1, & \text{para } f_{ctm} \geq f_{ctm}^* \end{cases} \quad (28)$$

$$f_{ctm}^* = \frac{L_p \cdot \lambda \cdot \delta_1 \cdot \sin(\lambda \cdot L_{Rfi})}{J_1 \cdot \min \left( L_{Rfi} \cdot \tan(\alpha); \frac{b_w}{2} \right) \cdot \min(s_f \cdot \sin(\beta); 2 \cdot L_{Rfi} \cdot \tan(\alpha))} \quad (29)$$

onde  $L_{Rfi}$  é definido igual a:

$$L_{Rfi} = \begin{cases} L_{Rfi} & \text{se } L_{Rfi} \leq L_{Rfe} \\ L_{Rfe} & \text{se } L_{Rfi} > L_{Rfe} \end{cases} \quad (30)$$

O valor de  $f_{ctm}^*$  é aquele que corresponde, nas hipóteses simplificadoras, à condição limite de ocorrência de fratura do concreto. O valor equivalente do comprimento médio da ligação de resistência é dado por:

$$L_{Rfi}^{eq} = L_{Rfi} \cdot \eta \quad (31)$$

d) Valor do deslizamento final imposto  $\delta_{Lu}$  em correspondência com  $V_{fi}$  e  $L_{Rfi}^{eq}$

$$\delta_{Lu} = \begin{cases} \delta_{L1}(L_{Rfi}^{eq}), & V_{fi}^{bd} < V_f^{tr} \\ \min[\delta_{L1}(L_{Rfi}^{eq}); \delta_{L1}(V_f^{tr})], & V_{fi}^{bd} > V_f^{tr} \end{cases} \quad (32)$$

$$\delta_{L1}(L_{Rfi}^{eq}) = \begin{cases} \delta_1 \cdot (1 - \cos(\lambda \cdot L_{Rfi}^{eq})), & L_{Rfi}^{eq} \leq L_{Rfe} \\ \delta_1, & L_{Rfi}^{eq} > L_{Rfe} \end{cases} \quad (33)$$

$$\delta_{L1}(V_f^{tr}) = \delta_1 \cdot \left\{ 1 - \cos\left(-\arcsen\left(\frac{C_3}{\delta_1}\right)\right) \right\} \quad (34)$$

e) Capacidade máxima efetiva do laminado  $V_{fi,eff}^{max}$  com comprimento equivalente

Desprezando o comportamento pós-pico da lei de deslizamento, tem-se:

$$V_{fi,eff}^{max} = \frac{\delta_1 \cdot A_2}{2 \cdot L_d \cdot A_3 \cdot \gamma_{max}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsen \psi - \psi \cdot \sqrt{1 - \psi^2} \right] \quad (35)$$

onde:

$$A_2 = \frac{L_p \cdot \lambda}{J_1} \quad (36)$$

$$A_3 = \frac{\sen(\theta + \beta)}{2 \cdot \delta_1} \quad (37)$$

$$\gamma_{max} = \frac{2 \cdot \delta_{Lu}}{L_d \cdot \sen(\theta + \beta)} \quad (38)$$

$$\psi = 1 - A_3 \cdot \gamma_{max} \cdot L_d \quad (39)$$

f) Contribuição da resistência ao cisalhamento fornecida por um sistema de laminados NSM FRP

$$V_f = 2 \cdot N_{f,int}^l \cdot V_{fi,eff}^{max} \cdot \sen \beta \quad (40)$$

$$V_{fd} = \frac{V_f}{\gamma_{Rd}} \quad (41)$$

onde:  $\gamma_{Rd}$  é o fator de segurança parcial que pode ser assumido entre 1,1 – 1,2 de acordo com o nível de incerteza que afeta os parâmetros de entrada.

Foi identificado que os parâmetros de entrada que afetam principalmente a contribuição da resistência ao cisalhamento do NSM são, em ordem decrescente de importância:  $h_w$ ,  $\alpha$ ,  $f_{cm}$  e o ângulo de inclinação da fissura ( $\theta$ ).

#### 2.3.2.4 Mofidi et al. (2018)

Um novo método de predição foi proposto pelos autores para considerar a falha por descolamento. O modelo é uma modificação do proposto por Mofidi et al. (2015) em termos de facilidade de uso, de precisão dos resultados, e da quantidade de laminados NSM FRP ( $N_f$ ) que efetivamente contribuem para a resistência ao cisalhamento na ruptura final por descolamento.

Os principais parâmetros relacionados à aderência são examinados, incluindo o comprimento colado efetivo do FRP, aderência com o concreto, e a força de descolagem do cobrimento do concreto com o FRP. A força de cisalhamento resistida pelo NSM FRP pode ser calculada como a soma das forças resistidas pelos laminados e barras NSM FRP interseccionados pela principal fissura de cisalhamento, Equação 42:

$$V_f = 2 \cdot N_f \cdot A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{ef} \quad (42)$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{0,40 \cdot \varphi_{gm}^{0,25} \cdot f_c^{0,33} \cdot \sqrt{L_{per}}}{\sqrt{E_f \cdot A_f}} \quad (43)$$

$$L_{per} = 2 \cdot b_f + a_f \quad (44)$$

$$\varphi_{gm} = (b_f + 1) / (a_f + 2) \quad (45)$$

A deformação efetiva no FRP ( $\varepsilon_{ef}$ ) é oriunda da proposta de Seracino et al. (2007), em que a força de tração do NSM FRP é uma função linear do menor comprimento da ligação de laminados ou barras, onde o comprimento efetivo da ligação representa o limite superior do comprimento da ligação do FRP.

Considerando a disponibilidade física do comprimento de ancoragem efetivo, é importante saber o número de laminados e barras NSM FRP que contribuem efetivamente para a resistência ao cisalhamento na ruptura final a seguir:

$$N_f = \begin{cases} 1 + \frac{d_v - (L_{ef} / \sin \beta_f)}{s_{fv}}, & \frac{d_v}{2 \cdot \sin \beta_f} \geq L_{ef} \\ \frac{d_v / \sin \beta_f - k_p \cdot s_{fv}}{L_{ef}}, & \frac{d_v}{2 \cdot \sin \beta_f} < L_{ef} \end{cases} \quad (46)$$

$$L_{ef} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \quad (47)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{max} \cdot L_{per}}{\delta_{max} \cdot E_f \cdot A_f} \quad (48)$$

$$\tau_{max} = (0,802 + 0,078 \cdot \varphi_{gm}) f_c^{0,6} \quad (49)$$

$$\delta_{max} = \frac{0,976 \cdot \varphi_{gm}^{0,526}}{0,802 + 0,078 \cdot \varphi_{gm}} \quad (50)$$

$$d_v = 0,9 \cdot d \quad (51)$$

onde:  $k_p$  é um coeficiente empírico em relação ao espaçamento entre o NSM FRP com o maior comprimento de ancoragem em cada lado da fissura de cisalhamento principal, que é igual a 0,9 e 0,5 para laminados e barras NSM FRP, respectivamente.

#### 2.3.2.5 Shomali et al. (2020)

Conduziram um programa experimental e um estudo paramétrico através de um modelo numérico no *software* ABAQUS. Variaram espaçamento dos estribos (taxa de armadura transversal) e resistência do concreto, com objetivo de correlacionar a influência da armadura de estribos na deformação efetiva dos laminados.

Apresentaram uma proposta simples baseada nas expressões do ACI 440.2R (2017) para técnica EBR, sendo as parcelas do concreto e aço de acordo com a ACI 318 (2014). A parcela referente ao reforço NSM CFRP é dada pelas equações:

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta_f + \cos \beta_f) \cdot d_f}{s_{fv}} \quad (52)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (53)$$

$$A_{fv} = 2 \cdot a_f \cdot b_f \quad (54)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,3 \cdot \left( \frac{E_s \cdot \rho_s}{f_c^{2/3}} \right)^{-0,713} \quad (55)$$

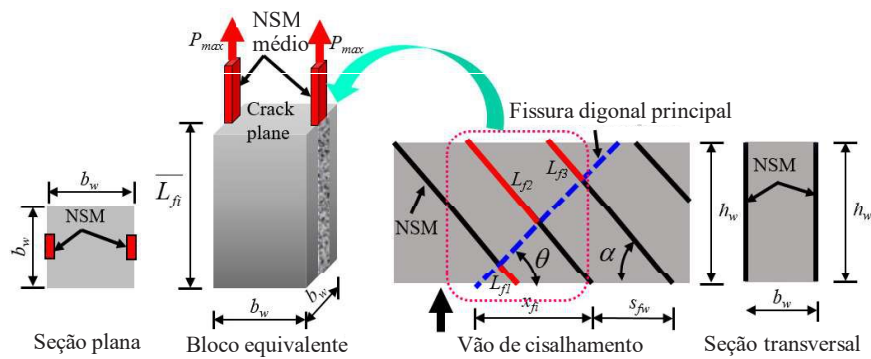
As constantes 0,3 e -0,713 são valores médios encontrados para curva de tendência em função do espaçamento dos estribos, o que pode gerar dispersão nos resultados. O modelo foi validado apenas para os experimentos realizados pelos autores, confrontando apenas com uma amostra.

### 2.3.2.6 Bui e Stitmannathum (2020)

A principal novidade do modelo proposto foi a formulação precisa e simplesmente aplicável com base em uma interpretação cuidadosa do mecanismo de ligação entre o sistema de reforço NSM-FRP e o concreto nas vigas.

O modelo de ligação resulta em um bloco de concreto equivalente com comprimento e quantidade de laminados interceptados pela fissura diagonal de cortante, ver Figura 16.

Figura 16 – Bloco equivalente em função dos laminados interceptados



Fonte: Adaptado de Bui e Stitmannathum (2020)

O comportamento tensão-deslizamento da ligação é conhecido com base no modelo proposto pela Equação 52, consultar Bui et al. (2020) para mais detalhes. A Figura 17 apresenta a curva descrita pela expressão.

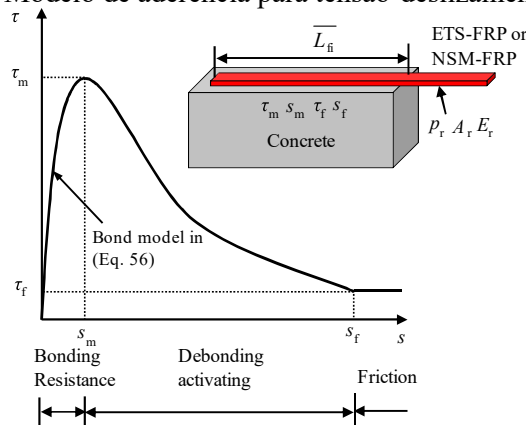
$$\tau = \frac{E_f A_f}{p_f} \cdot A_b^2 \cdot B_b \cdot e^{-B_b \cdot s} \cdot (1 - e^{-B_b \cdot s}) \quad (56)$$

$$A_b = \frac{p_r \cdot \tau_m \cdot L_{fim}}{A_f \cdot E_f \cdot (1 - e^{-B_b \cdot s_f})} \quad (57)$$

$$B_b = \frac{\ln(2)}{s_m} \quad (58)$$

onde  $A_b$  e  $B_b$  são parâmetros do modelo para ajuste da curva.

Figura 17 – Modelo de aderência para tensão-deslizamento da ligação



Fonte: Bui e Stitmannathum (2020)

Conhecidos  $\tau_m$ ,  $s_m$  e  $s_f$  é possível dar continuidade com o cálculo do número de compósitos NSM ( $N_f$ ) que contribuem para a resistência ao cisalhamento definido pelo número de sistemas de reforço que cruzam o plano de fissura principal, conforme exibido pela equação:

$$N_f = \text{round off} \left[ h_w \cdot \frac{(\cot(\theta) + \cot(\alpha))}{s_{fv}} \right] \quad (59)$$

Em seguida, o comprimento de ligação ( $L_{fi}$ ) de um elemento de reforço influenciado em todo o sistema de reforço em uma viga de concreto armado é expresso pela equação:

$$L_{fi} = \begin{cases} i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \alpha)}, & \text{para } x_{fi} < \frac{h_w}{2} \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \\ L_f - i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \alpha)}, & \text{para } x_{fi} \geq \frac{h_w}{2} \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \end{cases} \quad (60)$$

O comprimento médio da ligação dos elementos de reforço ETS ou NSM influenciados na zona de cisalhamento de uma viga é calculado como:

$$L_{fim} = \frac{1}{N_f} \cdot \sum_{i=1}^{N_f} L_{fi} \quad (61)$$

A energia de fratura interfacial ( $G_f$ ) da ligação dos espécimes podem ser definidas pelas expressões em função dos parâmetros  $A_b$  e  $B_b$ :

$$G_f = \frac{E_f \cdot A_f}{p_r} \cdot A_b^2 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot e^{-2 \cdot s_f \cdot B_b} - e^{-s_f \cdot B_b} + \frac{1}{2} \right) \quad (62)$$

No método NSM, dois laminados de FRP (ou barras) são colocados em dois lados externos das seções das vigas, assim, a contribuição de cisalhamento do sistema de reforço NSM FRP nas vigas é escrita como segue:

$$V_f = 2 \cdot N_f \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \frac{p_r}{E_f \cdot A_f}} \quad (63)$$

### 2.3.3 Dimensionamento do reforço após altas temperaturas

As prescrições da literatura acerca do reforço ao cisalhamento com laminados NSM CFRP em vigas de concreto armado à temperatura ambiente são escassos e não estão consolidados a ponto de serem adotados por códigos normativos, como foi visto. Após um sinistro, como o incêndio, as contribuições na literatura são mais raras. O subtópico, então, apresenta os trabalhos relativos ao assunto encontrados na pesquisa técnica realizada a respeito.

### 2.3.3.1 Haddad e Almasaeid (2016)

Propuseram um fator de redução com base na formulação de Islam (2009). Segundo o modelo de Islam (2009), a deformação efetiva nos laminados NSM CFRP ( $\varepsilon_{ef}$ ), usada para reforçar vigas intactas, constitui cerca de 1/3 da deformação final ( $\varepsilon_{fu}$ ). Como o concreto das vigas foi submetido a altas temperaturas antes do reforço, esse fator foi substituído em proporção variável, designado como fator de eficiência ( $\beta_H$ ). Assim, a equação fica:

$$V_f = \beta_H \cdot \frac{A_{fv} \cdot f_{fu} \cdot d}{s_{fv}} \quad (64)$$

Considerando a contribuição do concreto e do aço, recomendado pela ACI 318 (2002), a capacidade nominal de cisalhamento das vigas é calculada de acordo com a equação abaixo.

$$V_n = \left( \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d + \frac{A_{sw} \cdot f_y \cdot d}{s_{sw}} + \beta_H \cdot \frac{A_{fv} \cdot f_{fu} \cdot d}{s_{fv}} \right) \quad (65)$$

Com base na capacidade nominal de cisalhamento ( $V_n$ ) medida para diferentes vigas e nas propriedades geométricas e mecânicas de seus componentes, o fator de eficiência ( $\beta_H$ ) foi determinado e os resultados estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Fator ( $\beta_H$ ) das vigas reforçadas ao cisalhamento após incêndio

| T<br>(°C) | $s_{fv}$<br>(mm) | $\beta_H$<br>(%) |
|-----------|------------------|------------------|
| 23        | 200              | 26               |
| 300       | 200              | 25               |
| 500       | 100              | 14               |
|           | 200              | 18               |
|           | 100              | 8                |
| 600       | 150              | 13               |
|           | 200              | 12               |

Fonte: Adaptado de Haddad e Almasaeid (2016)

A eficiência foi significativamente reduzida para as vigas pós-aquecidas a 500 e 600°C. Por exemplo, o fator de eficiência foi reduzido de 26% nas vigas intactas e reforçadas, para 12% nas vigas reforçadas após aquecidas a 600 °C. Os resultados indicam que, com menor espaçamento entre o NSM CFRP, a eficiência do reparo seria reduzida, já que a falha final tende a ser mais por *peeling-off* do que por cisalhamento.

Os resultados apresentados para o fator  $\beta_H$  foram condicionados aos resultados experimentais da capacidade nominal das vigas, e não estão correlacionados a uma expressão em função de espaçamento, inclinação, resistência do concreto, tensão de aderência, ou comprimento do laminado. Portanto, são limitados e ainda carecem de validação com outros experimentos e outras variáveis. Adicionalmente, o modelo analítico de Islam (2009) usado na

avaliação do fator de redução não se mostrou tão eficiente quanto outros modelos mais recentes, a citar Bianco et al. (2014), Mofidi et al. (2018) e Bui e Stitmannathum (2020). O que resulta numa limitação da proposta apresentada pelos autores.

#### 2.3.3.2 *Haddad e Obaidat (2018)*

Apresentaram um modelo numérico não linear e realizaram um estudo paramétrico para avaliar a influência das variáveis contempladas no programa experimental de Haddad e Almasaeid (2016).

O modelo conduziu a resultados bem próximos aos encontrados experimentalmente, mas não foi apresentada nenhuma formulação analítica derivada do estudo. Observou-se que as vigas expostas a temperaturas superiores a 300 °C e reforçadas com laminados NSM CFRP em valores de espaçamento relativamente baixos tendiam a falhar por *peeling-off*, reduzindo a eficiência do sistema.

No estudo realizado, foi possível destacar que é pertinente considerar a limitação no benefício do reforço ao cisalhamento em vigas severamente danificadas pelo aquecimento sob temperaturas superiores a 500 °C e depois reforçadas em valores de espaçamento abaixo de 100 mm.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Propriedades dos materiais

A Tabela 11 mostra a média das propriedades mecânicas do concreto, do graute e do aço, determinadas nos dias de início e final dos experimentos de flexão em 3 pontos das vigas. Já as propriedades do adesivo epóxi e CFRP laminados foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos materiais

| Propriedades mecânica          | Concreto | Aço   | Graute | Adesivo | CFRP |
|--------------------------------|----------|-------|--------|---------|------|
| Resistência à compressão (MPa) | 64,2     | -     | 38,1   | 70,0    | -    |
| Resistência à tração (MPa)     | 4,1      | -     | 6,9    | 24,0    | 3100 |
| Tensão de escoamento (MPa)     | -        | 563,0 | -      | -       | -    |
| Tensão última (MPa)            | -        | 732,8 | -      | -       | -    |
| Módulo de elasticidade (GPa)   | 36,5     | 205,0 | 26,0   | 9,6     | 165  |

Mais detalhes sobre os materiais e determinação das propriedades mecânicas são apresentadas a seguir.

##### 3.1.1 Concreto

O concreto utilizado foi usinado por empresa especializada e fornecido em caminhão betoneira, sendo a moldagem das vigas realizada com a mesma mistura. O traço em massa dos materiais é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Traço e materiais constituintes do concreto

| Material                              | Quantidade | Diâmetro       |
|---------------------------------------|------------|----------------|
| Cimento (kg/m <sup>3</sup> )          | 435        | -              |
| Areia média (kg/m <sup>3</sup> )      | 422        | 0,42 a 1,2 mm  |
| Areia industrial (kg/m <sup>3</sup> ) | 282        | 0,15 a 2,40 mm |
| Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )          | 262        | 4,75 a 9,5 mm  |
| Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )          | 787        | 9,5 a 25 mm    |
| Água (kg/m <sup>3</sup> )             | 195        | -              |
| Aditivo (ml/m <sup>3</sup> )          | 4133       | -              |

Fonte: O autor (2022)

A relação água-cimento (*ag/ci*) foi de 0,45, o cimento do tipo CP-V ARI RS (alta resistência inicial), e o aditivo superplastificante tipo Maximent PXT 76. As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir da média aritmética de dois corpos de prova (CP) cilíndricos 100 mm × 200 mm (diâmetro × altura) moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram determinadas as resistências à compressão (ABNT NBR 5739:2018), à

tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011), e o módulo de elasticidade do concreto (ABNT NBR 8522:2021).

A resistência à compressão do concreto foi determinada nas idades de 7 dias, 28 dias e 170 dias (início da série de ensaio à flexão das vigas) e aos 249 dias (término da série de ensaio à flexão das vigas). As resistências à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram determinados aos 170 e 249 dias. A Tabela 13 resume os resultados encontrados.

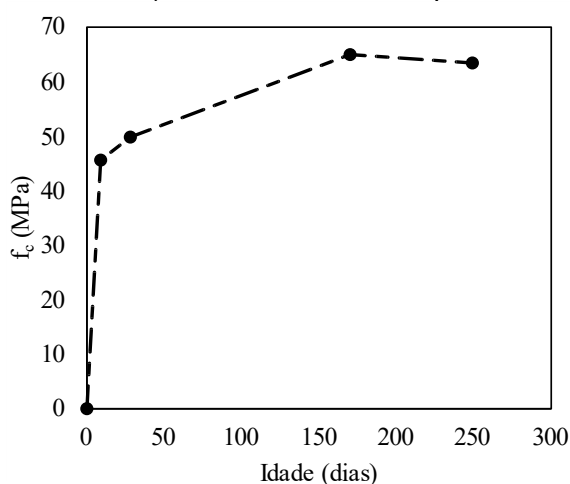
Foi notável o aumento da resistência nas primeiras idades devido ao uso do cimento ARI, e é razoável perceber que as propriedades do concreto convergiram para um valor constante entre as idades de 170 e 249 dias (ver Figura 18), apresentando boa reprodutividade com um coeficiente de variação (CV) baixo. A resistência média à compressão do concreto aos 28 dias foi de 48,85 MPa, e os valores médios das propriedades mecânicas do concreto no período de 170 a 249 dias, foram de 64,2 MPa (CV=1,5%), 4,1 MPa (CV=6,1%), e 36,5 MPa (CV=2,0%), para a resistência à compressão, à tração por compressão diametral, e o módulo de elasticidade, respectivamente.

Tabela 13 – Caracterização do concreto à temperatura ambiente

| <b>Id.</b> | <b>Classificação</b> | <b>Idade (dias)</b> | <b>Compressão (MPa)</b> | <b>Tração (MPa)</b> | <b>Módulo de elasticidade (GPa)</b> |
|------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| CP7-1      | Referência           | 7                   | 47,4                    | -                   | -                                   |
| CP7-2      | Referência           | 7                   | 43,8                    | -                   | -                                   |
| CP28-1     | Referência           | 28                  | 50,0                    | -                   | -                                   |
| CP28-2     | Referência           | 28                  | 49,7                    | -                   | -                                   |
| CP170 -1   | Início Ensaios       | 170                 | 65,4                    | 4,42                | 36,5                                |
| CP170-2    | Início Ensaios       | 170                 | 64,5                    | 4,16                | 37,2                                |
| CP249-1    | Final Ensaios        | 249                 | 63,4                    | 3,91                | 35,8                                |
| CP249-2    | Final Ensaios        | 249                 | 63,4                    | 3,88                | -                                   |

Fonte: O autor (2022)

Figura 18 – Evolução da resistência à compressão do concreto



Fonte: O autor (2022)

### 3.1.2 Barras de aço e laminado de CFRP

Os vergalhões de aço utilizados nas vigas de concreto armado foram da classe CA-50, conforme NBR 7480 (ABNT, 2008), e os diâmetros utilizados de 6,3, 10,0, 16,0 e 20,0 mm. O ensaio de tração nas barras foi de acordo com a NBR 6892-1 (ABNT, 2013), exceto o módulo de elasticidade com valor sugerido pelo fornecedor (Tabela 13).

Para o reforço ao cisalhamento foram utilizados laminados de CFRP e adesivo epóxi, fornecidos pela SIKA S.A. Os tipos de laminados e de adesivo epóxi foram Sika Carbodur® S512 e Sikadur® -30, respectivamente. Os laminados foram inseridos no concreto com dimensões de 10 mm × 1,2 mm. Para tanto, foram realizados cortes longitudinais na fibra fornecida que é fabricada com largura de 50 mm.

### 3.1.3 Graute

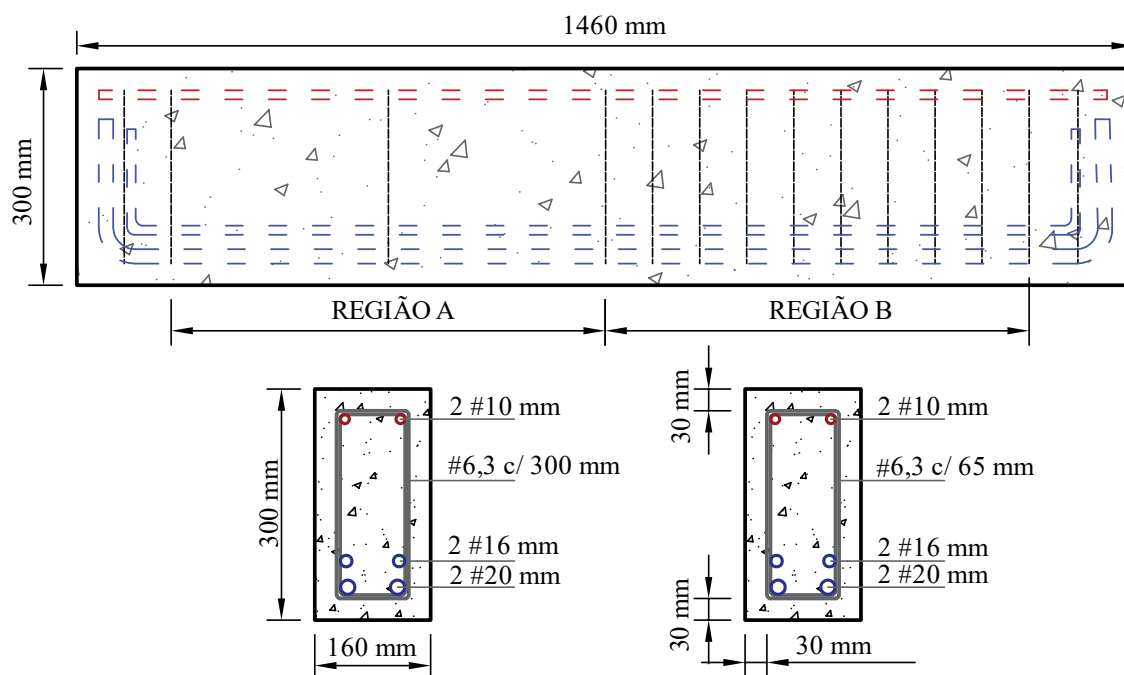
Foi utilizada uma argamassa tixotrópica (tipo graute) para reparo nas vigas de concreto devido a ocorrência de *spalling* durante a fase de aquecimento. A argamassa foi do tipo SIKAGROUT®, material monocomponente e pré-dosado. A proporção de água na mistura foi de 0,16 l/kg. As amostras para determinação da resistência à compressão e tração na flexão (NBR 13279:2005) tinham forma prismática com dimensões 40 mm × 40 mm × 100 mm. O módulo de elasticidade foi determinado a partir de amostra cilíndrica de 100 mm × 200 mm (diâmetro × altura).

## 3.2 Amostras

### 3.2.1 Detalhamento das vigas

Um total de 16 vigas em concreto armado foram moldadas simultaneamente. A seção transversal das amostras foi de 160 mm × 300 mm, comprimento de 1460 mm, e foram superdimensionadas à flexão para falhar por cisalhamento. A armadura longitudinal na região tracionada foi composta de 2  $\phi$ 20,0 mm (1ª camada) e 2  $\phi$ 16,0 mm (2ª camada), a armadura longitudinal na região comprimida foi de 2  $\phi$ 10,0 mm, a armadura transversal teve estribos de  $\phi$ 6,3 mm a cada 300 mm na Região A e  $\phi$ 6,3 mm a cada 65 mm na Região B, e o cobrimento das armaduras foi de 30 mm. O detalhamento das vigas foi o mesmo para todas amostras e condiciona a falha da viga em uma das extremidades (Região A), ver Figura 19.

Figura 19 – Detalhamento da armadura da viga de concreto



Fonte: O autor (2022)

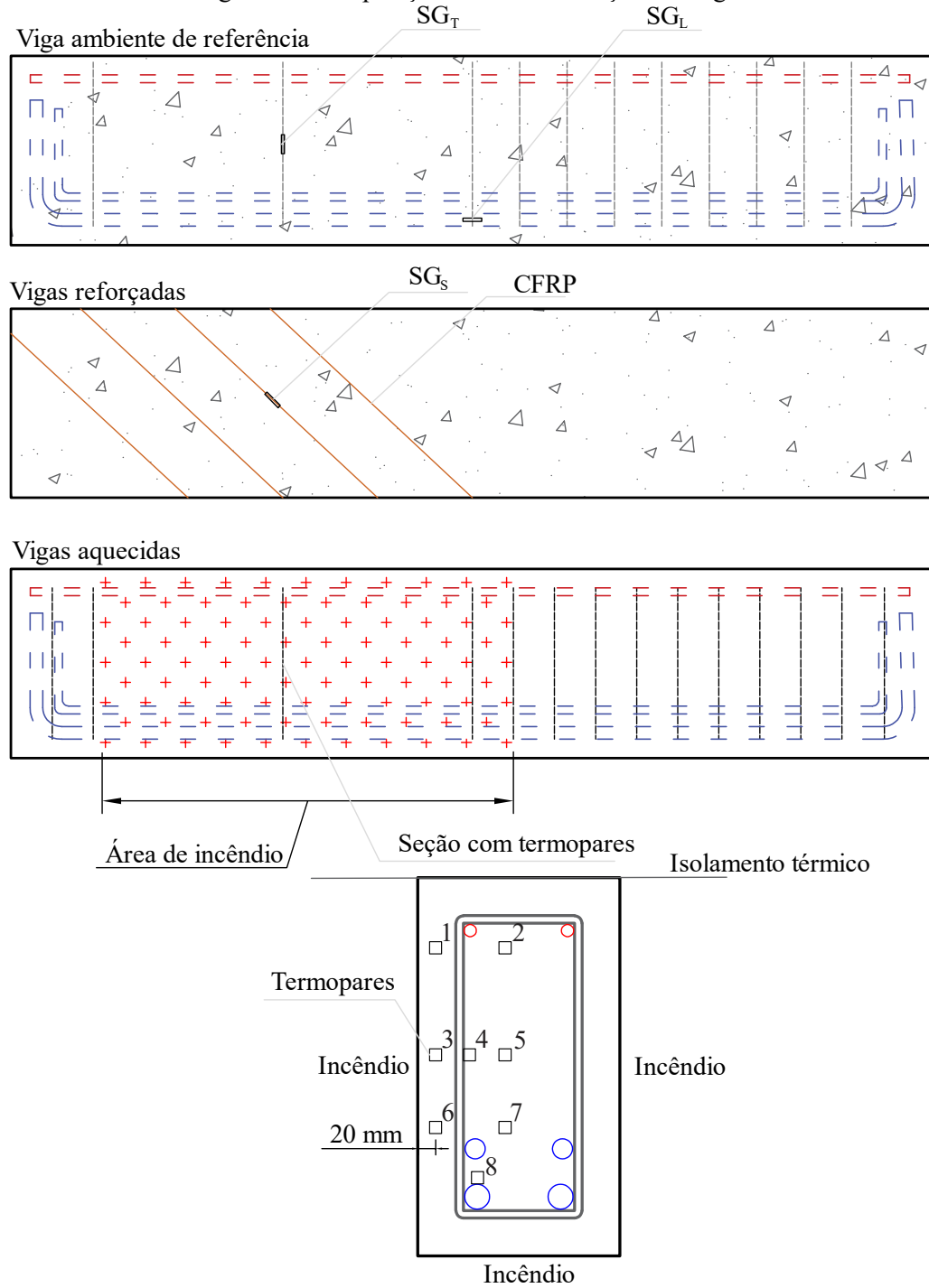
As vigas foram curadas por 28 dias, depois colocadas no ambiente do laboratório até o instante do aquecimento das amostras iniciado aos 130 dias após a moldagem.

A seção transversal das vigas com dimensões 160 mm × 300 mm atende ao requisito da EN 1992-1-2:2004 para o tempo de incêndio de 120 min, conforme recomendação do método tabular para vigas em situação de incêndio. A adoção das dimensões da seção foi um requisito para exposição das vigas até 120 min, visto que não foi aplicada carga durante a fase de aquecimento, e não seria prudente analisar o comportamento residual se a viga falhasse durante o incêndio.

### 3.2.2 Instrumentação

A Figura 20 resume os detalhes para as vigas de referência à temperatura ambiente que foram instrumentadas com dois *strain gages*, sendo um na barra de aço longitudinal (SG<sub>L</sub>) e um na barra transversal (SG<sub>T</sub>). As vigas reforçadas foram instrumentadas com um *strain gage* no laminado de CFRP (SG<sub>S</sub>) que coincide com a seção onde está presente o estribo na Região A. Duas vigas aquecidas a 120 min foram instrumentadas com oito fios termopares do tipo K para medir a temperatura ao longo da seção transversal de concreto e no aço. Um termopar foi utilizado para medir a temperatura do forno elétrico, que ficou distante 100 mm da face inferior da viga durante o aquecimento.

Figura 20 – Disposição da instrumentação nas vigas



Os pontos para medição da temperatura no aço são o 4 (estribo) e o 8 (barra longitudinal), os demais pontos estão distribuídos ao longo da seção transversal de concreto dispostos em duas colunas paralelas.

### 3.2.3 Plano experimental

A Tabela 14 resume as condições experimentais analisadas. A identificação das amostras segue o padrão: vigas de referência (RCB<sub>T-NS</sub>) e vigas reforçadas (RCBS<sub>T-SF</sub>), onde: RCB: *Reinforced Concrete Beam*; RCBS: *Reinforced Concrete Beam Strengthened*; T: *Fire Time*; NS: *No Strengthening*; SF: *Spacing between laminates*.

Tabela 14 – Identificação, características e condições experimentais das vigas

| ID<br>-                 | Tempo de incêndio<br>(min) | Reforço<br>- | $\rho_f$<br>(%) | Espaçamento<br>(mm) |
|-------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|---------------------|
| RCB <sub>0-NS</sub>     | Ambiente                   | Não          | -               | -                   |
| RCBS <sub>0-75</sub>    |                            | Sim          | 0,28%           | 75 mm               |
| RCBS <sub>0-150</sub>   |                            | Sim          | 0,14%           | 150 mm              |
| RCBS <sub>0-200</sub>   |                            | Sim          | 0,11%           | 200 mm              |
| RCB <sub>60-NS</sub>    | 60 min                     | Não          | -               | -                   |
| RCBS <sub>60-75</sub>   |                            | Sim          | 0,28%           | 75 mm               |
| RCBS <sub>60-150</sub>  |                            | Sim          | 0,14%           | 150 mm              |
| RCBS <sub>60-200</sub>  |                            | Sim          | 0,11%           | 200 mm              |
| RCB <sub>90-NS</sub>    | 90 min                     | Não          | -               | -                   |
| RCBS <sub>90-75</sub>   |                            | Sim          | 0,28%           | 75 mm               |
| RCBS <sub>90-150</sub>  |                            | Sim          | 0,14%           | 150 mm              |
| RCBS <sub>90-200</sub>  |                            | Sim          | 0,11%           | 200 mm              |
| RCB <sub>120-NS</sub>   | 120 min                    | Não          | -               | -                   |
| RCBS <sub>120-75</sub>  |                            | Sim          | 0,28%           | 75 mm               |
| RCBS <sub>120-150</sub> |                            | Sim          | 0,14%           | 150 mm              |
| RCBS <sub>120-200</sub> |                            | Sim          | 0,11%           | 200 mm              |

**Notas:**

Taxa de reforço:  $\rho_f = A_{fv} / (b_w \cdot s_{fv})$

$A_{fv}$ : área de laminados em ambos lados da viga;

$b_w$ : largura da viga;  $s_{fv}$ : espaçamento entre laminados

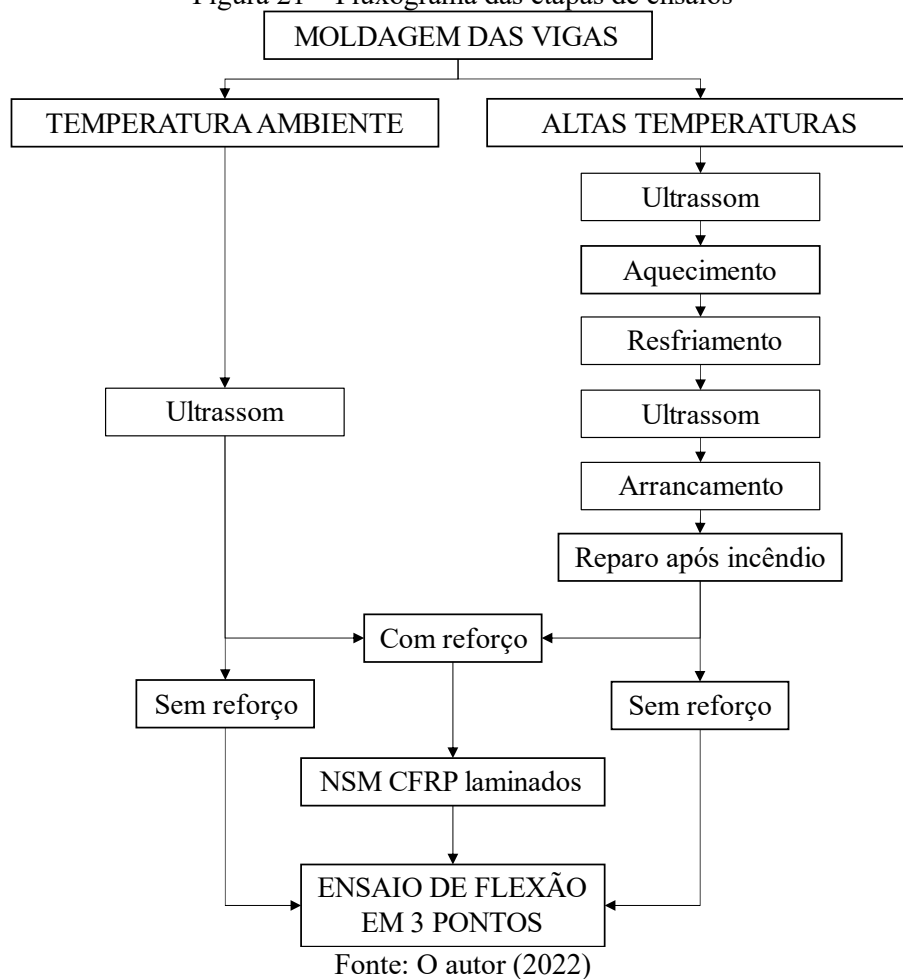
Fonte: O autor (2022)

A identificação da amostra RCB<sub>60-NS</sub> significa que a viga foi aquecida a 60 min de incêndio, e analisada à flexão sem reforço. A amostra RCBS<sub>0-150</sub> foi reforçada à temperatura ambiente (sem incêndio) com laminados a cada 150 mm, e analisada à flexão. O programa experimental conduzido conforme apresentado viabiliza analisar a capacidade de carga das vigas à temperatura ambiente e após incêndio, com e sem reforço.

### 3.3 Métodos de ensaios

A Figura 21 apresenta um fluxograma com o desenvolvimento do programa de ensaios.

Figura 21 – Fluxograma das etapas de ensaios



A série experimental seguiu as etapas apresentadas, e teve a seguinte ordem temporal para as vigas em incêndio: (1) Aquecimento; (2) Ensaios não destrutivos (ultrassom e arrancamento), após 3 dias do aquecimento; (3) Reparo com graute devido ao spalling, após 7 dias do aquecimento; (4) Reforço ao cisalhamento, após 14 dias do aquecimento; (5) Ensaio de flexão, após 21 dias do aquecimento.

Após o ensaio de ruptura das vigas no experimento de flexão em 3 pontos, foram extraídas amostras das barras de aço das vigas aquecidas para caracterização propriedades mecânicas residuais após incêndio, determinando as tensões de escoamento e de ruptura.

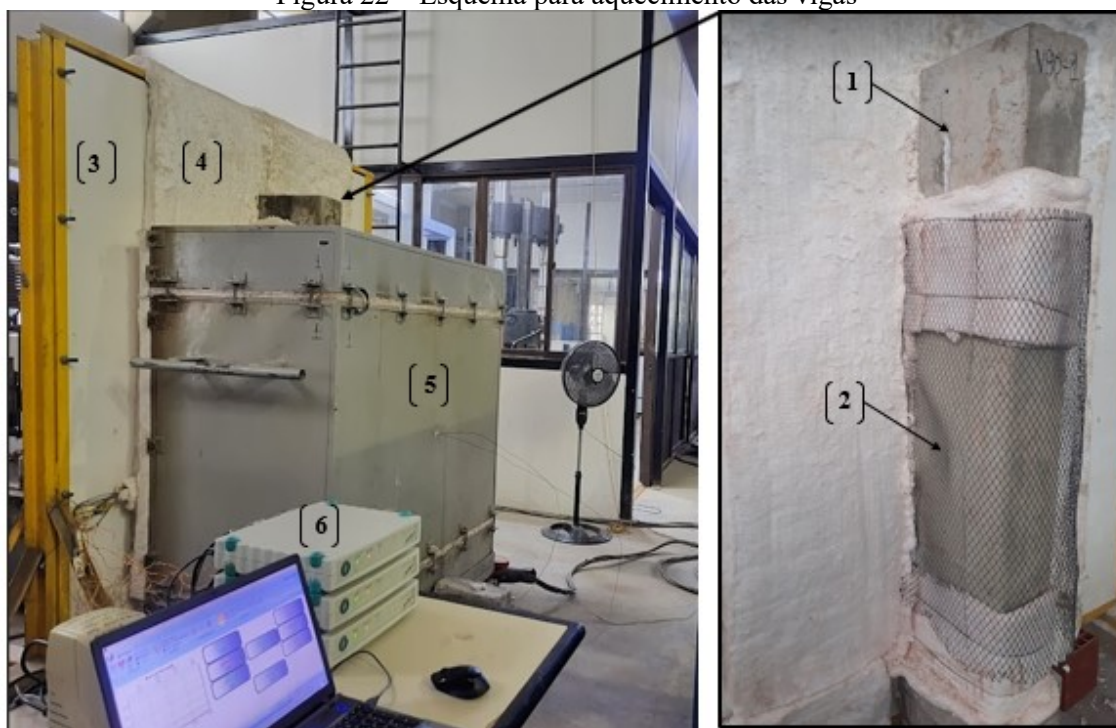
### 3.3.1 Aquecimento das vigas

O aquecimento das vigas simulando incêndio foi realizado em forno elétrico de módulo vertical com dimensões internas de 1000 mm × 1000 mm × 500 mm. A curva de incêndio padrão da ISO 834 (2014) foi usada, e as vigas foram submetidas aos tempos de exposição de 60, 90 e 120 min. As vigas foram aquecidas em três faces (Figura 20) na extremidade destinada

ao estudo da eficiência do reforço após incêndio (Região A), sem carregamento aplicado durante a fase de aquecimento.

A Figura 22 mostra o esquema de ensaio com a viga na vertical (1) a ser aquecida e protegida por tela metálica (2). Uma parede de gesso (3) com isolamento de manta cerâmica (4) foi utilizada para fechar o forno elétrico (5). Durante a simulação de incêndio foram monitoradas as temperaturas dos gases do forno (distante 100 mm da face da viga), da seção transversal de concreto, e das barras de aço a partir de um sistema de aquisição de dados (6).

Figura 22 – Esquema para aquecimento das vigas



Fonte: O autor (2022)

O desempenho do forno foi o mesmo para todos os tempos de exposição, com a mesma taxa de aquecimento e resfriamento. Após atingir o tempo de exposição ao incêndio desejado, o forno elétrico foi desligado, e permaneceu fechado por 30 min para garantir um resfriamento mais lento, e depois foi aberto.

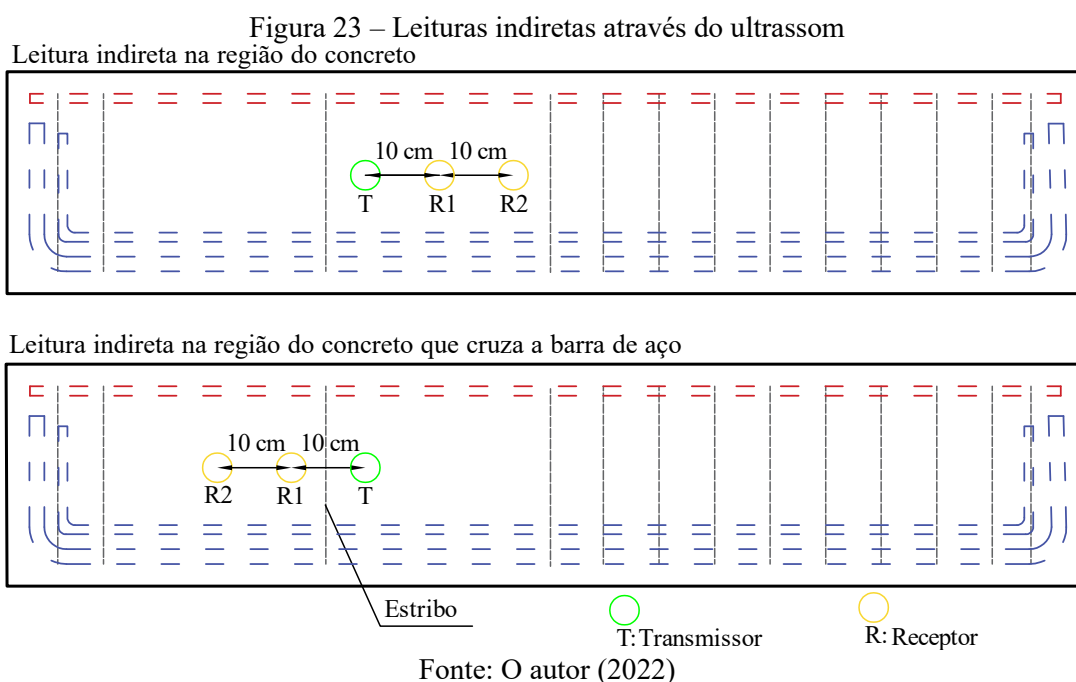
Durante a fase de aquecimento foi observada a ocorrência de spalling nas vigas, caracterizado pelo som explosivo do concreto. Um mapeamento com a identificação do tempo de incêndio e da respectiva temperatura dos gases do forno foram registrados para análise e discussão.

### 3.3.2 Ensaios não destrutivos no concreto

Dois ensaios não destrutivos (END) foram utilizados para avaliar as condições pós-incêndio do concreto: ultrassom e teste de arrancamento (*pull-off test*).

Foi utilizado para leitura da VPU o ultrassom de modelo Pundit Lab, marca Proceq, com transdutores de 54 kHz. As leituras foram realizadas com dois métodos: direto e indireto, conforme a NBR 8802 (ABNT, 2019). Ambos métodos realizados antes e após o aquecimento das vigas, e a escala de Whitehurst (1966) e a equação de Lin et al. (2011), como já apresentados, foram usados para avaliação da qualidade e da resistência residual do concreto, respectivamente.

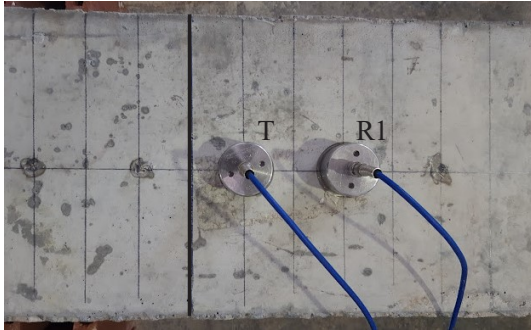
A leitura indireta da VPU foi determinada em duas localizações nas vigas, uma na região do concreto sem estribo e uma na região onde o pulso ultrassônico cruza perpendicularmente um estribo, ver Figura 23. O objetivo foi analisar se a técnica é sensível e eficaz na identificação da fissuração promovida no concreto pelo tempo/temperatura de aquecimento e/ou se há influência da presença de barras de aço.



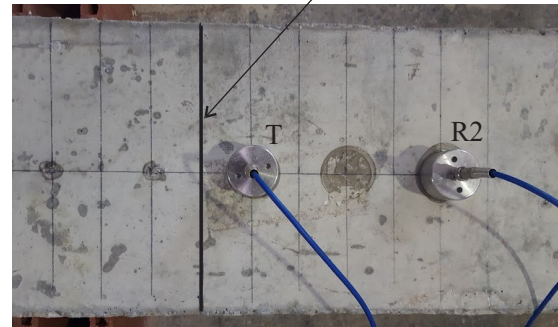
A VPU através da leitura indireta é caracterizada pela medição da velocidade de, no mínimo, dois pontos de leitura, a saber T–R1 (leitura 1) e T–R2 (leitura 2) para cada condição analisada (Figura 24), a partir das quais é possível determinar a VPU.

Figura 24 – Realização das leituras indiretas

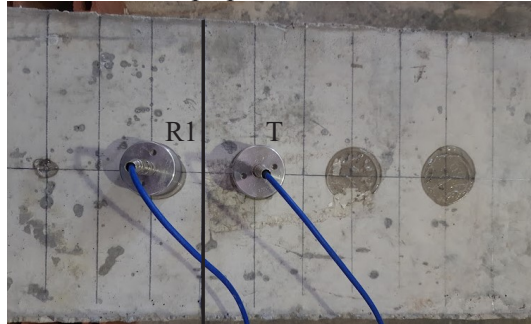
Leitura indireta sem presença de aço



Estribo



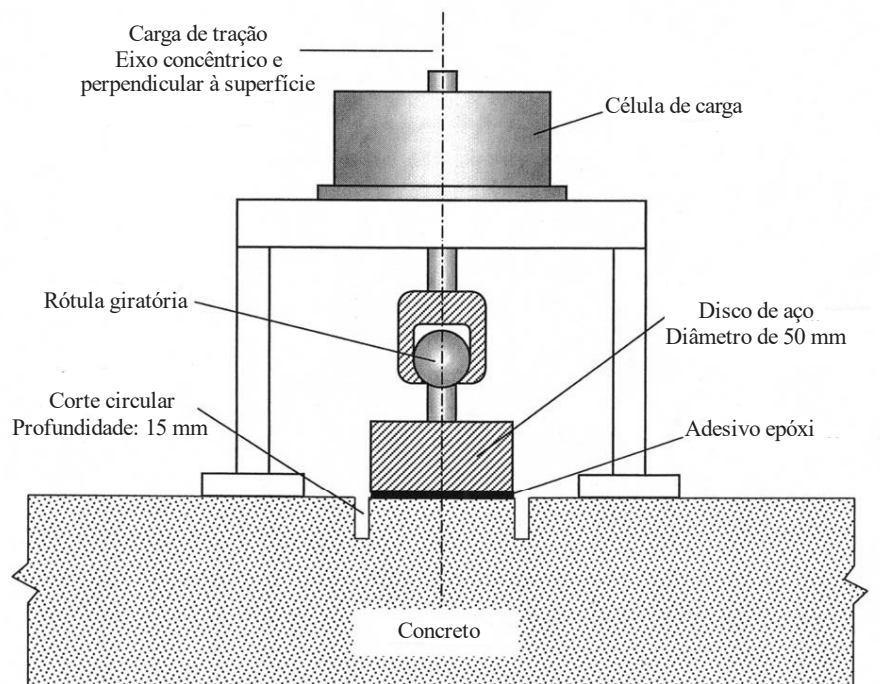
Leitura indireta perpendicular ao estribo



Fonte: O autor (2022)

O teste de arrancamento (*pull-off test*) através do teste de tração direta (Figura 25) foi realizado na região do cobrimento do concreto para determinar a resistência residual à tração, conforme a norma ASTM C1583/C1583M-13. O equipamento possui capacidade de arrancamento de 2.000 kgf e leitura digital da carga.

Figura 25 – Esquema do teste de arrancamento do substrato



Fonte: Adaptado da ASTM C1583/C1583M-13

A Figura 26 mostra as etapas de execução do experimento com corte, preparação da superfície, colagem do disco, e execução do teste de arrancamento.

Figura 26 – Etapas de execução do teste de arrancamento



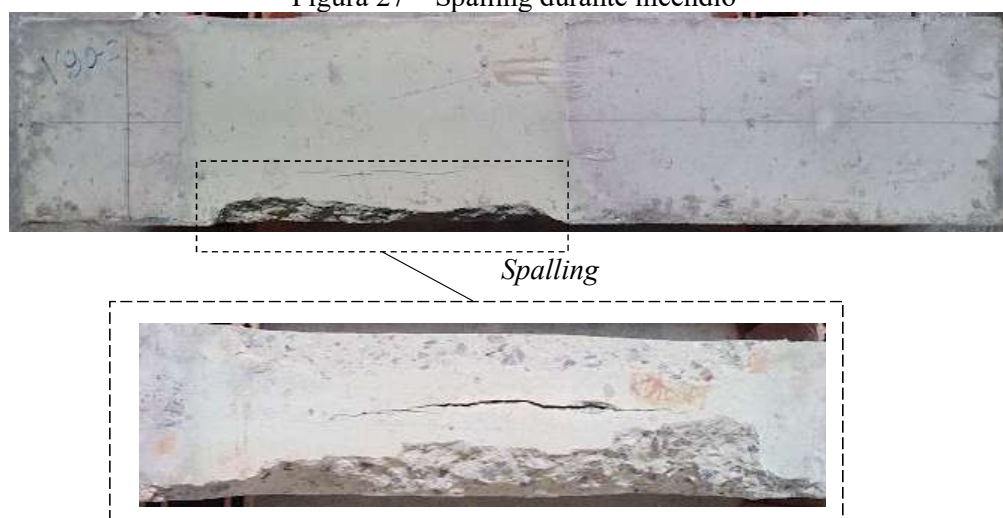
Teste arrancamento  
Fonte: O autor (2022)

Foi realizado o arrancamento de um ponto para cada viga aquecida, totalizando quatro pontos de arrancamento para cada condição de exposição ao incêndio. A discussão dos resultados foi conduzida a partir da média aritmética dos resultados das quatro amostras para cada tempo de incêndio, e a equação de Yang et al. (2020) foi adotada para estimar a resistência residual à compressão do concreto, como já apresentada.

### 3.3.3 *Reparo e reforço após incêndio*

A necessidade de reparo (reconstrução da seção de concreto) surgiu devido a ocorrência de *spalling* durante o aquecimento das vigas. O *cover spalling* ocorreu na região dos cantos em todas as amostras (Figura 27), e foi identificado ainda durante o aquecimento pelo som explosivo da fragmentação.

Figura 27 – Spalling durante incêndio

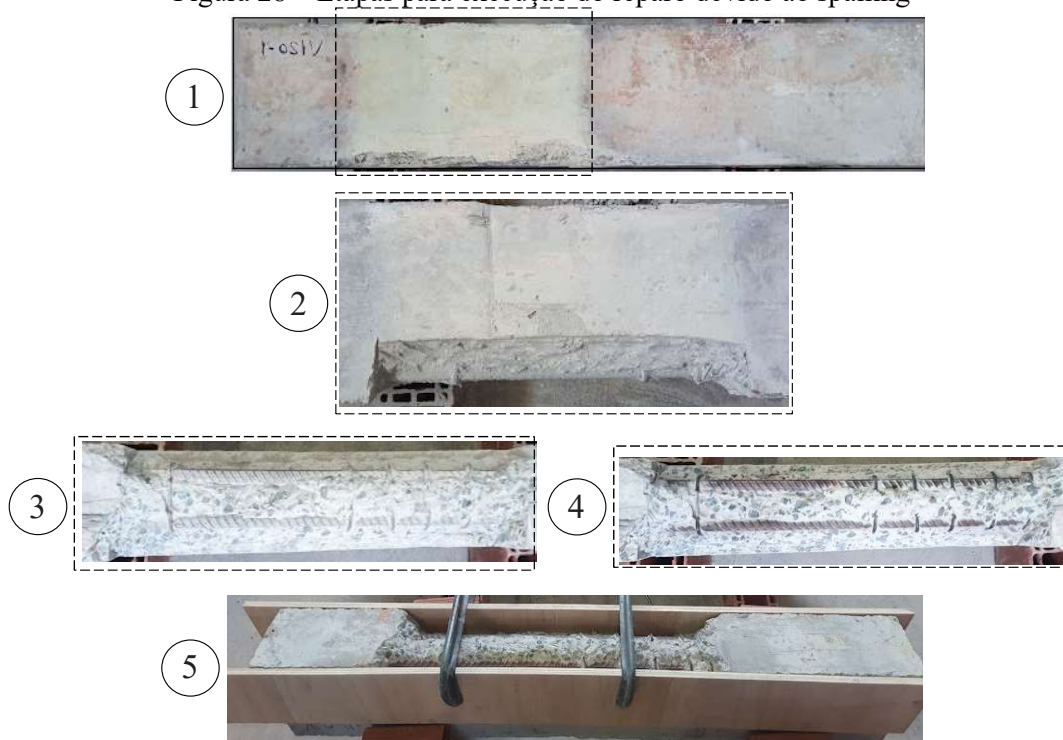


Vista da face inferior da viga após aquecimento

Fonte: O autor (2022)

Uma argamassa tixotrópica foi utilizada para reconstituir a seção transversal, e o procedimento da ACI 546R-14 foi adotado para realização do reparo das vigas. A Figura 28 apresenta as etapas para realização reparo: (1) delimitação da região de ocorrência do *spalling* com disco de corte, (2, 3) retirada do material solto e fragilizado, (4) limpeza mecânica do concreto e dos vergalhões com escova do aço, (5) montagem de fôrma, limpeza com aspirador de pó, saturação do substrato antes da aplicação da argamassa, e execução do reparo. A Figura 29 apresenta a viga reparada.

Figura 28 – Etapas para execução do reparo devido ao spalling



Fonte: O autor (2022)

Figura 29 – Viga reparada com graute após incêndio



Fonte: O autor (2022)

O reforço da viga ao cisalhamento foi através da inserção dos laminados de CFRP no cobrimento do concreto em ranhuras com profundidade de 20 mm e largura de 3 mm. Os laminados foram inclinados a 45° com o eixo da viga, e com espaçamentos de 75, 150 e 200 mm, conforme Figura 30. A dimensão dos laminados utilizados foi de 10 mm × 1,2 mm. As etapas de reforço foram: realização das ranhuras no concreto, limpeza, preenchimento das ranhuras com adesivo epóxi, e inserção dos laminados.

Figura 30 – Viga reforçada com laminados a cada 200 mm



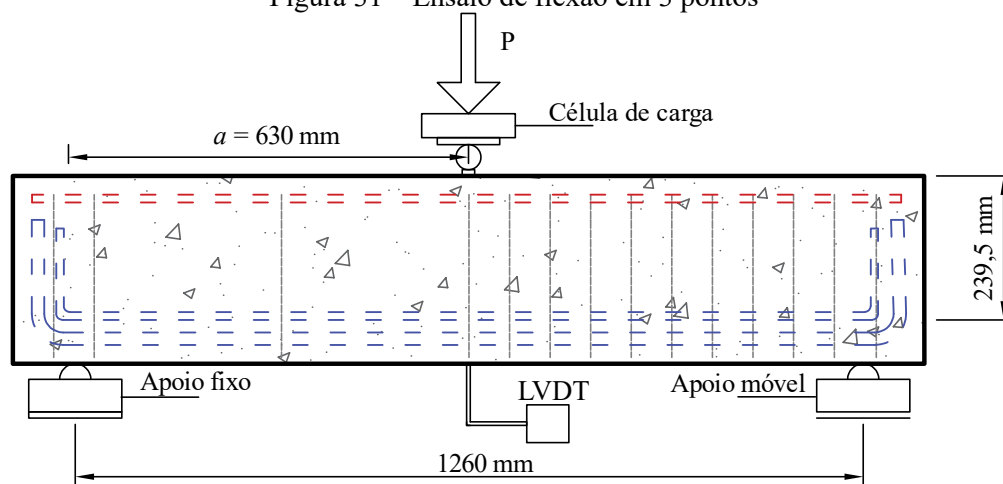
Fonte: O autor (2022)

Na região dos apoios foram inseridos dois laminados espaçados a cada 50 mm para evitar a falha prematura no local.

### 3.3.4 Flexão em 3 pontos

A Figura 31 apresenta a disposição do ensaio de flexão em 3 pontos. O vão de cisalhamento ( $a$ ) de 2,1 vezes a altura da viga ( $h$ ), bem como, a relação ( $a/d$ ) de 2,63 foram adotados para evitar a influência do efeito arco.

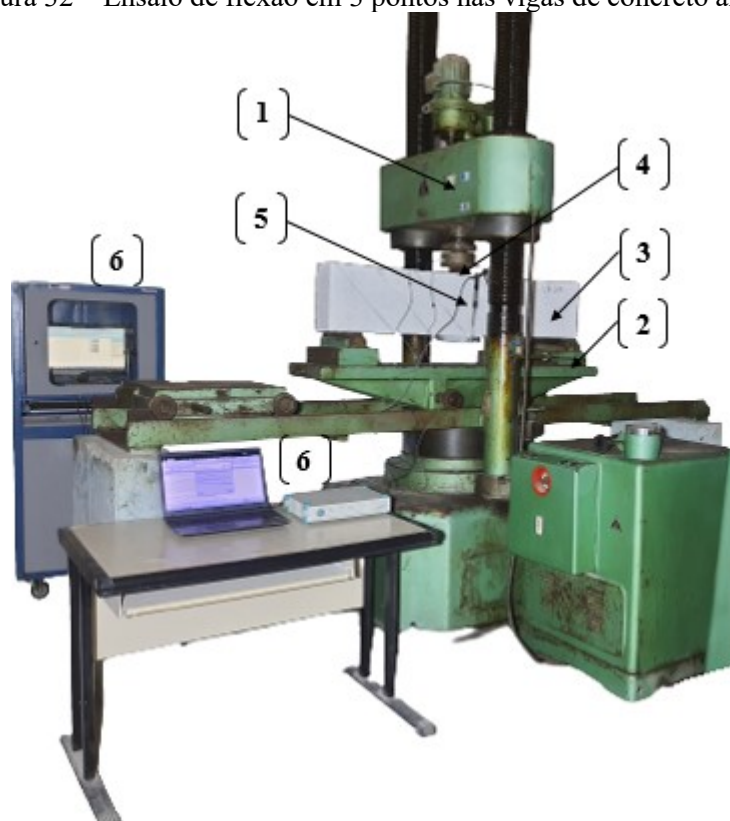
Figura 31 – Ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: O autor (2022)

A Figura 32 mostra a configuração para o ensaio realizado em máquina universal com capacidade de 3000 kN (1) com base biapoiada (2) para realização de testes em vigas à flexão (3). Durante o experimento foram monitorados: a carga aplicada através de célula de carga com capacidade de 500 kN (4), o deslocamento no meio do vão medido com transdutor de deslocamento variável linear (LVDT) com curso de 50 mm (5). A aquisição de dados foi feita através de computadores e *dataloggers* (6).

Figura 32 – Ensaio de flexão em 3 pontos nas vigas de concreto armado



Fonte: O autor (2022)

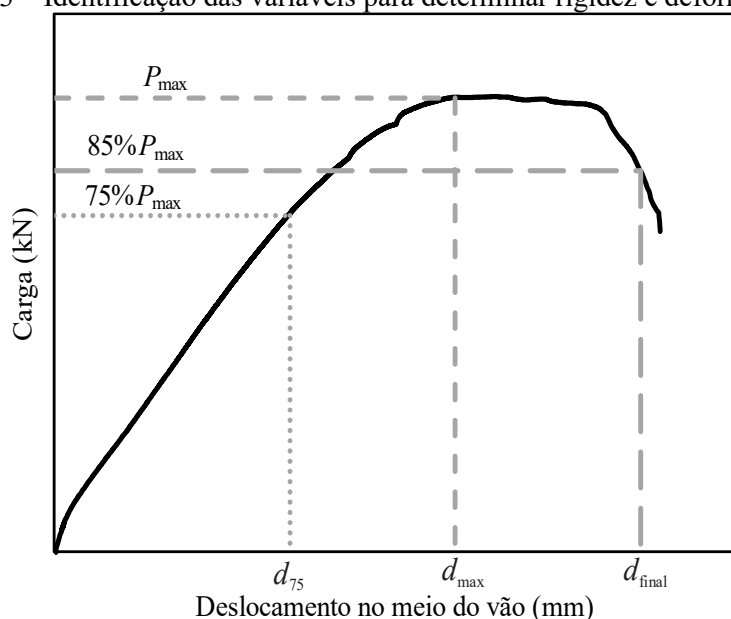
O experimento, conforme proposto, viabiliza a discussão sobre a capacidade de carga, deformabilidade, e rigidez das vigas. A rigidez ( $K$ ) das vigas foi estimada com base na Equação 66 adotada por Vu et al. (2014), que considera a rigidez inicial da viga como uma relação entre a carga ( $P_{75}$ ) correspondente a 75% da carga máxima ( $P_{\max}$ ), e o respectivo deslocamento ( $d_{75}$ ), ver Figura 33.

$$K = P_{75}/d_{75} \quad (66)$$

O fator de deformabilidade ( $\mu$ ) é, segundo Hason et al. (2021), mais significativo do que a ductibilidade para avaliar o desempenho de vigas com FRP. O fator é definido como a razão do deslocamento na carga final ( $d_{\text{final}}$ ) e o deslocamento na carga máxima ( $d_{\max}$ ), ver Equação 67. A carga final é igual à carga correspondente a 85% da carga máxima na parte decrescente da curva carga-deflexão, ver Figura 33.

$$\mu = d_{\text{final}}/d_{\max} \quad (67)$$

Figura 33 – Identificação das variáveis para determinar rigidez e deformabilidade



Fonte: O autor (2022)

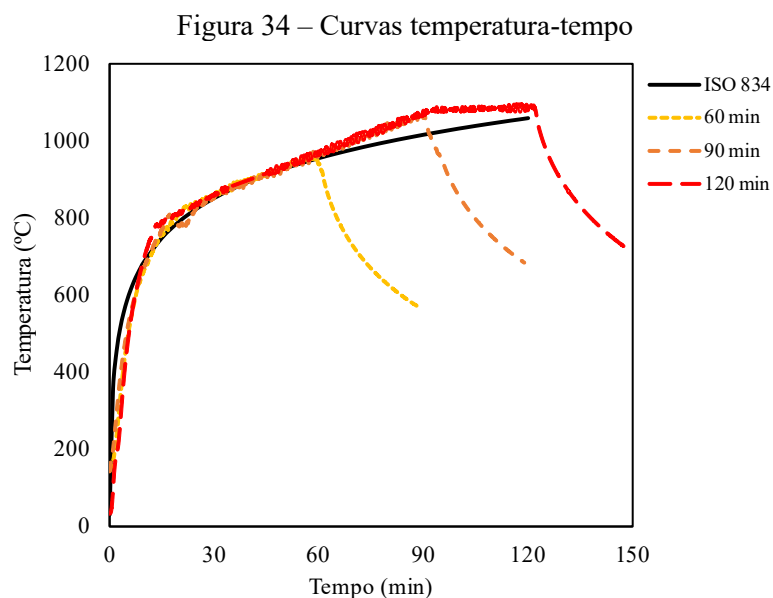
### 3.3.5 Ensaio residual do aço

Ao total 24 amostras das barras de aço foram extraídas do concreto após os aquecimentos e as rupturas das vigas no ensaio de flexão em 3 pontos. A resistência residual dos vergalhões de aço foi determinada de acordo com o ensaio tração prescrito pela NBR 6892-1 (ABNT, 2013). Foi utilizada para o ensaio uma máquina universal com capacidade de 300 kN, modelo AGS-X, do fabricante Shimadzu. Os valores apresentados nos resultados são a média entre duas amostras para cada diâmetro da barra, relativo a cada tempo de exposição ao incêndio.

### 3.4 Resultados experimentais

#### 3.4.1 Temperaturas

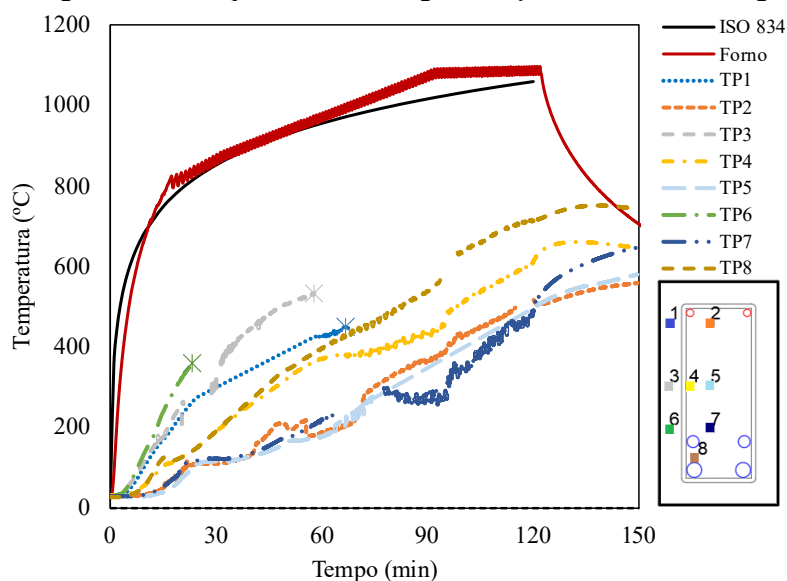
A Figura 34 apresenta as curvas temperatura-tempo do forno elétrico para os grupos de aquecimento de 60, 90 e 120 min. A curva de incêndio do forno seguiu a curva ISO 834 (2014) e seu desempenho foi o mesmo para todos os tempos de exposição, apresentando a mesma taxa de aquecimento e resfriamento. Após atingir o tempo de fogo desejado, o forno elétrico foi desligado e permaneceu fechado por 30 min para garantir um resfriamento mais lento, e então foi aberto.



Fonte: O autor (2022)

As temperaturas máximas do forno durante a fase de aquecimento foram de 970 °C, 1074 °C e 1095 °C, para tempos de exposição de 60, 90 e 120 min, respectivamente. As leituras dos gases dentro do forno foram realizadas por termopar distante 100 mm da face da viga. A Figura 35 mostra a evolução da temperatura ao longo da seção transversal de concreto e nas barras de aço.

Figura 35 – Temperaturas ao longo da seção transversal da viga



Fonte: O autor (2022)

As temperaturas na região do cobrimento de concreto (1, 3 e 6) foram perdidas entre 30–60 min devido a problemas nos termopares. As temperaturas no estribo (4) e na barra longitudinal (8) permaneceram muito próximas até 60 min, quando a temperatura na barra (8) começou a aumentar mais rapidamente devido a fissuras no concreto e *spalling*. As temperaturas ao longo da altura do eixo da viga (2, 5 e 7) apresentaram temperaturas menores, e abaixo de 500 °C no núcleo de concreto até 120 min. Aos 30 min, observou-se um platô de temperatura em 100 °C devido à presença de umidade e evaporação da água, conforme observado por Fan et al. (2020) e Bensalem et al. (2021).

É pertinente destacar o gradiente de temperatura existente ao longo da seção transversal, comportamento típico da análise no estado transiente de temperatura. A região do cobrimento foi nitidamente a mais afetada por estar mais exposta a ação da alta temperatura e é a região crítica porque é onde o reforço foi inserido após o incêndio.

### 3.4.2 *Spalling*

A alta taxa de aquecimento do forno e a baixa porosidade do concreto devido à alta resistência contribuem para a fragmentação do concreto (AMRAN et al., 2022), fenômeno também observado neste programa experimental (Figura 27).

O deslocamento (*cover spalling*) ocorreu próximo ao fundo em todas as vigas, e foi identificado pelo som explosivo da fragmentação. A Tabela 15 apresenta os tempos e as temperaturas de início e fim da ocorrência do fenômeno.

Tabela 15 – Monitoramento da ocorrência do spalling

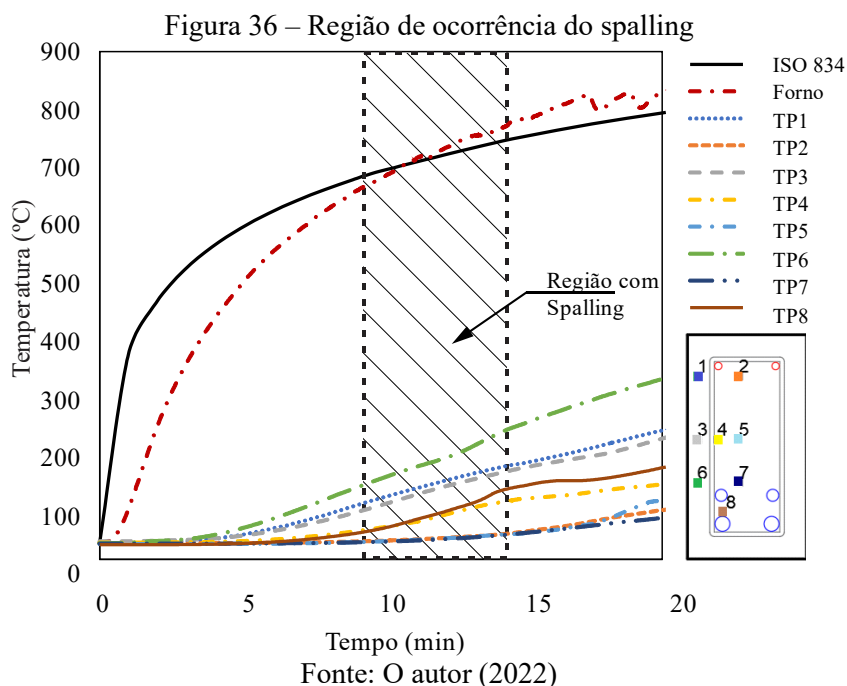
| Id.                     | Tempo<br>(min) |         | Temperatura do forno<br>(°C) |         | Temperatura no concreto<br>(°C) |         |        |         |
|-------------------------|----------------|---------|------------------------------|---------|---------------------------------|---------|--------|---------|
|                         |                |         |                              |         | TP6                             |         | TP7    |         |
|                         | Início         | Término | Início                       | Término | Início                          | Término | Início | Término |
| -                       |                |         |                              |         |                                 |         |        |         |
| RCB <sub>60-NS</sub>    | 8              | 21      | 609                          | 810     | 106                             | 333     | 29     | 78      |
| RCBS <sub>60-75</sub>   | 8              | 14      | 690                          | 796     | 116                             | 220     | 30     | 42      |
| RCBS <sub>60-150</sub>  | 9              | 13      | 655                          | 715     | 131                             | 182     | 30     | 36      |
| RCBS <sub>60-200</sub>  | 11             | 12      | 720                          | 753     | 160                             | 175     | 33     | 35      |
| RCB <sub>90-NS</sub>    | -              | -       | -                            | -       | -                               | -       | -      | -       |
| RCBS <sub>90-75</sub>   | 9              | 14      | 660                          | 737     | 131                             | 220     | 30     | 42      |
| RCBS <sub>90-150</sub>  | 9              | 14      | 670                          | 743     | 145                             | 220     | 31     | 42      |
| RCBS <sub>90-200</sub>  | 10             | 17      | 715                          | 818     | 152                             | 262     | 32     | 53      |
| RCB <sub>120-NS</sub>   | 8              | 12      | 719                          | 785     | 105                             | 175     | 29     | 35      |
| RCBS <sub>120-75</sub>  | 9              | 12      | 705                          | 757     | 115                             | 160     | 29     | 33      |
| RCBS <sub>120-150</sub> | 9              | 10      | 750                          | 753     | 125                             | 143     | 30     | 31      |
| RCBS <sub>120-200</sub> | 8              | 11      | 733                          | 785     | 125                             | 167     | 30     | 34      |
| Média                   | 8,9            | 13,6    | 693,3                        | 768,4   | 128,2                           | 205,1   | 30,2   | 41,9    |
| Desvio padrão           | 0,9            | 3,1     | 41,2                         | 32,5    | 18,0                            | 54,7    | 1,3    | 13,5    |

Fonte: O autor (2022)

O corpo de prova RCB<sub>90-NS</sub> não apresentou um som típico de fragmentação que pudesse identificar o início e o fim do *spalling*, porém, o padrão de fissuração e fragilidade do cobrimento de concreto na face inferior exigiu a necessidade de desprendimento e reparo da viga.

As temperaturas médias inicial e final para fragmentação mostraram um padrão de repetitividade com temperaturas médias do forno de 693,3 °C e 768,4 °C, respectivamente. O termopar no concreto (TP6) mais próximo ao canto da seção transversal onde ocorreu a fragmentação apresentou temperatura entre 100 e 200 °C (evaporação da água), neste momento a temperatura dos gases próximo a superfície do concreto se aproximava de 700 °C, o que implica em um alto gradiente de temperatura, fatores que contribuem e justificam a ocorrência do *spalling*.

A Figura 36 ilustra a região de ocorrência do fenômeno em relação à curva padrão de incêndio e as temperaturas do forno e da seção transversal da viga.



O intervalo de temperatura-tempo para ocorrência do *spalling* coincide com a interseção entre as curvas de incêndio da ISO 834 (2014) e do forno elétrico durante o experimento. As temperaturas médias para o intervalo identificado na série experimental estão de acordo com as observadas por Sullivan et al. (2004) e Shang et al. (2020) que foram 700 °C e 813 °C, respectivamente.

### 3.4.3 Ultrassom

#### 3.4.3.1 Método direto

A Tabela 16 apresenta o resumo das velocidades médias de propagação ultrassônica pelo método direto para os grupos de vigas antes de aquecer (VPU\_ $D_a$ ) e após incêndio (VPU\_ $D_0$ ). Cada grupo contempla quatro vigas aquecidas a cada tempo de exposição ao incêndio de 60, 90 e 120 min.

Tabela 16 – VPU média através da leitura direta

| TI                 | VPU_ $D_a$ (m/s)<br>Antes do incêndio | CV (%) | VPU_ $D_0$ (m/s)<br>Após incêndio | CV (%) | VPU_ $D_0$ /VPU_ $D_a$ |
|--------------------|---------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|------------------------|
| RCB <sub>60</sub>  | 4447                                  | 0,74%  | 2758                              | 3,25%  | 0,62                   |
| RCB <sub>90</sub>  | 4428                                  | 2,59%  | 2130                              | 2,88%  | 0,48                   |
| RCB <sub>120</sub> | 4392                                  | 0,14%  | 1513                              | 3,10%  | 0,34                   |

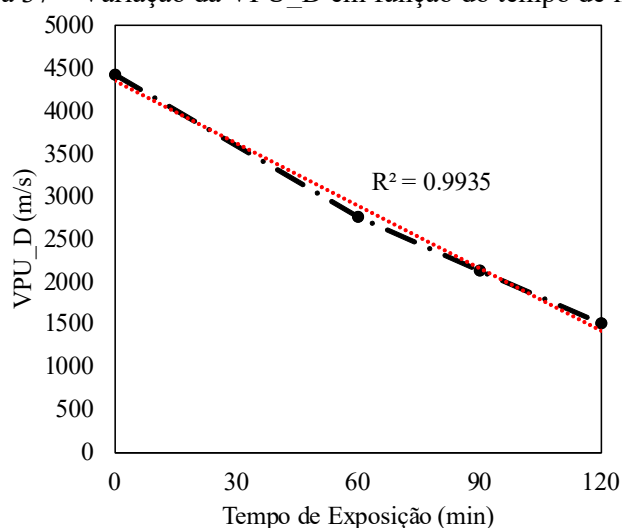
TI: Tempo de incêndio. Os valores médios apresentados são relativos a quatro vigas

Fonte: O autor (2022)

As leituras para todos os grupos de vigas apresentaram baixa dispersão com CV menor do que 5%. A redução da VPU\_D após incêndio é esperada, visto que o concreto no processo de aquecimento sofre fissuração e, conseqüentemente, o pulso ultrassônico passa a percorrer um caminho mais longo. As reduções na VPU\_D no concreto foram de 38%, 52% e 66% para os tempos de exposição de 60, 90 e 120 min, respectivamente.

A Figura 37 mostra a variação na VPU\_D em função do tempo de exposição, apresentando uma regressão linear com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99.

Figura 37 – Variação da VPU\_D em função do tempo de incêndio



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 17 apresenta a resistência residual do concreto após incêndio estimada de acordo com Lin et al. (2011).

Tabela 17 – Qualidade e resistência residual do concreto

| <b>Id.</b>         | <b>Resistência residual</b> |
|--------------------|-----------------------------|
| -                  | $f_{cd}$ (MPa)              |
| RCB <sub>60</sub>  | 36,9                        |
| RCB <sub>90</sub>  | 27,7                        |
| RCB <sub>120</sub> | 18,4                        |

<sup>1</sup> Resistência residual à compressão de acordo com Lin et al. (2011)

Fonte: O autor (2022)

A resistência do concreto de referência à temperatura ambiente foi de 64,2 MPa, indicando que as reduções de resistência após incêndio foram de 42,5%, 56,9% e 71,3% para os tempos de 60, 90 e 120 min de incêndio, respectivamente. A avaliação da qualidade do concreto pela classificação de Whitehurst (1966) também indica redução de um concreto de qualidade ótima a ruim.

### 3.4.3.2 Método indireto

A Tabela 18 apresenta os resultados das velocidades médias medidos pela técnica indireta (VPU\_I) para o concreto antes (VPU\_I<sub>a</sub>) e após incêndio (VPU\_I<sub>0</sub>).

Tabela 18 – VPU médias através da leitura indireta

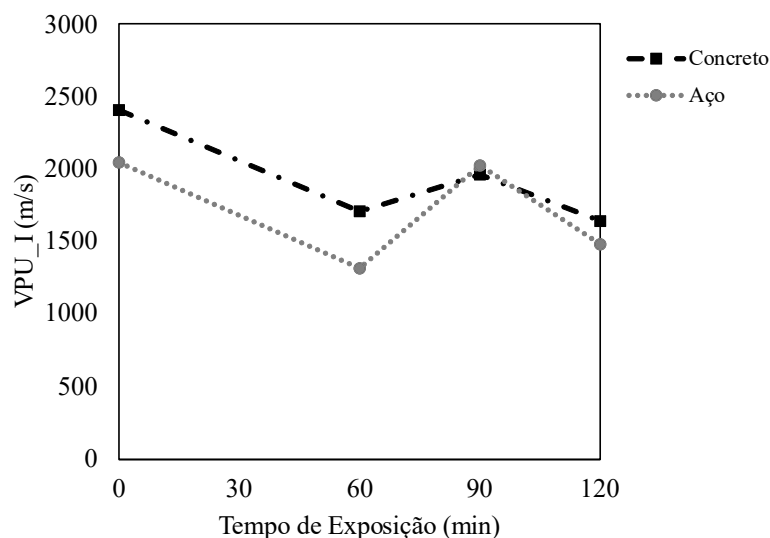
| Id.                                                                            | Local da leitura | Antes do incêndio        |        | Após incêndio            |        | Redução                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|----------------------------------------|
|                                                                                |                  | VPU_I <sub>a</sub> (m/s) | CV (%) | VPU_I <sub>0</sub> (m/s) | CV (%) | VPU_I <sub>0</sub> /VPU_I <sub>a</sub> |
| RCB <sub>60</sub>                                                              | Concreto         | 2597                     | 15,8%  | 1709                     | 28,7%  | 0,66                                   |
| RCB <sub>90</sub>                                                              |                  | 2299                     | 17,2%  | 1961                     | 21,1%  | 0,85                                   |
| RCB <sub>120</sub>                                                             |                  | 2319                     | 10,3%  | 1642                     | 7,8%   | 0,71                                   |
| RCB <sub>60</sub>                                                              | Cruzando estribo | 2152                     | 8,0%   | 1317                     | 50,1%  | 0,61                                   |
| RCB <sub>90</sub>                                                              |                  | 1892                     | 18,8%  | 2024                     | 4,8%   | 1,07                                   |
| RCB <sub>120</sub>                                                             |                  | 2089                     | 5,2%   | 1482                     | 13,3%  | 0,71                                   |
| Os valores de VPU apresentados correspondem à média da leitura em quatro vigas |                  |                          |        |                          |        |                                        |

Fonte: O autor (2022)

As leituras VPU\_I apresentaram uma dispersão entre as amostras sob mesmas condições, o que pode ser avaliado pelo CV elevado, principalmente nas amostras após incêndio. Os transdutores apresentaram dificuldade em conseguir fazer a leitura do pulso, sendo necessário várias tentativas em algumas situações. Essa imprecisão é motivada pelo nível de fissuração na superfície do concreto após incêndio, indicando que o uso do método não foi preciso para esse tipo de avaliação. No entanto, algumas considerações podem ser destacadas dos resultados.

As leituras foram sensíveis à presença da barra de aço e tenderam a ter uma VPU menor, o que é justificado pelo obstáculo que o estribo proporciona entre Transmissor-Receptor. Todas as leituras após incêndio sofreram redução da velocidade do pulso na mesma magnitude, independente de cruzar ou não o aço transversal (estribo), com exceção das amostras aquecidas até 90 min (RCB<sub>90</sub>). Esse comportamento indica que é imprescindível identificar a presença de barras de aço no concreto, sob risco de comprometer a leitura da VPU no concreto. A Figura 38 mostra a variação da VPU\_I em função do tempo de exposição ao incêndio.

Figura 38 – Variação da VPU\_I em função do tempo de incêndio



Fonte: O autor (2022)

Não foi observada uma redução linear na VPU em função do tempo de exposição, como observado pelo método direto. Este comportamento é justificado pelo fato de que o concreto na região do cobrimento, próximo a superfície, foi submetido a temperaturas máximas muito próximas (970 °C, 1074 °C e 1095 °C para 60, 90 e 120 min, respectivamente). Neste sentido, o método indireto não consegue ser suficientemente sensível ao tempo de exposição ao incêndio como o método direto.

É nítido que a VPU\_I é menor do que a VPU\_D, mesmo para as amostras antes do aquecimento, destacando que a escala para avaliação da qualidade do concreto em função do VPU precisa ser diferente em função do tipo de método utilizado. Portanto, a avaliação da qualidade do concreto e a estimativa da resistência residual do concreto não puderam ser utilizadas porque foram desenvolvidas para o método direto.

#### 3.4.4 Teste de arrancamento

A Figura 39 apresenta os modos de falha observados no teste de arrancamento. Todos falharam no concreto.

Figura 39 – Modos de falha no teste de arrancamento

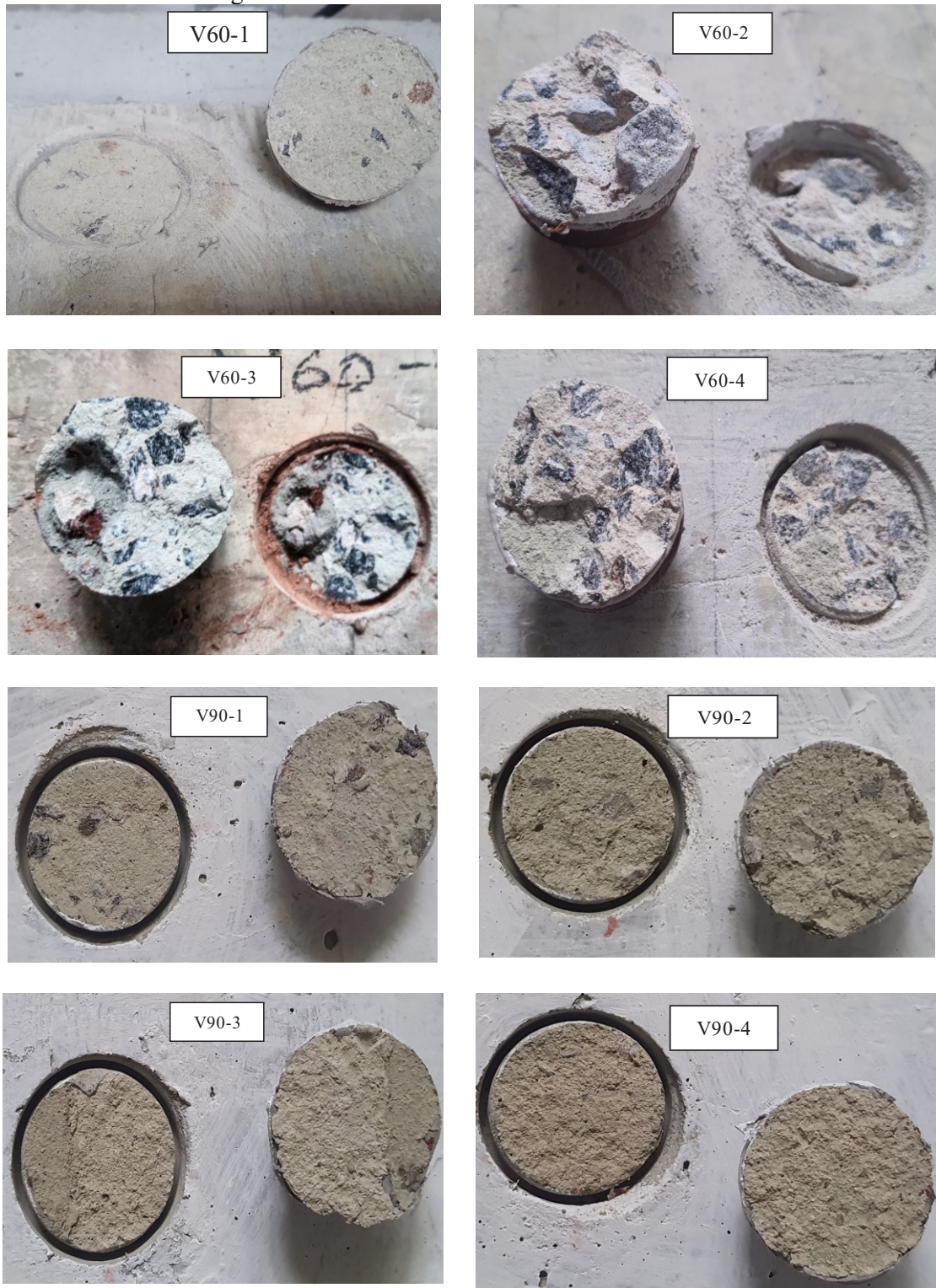


Figura 39 – Modos de falha no teste de arrancamento



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 19 resume os valores de carga, desvio padrão ( $\sigma$ ), tensão de tração no teste de arrancamento ( $f_{ta}$ ), e a resistência à compressão do concreto após incêndio, determinada de acordo com a expressão de Yang et al. (2020).

Tabela 19 – Tensão de tração no teste de arrancamento

| <b>Id</b>          | <b>Carga<br/>(kgf)</b> | <b><math>f_{ta}</math><br/>(MPa)</b> | <b><math>f_{tam}</math><br/>(MPa)</b> | <b><math>\sigma</math><br/>(MPa)</b> | <b><math>f_{c0}^1</math><br/>(MPa)</b> |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| RCB <sub>60</sub>  | 264,1                  | 1,35                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>60</sub>  | 109,2                  | 0,56                                 | 0,92                                  | 0,33                                 | 33,2                                   |
| RCB <sub>60</sub>  | 163,4                  | 0,83                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>60</sub>  | 189,2                  | 0,96                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>90</sub>  | 78,8                   | 0,40                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>90</sub>  | 43,2                   | 0,22                                 | 0,54                                  | 0,31                                 | 22,0                                   |
| RCB <sub>90</sub>  | 186,1                  | 0,95                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>90</sub>  | 115,1                  | 0,59                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>120</sub> | 125,6                  | 0,64                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>120</sub> | 137,1                  | 0,70                                 | 0,52                                  | 0,17                                 | 21,5                                   |
| RCB <sub>120</sub> | 69,9                   | 0,36                                 |                                       |                                      |                                        |
| RCB <sub>120</sub> | 77,8                   | 0,40                                 |                                       |                                      |                                        |

$f_{tam}$ : Tensão de tração média do concreto no teste *Pull-off*

<sup>1</sup> Yang et al. (2020)

Fonte: O autor (2022)

É notório que a tensão de tração no teste de arrancamento reduz com o tempo de exposição ao incêndio, com tendência de estabilização para os tempos de 90 e 120 min. O comportamento foi análogo ao observado na leitura indireta do ultrassom, haja vista que a região superficial do concreto foi exposta a temperaturas máximas muito próximas (1074 °C e 1095 °C), logo, o grau de comprometimento superficial foi semelhante.

A resistência residual à compressão do concreto estimada de acordo com Yang et al. (2020) resulta em perdas de 48,4%, 65,7% e 66,5% para os tempos de exposição de 60, 90 e 120 min, respectivamente. Valores de resistência foram próximos aos encontrados a partir da VPU, mas o ultrassom mostrou uma maior sensibilidade ao tempo de exposição ao incêndio. O que é coerente, visto que a leitura direta atravessa a seção transversal da viga, e não somente da parte superficial como o teste de arrancamento.

O desvio padrão dos grupos aquecidos ficou entre 0,17–0,33 MPa, coerente com o desvio padrão de 0,29 MPa de Vaysburd e McDonald (1999), citado pela ASTM C1583/C1583M como referência. Ressalta-se que o trabalho de Vaysburd e McDonald (1999) não avaliou o teste de arrancamento para o concreto após incêndio, o que certamente implica em um desvio padrão maior.

A ACI 440.2R (2017) recomenda que tensão de tração mínima no teste de arrancamento seja 1,4 MPa para a aplicação do FRP no reforço de estruturas de concreto. No entanto, a norma não faz nenhuma referência sobre o uso do FRP no concreto após incêndio. Os valores encontrados nesta pesquisa mostram que o limite recomendado pela norma supracitada é conservador, como será apresentado mais adiante na comprovada eficiência do reforço.

### **3.4.5 Resistência residual do aço**

As barras de aço foram extraídas da extremidade aquecida das vigas, após o término da do ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 40), e ensaiadas à tração direta até a ruptura (Figura 41).

Figura 40 – Extração das barras de aço para ensaio da resistência residual



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 20 mostra os resultados para tensão de escoamento ( $f_y$ ) e tensão última ( $f_u$ ) para as barras de aço extraídas das vigas.

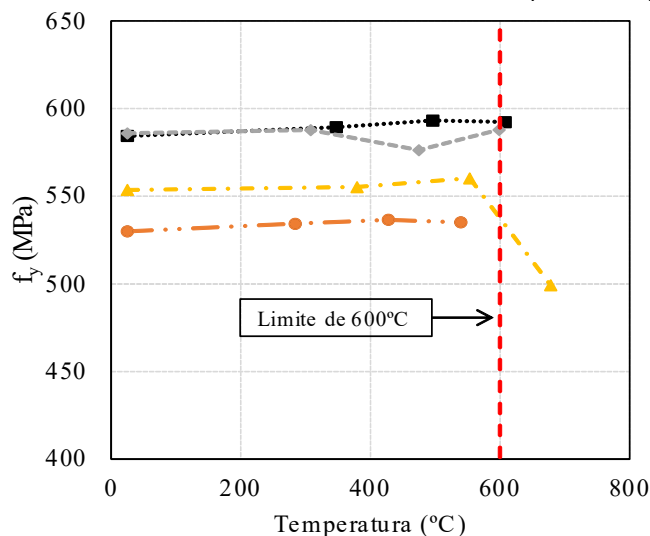
Tabela 20 – Propriedades mecânicas do aço ambiente e após incêndio

| Diâmetro<br>(mm) | Tempo de incêndio<br>(min) | Temperatura máxima<br>(°C) | $f_y$<br>(MPa) | $f_u$<br>(MPa) |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 6,3              | Ambiente                   | 25                         | 584,4          | 728,0          |
|                  | 60                         | 347                        | 589,4          | 722,6          |
|                  | 90                         | 496                        | 593,2          | 683,4          |
|                  | 120                        | 608                        | 592,3          | 616,8          |
| 10               | Ambiente                   | 25                         | 530,0          | 730,5          |
|                  | 60                         | 284                        | 534,3          | 728,9          |
|                  | 90                         | 428                        | 536,6          | 741,8          |
|                  | 120                        | 539                        | 535,2          | 728,9          |
| 16               | Ambiente                   | 25                         | 585,9          | 749,6          |
|                  | 60                         | 308                        | 587,8          | 757,0          |
|                  | 90                         | 475                        | 576,3          | 721,3          |
|                  | 120                        | 598                        | 587,9          | 660,8          |
| 20               | Ambiente                   | 25                         | 553,6          | 723,1          |
|                  | 60                         | 379                        | 555,3          | 688,1          |
|                  | 90                         | 553                        | 560,3          | 639,8          |
|                  | 120                        | 678                        | 499,2          | 538,5          |

Fonte: O autor (2022)

Os diferentes diâmetros das barras se localizam em posições diferentes na seção transversal, logo, a temperatura máxima de cada diâmetro é diferente mesmo submetida ao mesmo tempo de incêndio. As temperaturas nas barras de aço atingiram 600 °C apenas para o tempo de 120 min de exposição ao incêndio, com exceção da barra de 10 mm que estava localizada próximo ao topo da viga que não foi aquecida. As Figuras 42 e 43 apresentam as tensões de escoamento e de ruptura em função da temperatura, respectivamente.

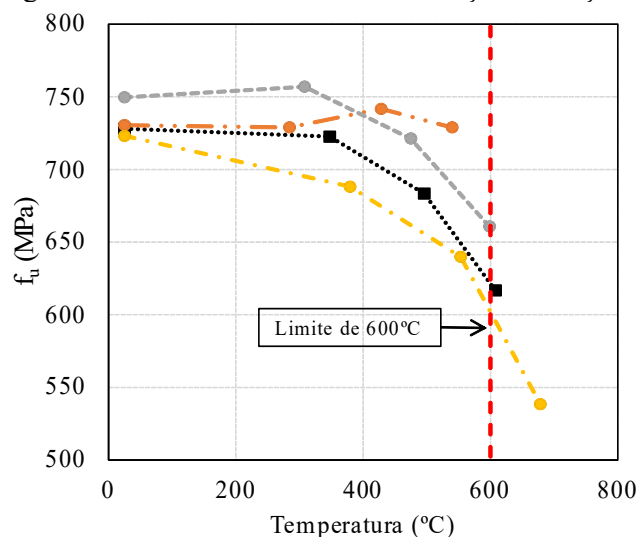
Figura 42 – Tensão de escoamento residual do aço em função da temperatura



Fonte: O autor (2022)

É possível observar na Figura 42 que a tensão de escoamento residual do aço não sofre redução da resistência para temperaturas até 600 °C. Este resultado também foi confirmado por Van Coile et al. (2014), que propôs fatores de redução para resistência residual do aço para temperaturas maiores do que 600 °C, considerando que o aço recupera integralmente a resistência para temperaturas inferiores.

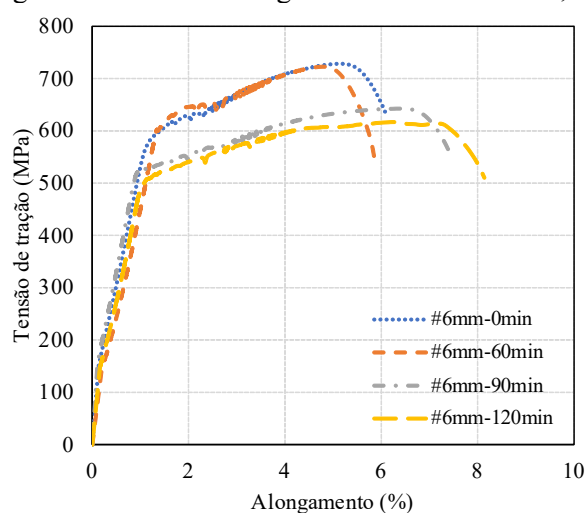
Figura 43 – Tensão última residual do aço em função da temperatura



Fonte: O autor (2022)

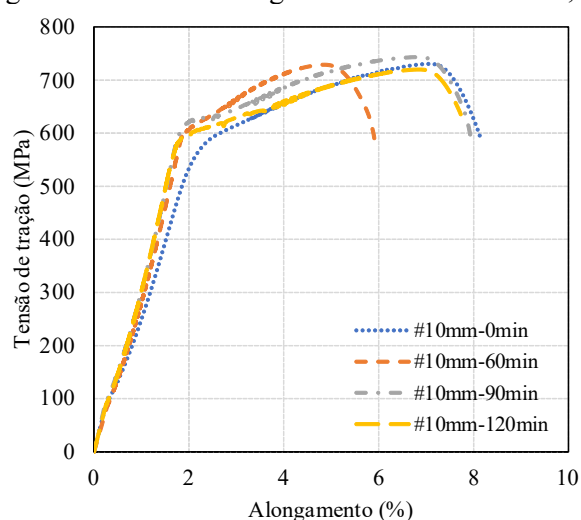
A tensão última residual do aço apresentou reduções para temperaturas a partir de 350 °C, e uma redução mais acentuada para temperaturas a partir de 500 °C. Ou seja, o efeito da temperatura na microestrutura do aço reduz a resistência última para temperaturas inferiores às observadas para tensão de escoamento. No entanto, o aço presente nas estruturas de concreto armado dificilmente atinge a tensão última porque está limitada à deformação máxima do concreto que é de 10‰ para garantir a da aderência concreto-aço. Para efeitos práticos, o limite de 600 °C é o mais razoável visto que a tensão de escoamento é utilizada no dimensionamento de estruturas em concreto armado. As Figuras 44 a 47 apresentam as tensões nas barras de aço em função do alongamento observado nas barras no ensaio de tração.

Figura 44 – Tensão-alongamento das barras de 6,3 mm



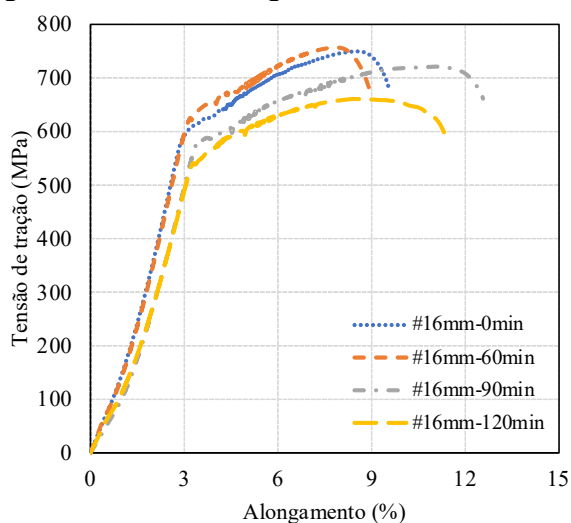
Fonte: O autor (2022)

Figura 45 – Tensão-alongamento das barras de 10,0 mm



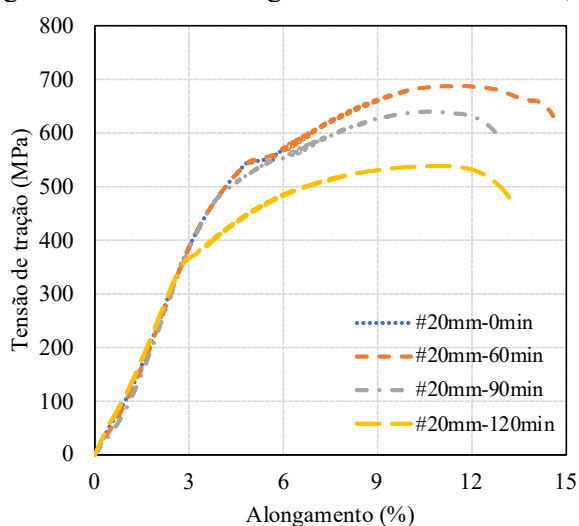
Fonte: O autor (2022)

Figura 46 – Tensão-alongamento das barras de 16,0 mm



Fonte: O autor (2022)

Figura 47 – Tensão-alongamento das barras de 20,0 mm



Fonte: O autor (2022)

Analisando as Figuras (44–47), observa-se que para um maior tempo de exposição ao incêndio (maior temperatura), as barras sofreram um maior alongamento e falharam para uma menor tensão última de tração. A menor diferença foi observada na Figura 45, relativa às barras de 10,0 mm, visto que as barras foram aquecidas a menores temperaturas porque estavam próximas a face superior da viga (não aquecida). A barra que apresentou maior redução de resistência foi a barra de 20,0 mm exposta ao tempo de 120 min, o que está coerente com a maior temperatura atingida devido à proximidade à face mais exposta e região de *cover spalling*.

### 3.4.6 Comportamento mecânico

#### 3.4.6.1 Capacidade de carga ao cisalhamento

As vigas falharam na Região A conforme previsto no programa experimental, com exceção da RCBS<sub>0-75</sub> que será discutido mais adiante. A Tabela 21 resume os resultados das cargas máximas ( $P_{\max}$ ) para as vigas de referência à temperatura ambiente ( $P_{\text{amb}}$ ) e reforçadas após o incêndio, e os modos de falha.

Tabela 21 – Cargas máximas de ruptura das vigas

| <b>Id.</b>              | <b><math>P_{\max}</math></b> | <b><math>P_{\max}/P_{\text{amb}}</math></b> | <b>Modos de Falha</b> |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| -                       | (kN)                         | -                                           | -                     |
| RCB <sub>0-NS</sub>     | 210,47                       | 1,00                                        | A                     |
| RCBS <sub>0-75</sub>    | 367,30                       | 1,79                                        | B                     |
| RCBS <sub>0-150</sub>   | 396,36                       | 1,88                                        | A                     |
| RCBS <sub>0-200</sub>   | 376,37                       | 1,75                                        | A                     |
| RCB <sub>60-NS</sub>    | 177,16                       | 0,84                                        | A                     |
| RCBS <sub>60-75</sub>   | 335,03                       | 1,59                                        | PO                    |
| RCBS <sub>60-150</sub>  | 285,53                       | 1,36                                        | A                     |
| RCBS <sub>60-200</sub>  | 233,24                       | 1,11                                        | A                     |
| RCB <sub>90-NS</sub>    | 158,66                       | 0,75                                        | A                     |
| RCBS <sub>90-75</sub>   | 342,28                       | 1,63                                        | PO                    |
| RCBS <sub>90-150</sub>  | 258,52                       | 1,23                                        | PO+A                  |
| RCBS <sub>90-200</sub>  | 241,31                       | 1,15                                        | C + A                 |
| RCB <sub>120-NS</sub>   | 127,92                       | 0,61                                        | A                     |
| RCBS <sub>120-75</sub>  | 264,09                       | 1,25                                        | PO                    |
| RCBS <sub>120-150</sub> | 253,84                       | 1,21                                        | PO + A                |
| RCBS <sub>120-200</sub> | 165,13                       | 0,78                                        | C+A                   |

A: Cisalhamento na Região A; B: Cisalhamento na Região B;  
C: Esmagamento do concreto na região comprimida; PO: Peeling-off.

Fonte: O autor (2022)

As vigas aquecidas e não reforçadas RCB<sub>60-NS</sub>, RCB<sub>90-NS</sub> e RCB<sub>120-NS</sub>, apresentaram capacidades residuais de 0,84, 0,75 e 0,61 após tempos de exposição de 60, 90 e 120 min, respectivamente. A perda gradual da resistência ao cisalhamento com o aumento do tempo de exposição, como esperado, também foi observada por Kumar e Kumar (2003), Hsu e Lin (2008), e Song et al. (2020), demandando a necessidade de recuperação da resistência do elemento.

As vigas reforçadas sem aquecimento prévio (RCBS<sub>0-200</sub>) apresentaram aumento da capacidade de carga superior a 75%, comparado a viga de referência (RCB<sub>0-NS</sub>). O aumento da

capacidade de carga não foi proporcional ao aumento da taxa de reforço, mas aumentou com o aumento do reforço. Este resultado demonstra a eficiência do sistema no reforço ao cisalhamento à temperatura ambiente, já relatado por Dias e Barros (2013), Prado et al. (2016), e Al-Rjoub et al. (2019).

Todas as vigas reforçadas após o incêndio recuperaram a capacidade de carga inicial e a aumentaram consideravelmente, comparadas a viga de referência (RCB<sub>0-NS</sub>), com exceção da RCBS<sub>120-200</sub>. Quanto maior a taxa de reforço, maior foi o aumento da carga. A capacidade de carga das vigas aumentou até 63% em relação a viga de referência ambiente (RCB<sub>0-NS</sub>). Se o aumento da carga das vigas reforçadas após incêndio (RCBS<sub>120-75</sub>) for comparado a amostra de referência sem reforço após incêndio (RCB<sub>120-NS</sub>) o aumento foi de 206%. Portanto, o reforço ao cisalhamento nas vigas foi eficiente após o fogo.

Ressalta-se que Haddad e Almasaeid (2016) não conseguiram restaurar a capacidade de carga das vigas expostas a 600 °C usando o mesmo sistema de reforço. Enquanto Al-Jadooe et al. (2017c, 2018a, 2018b) e Al-Rjoub et al. (2021) observaram a ineficiência do sistema NSM CFRP no reforço à flexão após 800 °C. Apesar das temperaturas mais altas do forno elétrico (970 a 1095 °C) nesta pesquisa, foi possível restaurar a capacidade de cisalhamento com espaçamentos de 75 e 150 mm após 120 min de incêndio sob curva de incêndio. No entanto, o método de aquecimento utilizado nesta pesquisa foi diferente. As temperaturas desenvolvidas no núcleo de concreto das vigas foram menores, pois a duração do tempo de exposição foi menor e apresenta um gradiente de temperatura ao longo da seção transversal.

### 3.4.6.2 Modos de falha

A Tabela 22 apresenta todos os modos de falha identificados nas vigas. Todas as vigas romperam por cisalhamento e/ou desprendimento da camada de concreto na cobertura (*peeling-off*). Enquanto as vigas sem reforço apresentaram um padrão de ruptura típico do cisalhamento com fissura diagonal bem definida, as vigas reforçadas apresentaram maior densidade de fissuras à medida que a taxa de reforço aumentou.

Tabela 22 – Identificação do modo de falha e padrão de fissuração das vigas

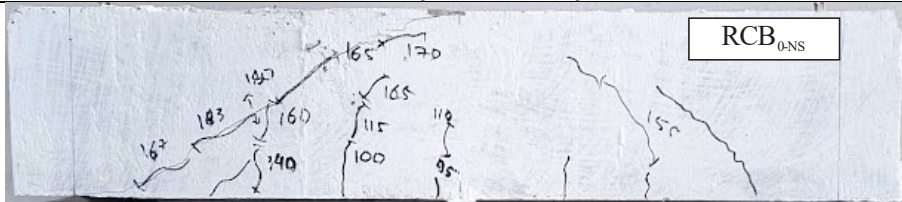
| Identificação e fissuração                                                           | Modo de falha            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|  | Cisalhamento na Região A |

Tabela 22 – Identificação do modo de falha e padrão de fissuração das vigas

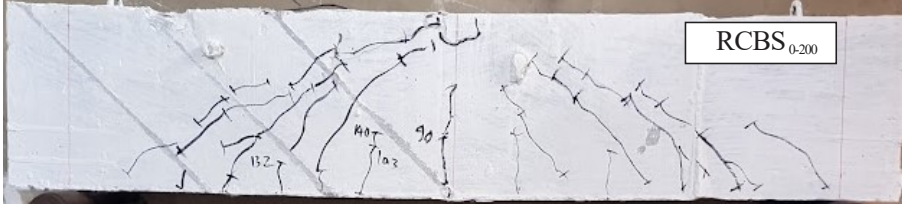
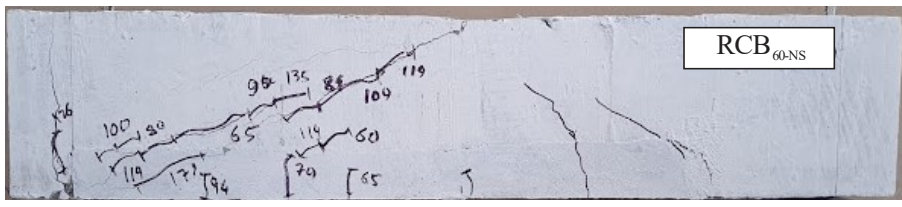
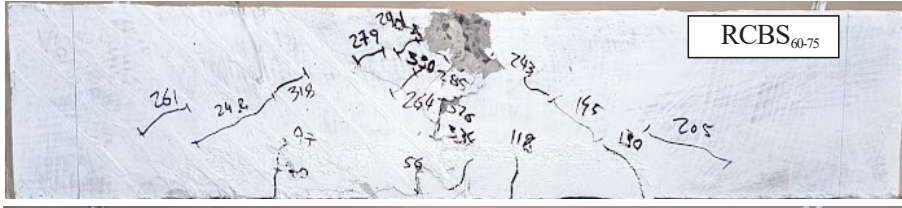
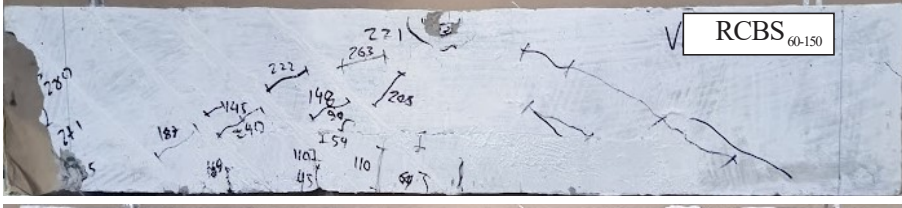
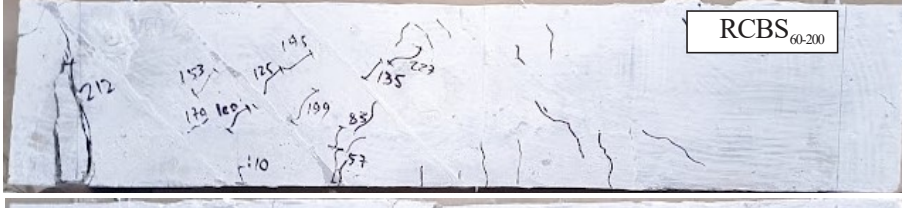
| Identificação e fissuração                                                           | Modo de falha                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|    | Cisalhamento na Região B                                                        |
|    | Cisalhamento na Região A                                                        |
|    | Cisalhamento na Região A                                                        |
|   | Cisalhamento na Região A                                                        |
|  | Peeling-off + cisalhamento na Região A                                          |
|  | Cisalhamento na Região A                                                        |
|  | Cisalhamento na Região A. Houve uma perda de carga prematura na região do apoio |
|  | Cisalhamento na Região A                                                        |

Tabela 22 – Identificação do modo de falha e padrão de fissuração das vigas

| Identificação e fissuração                                                           | Modo de falha                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|    | Peeling-off                                                                |
|    | Peeling-off +<br>cisalhamento na<br>Região A                               |
|    | Falha do concreto na<br>região comprimida +<br>Cisalhamento na<br>Região A |
|   | Cisalhamento na<br>Região A                                                |
|  | Peeling-off                                                                |
|  | Peeling-off +<br>cisalhamento na<br>Região A                               |
|  | Falha do concreto na<br>região comprimida +<br>Cisalhamento na<br>Região A |

Fonte: O autor (2022)

As vigas reforçadas após o fogo com espaçamentos menores entre os laminados (150 e 75 mm) tenderam a falhar devido ao descolamento da cobertura de concreto, ver Figura 48.

Figura 48 – Detalhes da falha da viga por peeling-off



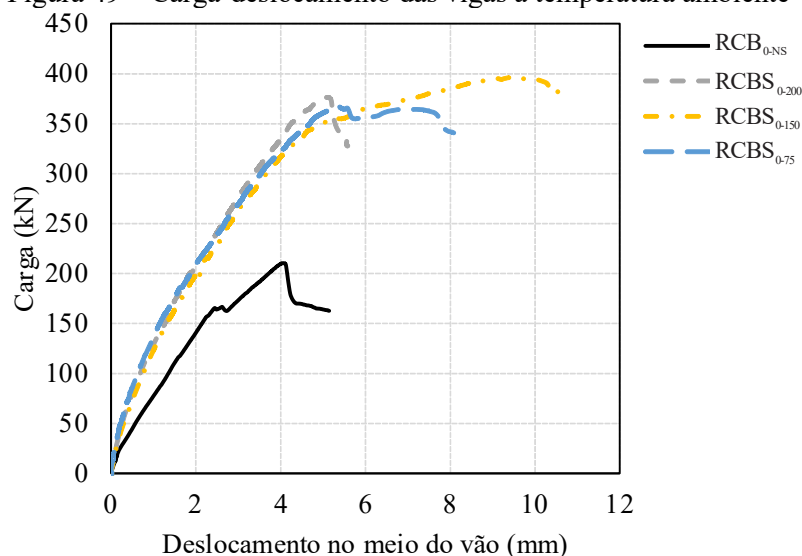
Fonte: O autor (2022)

A falha por *peeling-off* nas vigas reforçadas ao cisalhamento também foi relatada por Wiwatrojanagul et al. (2012), Dias e Barros (2013), e Haddad e Almasaeid (2016), sendo a alta taxa de reforço (espaçamentos geralmente menores do que 100 mm), e a alta temperatura no concreto antes do reforço, os fatores que podem levar a esse modo de ruptura. Nesta série experimental, a alta temperatura se mostrou mais relevante do que o espaçamento entre laminados para promover esse tipo de falha.

### 3.4.6.3 Rigidez e deformabilidade das vigas

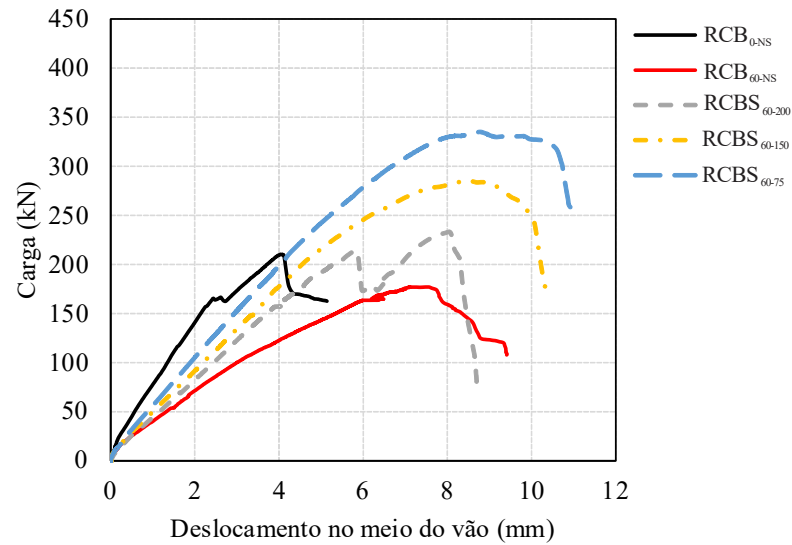
As Figuras 49 a 52 mostram as curvas carga-deslocamento das vigas submetidas ao ensaio de flexão em 3 pontos. Os dados carga-deslocamento são apresentados nos Anexos A e B para as vigas sem reforço e com reforço, respectivamente.

Figura 49 – Carga-deslocamento das vigas à temperatura ambiente



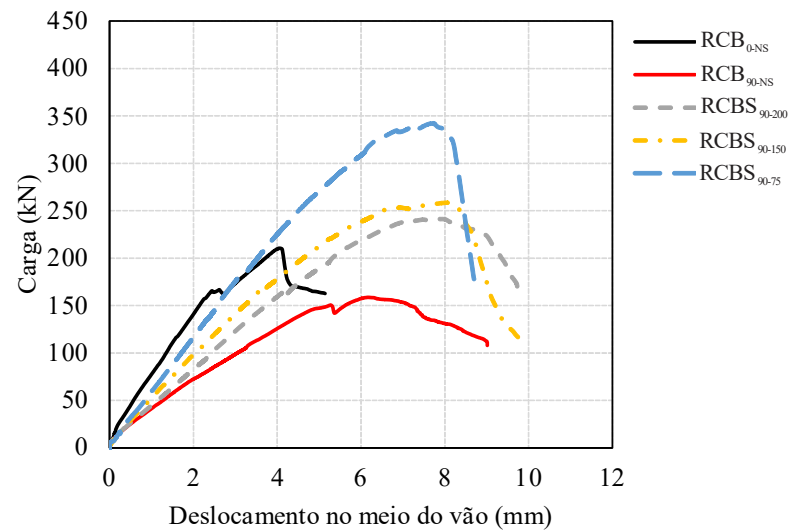
Fonte: O autor (2022)

Figura 50 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 60 min de incêndio



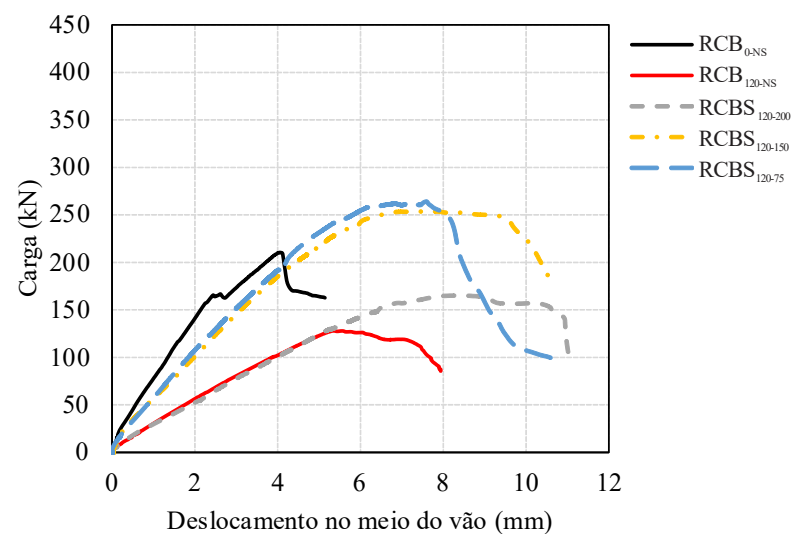
Fonte: O autor (2022)

Figura 51 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 90 min de incêndio



Fonte: O autor (2022)

Figura 52 – Carga-deslocamento das vigas reforçadas após 120 min de incêndio



Fonte: O autor (2022)

É evidente o aumento da carga e da rigidez das vigas reforçadas ao cisalhamento após o incêndio. Uma maior taxa de fortalecimento resultou em maior rigidez. Apenas o RCBS<sub>120-200</sub> não apresentou aumento de rigidez em relação ao respectivo exemplar de referência RCB<sub>120-NS</sub>, porém, apresentou aumento na capacidade de carga.

A rigidez ( $K$ ) e a deformabilidade ( $\mu$ ) das vigas, como já apresentado na metodologia, foram calculadas com base nos métodos adotados por Vu et al. (2014) e Hason et al. (2021), respectivamente. A Tabela 23 apresenta os valores determinados a partir das curvas carga-deslocamento das vigas.

Tabela 23 – Rigidez e ductibilidade das vigas

| <b>Id.</b>              | <b><math>P_{\max}</math></b><br>(kN) | <b><math>d_{\max}</math></b><br>(mm) | <b><math>d_{\text{final}}</math></b><br>(mm) | <b><math>\mu</math></b><br>- | <b><math>P_{75}</math></b><br>(kN) | <b><math>d_{75}</math></b><br>(mm) | <b><math>K</math></b><br>(kN/mm) | <b><math>K/K_{\text{amb}}</math></b><br>- |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| RCB <sub>0-NS</sub>     | 210,47                               | 4,06                                 | 4,23                                         | 1,04                         | 157,86                             | 2,29                               | 68,93                            | 1,00                                      |
| RCBS <sub>0-75</sub>    | 367,30                               | 5,36                                 | 15,40                                        | 2,88                         | 275,48                             | 3,10                               | 88,86                            | 1,29                                      |
| RCBS <sub>0-150</sub>   | 396,36                               | 9,46                                 | 10,99                                        | 1,16                         | 297,27                             | 3,61                               | 82,35                            | 1,19                                      |
| RCBS <sub>0-200</sub>   | 376,37                               | 5,12                                 | 5,60                                         | 1,09                         | 282,28                             | 3,09                               | 91,35                            | 1,33                                      |
| RCB <sub>60-NS</sub>    | 177,16                               | 7,11                                 | 9,41                                         | 1,32                         | 132,87                             | 4,47                               | 29,71                            | 0,43                                      |
| RCBS <sub>60-75</sub>   | 335,03                               | 8,79                                 | 10,78                                        | 1,23                         | 251,27                             | 5,24                               | 47,94                            | 0,70                                      |
| RCBS <sub>60-150</sub>  | 285,53                               | 8,47                                 | 10,06                                        | 1,19                         | 214,15                             | 4,95                               | 43,28                            | 0,63                                      |
| RCBS <sub>60-200</sub>  | 233,24                               | 8,04                                 | 8,70                                         | 1,08                         | 174,93                             | 4,49                               | 38,94                            | 0,56                                      |
| RCB <sub>90-NS</sub>    | 158,66                               | 6,33                                 | 9,01                                         | 1,42                         | 118,99                             | 3,63                               | 32,83                            | 0,48                                      |
| RCBS <sub>90-75</sub>   | 342,28                               | 7,73                                 | 8,32                                         | 1,08                         | 256,71                             | 4,66                               | 55,09                            | 0,80                                      |
| RCBS <sub>90-150</sub>  | 258,52                               | 8,04                                 | 8,71                                         | 1,08                         | 193,89                             | 4,44                               | 43,69                            | 0,63                                      |
| RCBS <sub>90-200</sub>  | 241,31                               | 7,87                                 | 9,28                                         | 1,18                         | 180,98                             | 4,73                               | 38,30                            | 0,56                                      |
| RCB <sub>120-NS</sub>   | 127,92                               | 5,36                                 | 7,93                                         | 1,48                         | 95,94                              | 2,85                               | 33,67                            | 0,49                                      |
| RCBS <sub>120-75</sub>  | 264,09                               | 7,59                                 | 10,61                                        | 1,40                         | 198,07                             | 4,18                               | 47,41                            | 0,69                                      |
| RCBS <sub>120-150</sub> | 253,84                               | 7,68                                 | 10,15                                        | 1,32                         | 190,38                             | 4,14                               | 45,95                            | 0,67                                      |
| RCBS <sub>120-200</sub> | 165,13                               | 8,31                                 | 10,93                                        | 1,32                         | 123,85                             | 4,99                               | 24,80                            | 0,36                                      |

Fonte: O autor (2022)

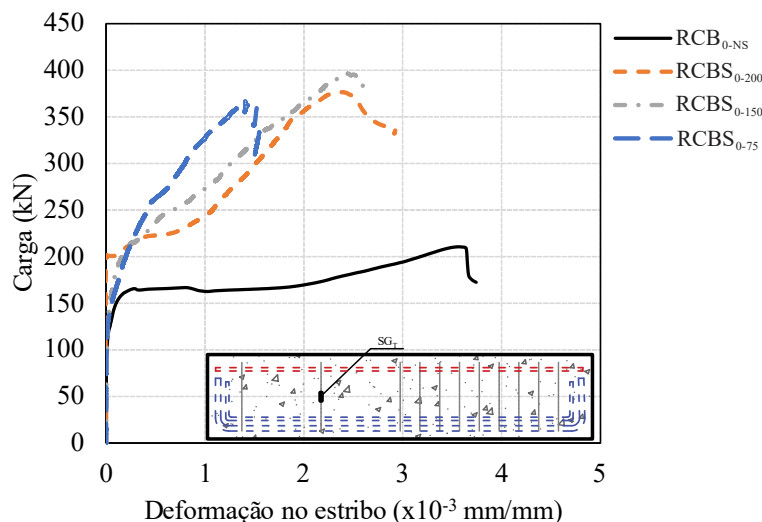
As vigas reforçadas à temperatura ambiente aumentaram a rigidez com o aumento da taxa de reforço. Após o incêndio, a perda de rigidez das vigas (RCB<sub>60-NS</sub>, RCB<sub>90-NS</sub> e RCB<sub>120-NS</sub>) foi superior a 50%, redução promovida pela redução do módulo de elasticidade do concreto pós-incêndio e da perda de aderência concreto-aço. Aumentar a taxa de reforço aumentou a rigidez das vigas após incêndio, mas não foi capaz de recuperar a rigidez inicial.

A deformabilidade das vigas após incêndio (RCB<sub>60-NS</sub>, RCB<sub>90-NS</sub> e RCB<sub>120-NS</sub>) aumentou com o tempo de exposição. O aumento da taxa de reforço diminuiu o fator de deformabilidade das vigas, mas sem perder a ductibilidade.

### 3.4.6.4 Carga vs. deformação nos estribos e laminados de CFRP

As Figuras 53 e 54 apresentam a curva carga-deformação na armadura transversal e longitudinal das vigas, respectivamente.

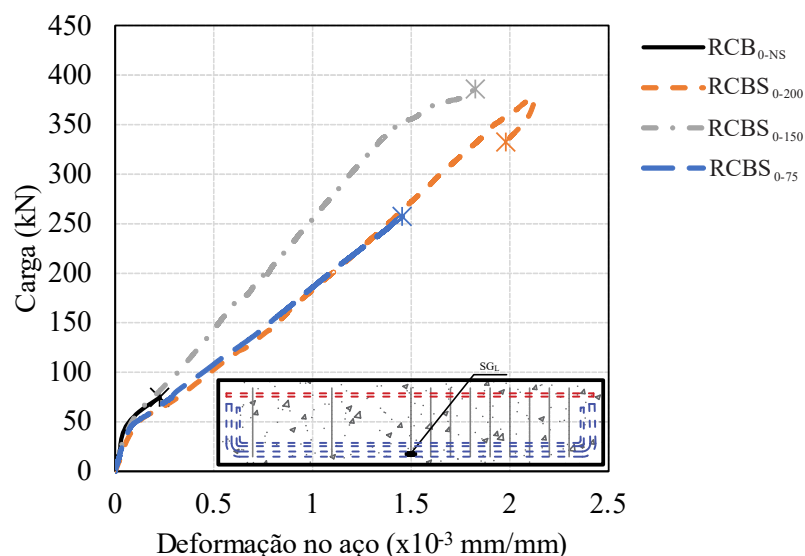
Figura 53 – Carga-deformação no estribo



Fonte: O autor (2022)

É nítida a diferença na sollicitação do estribo nas vigas, medida pela deformação do estribo. O estribo da viga sem reforço ( $RCB_{0-NS}$ ) foi mais sollicitada do que as vigas com a presença do reforço, chegando até ao processo de escoamento do aço. Nas vigas reforçadas, o estribo apresentou uma menor sollicitação quanto maior foi a taxa de laminados inseridos para reforçar. O resultado está de acordo com o observado por Dias e Barros (2013) e Shomali et al. (2020), que consideram que a presença do reforço muda o nível de sollicitação do estribo.

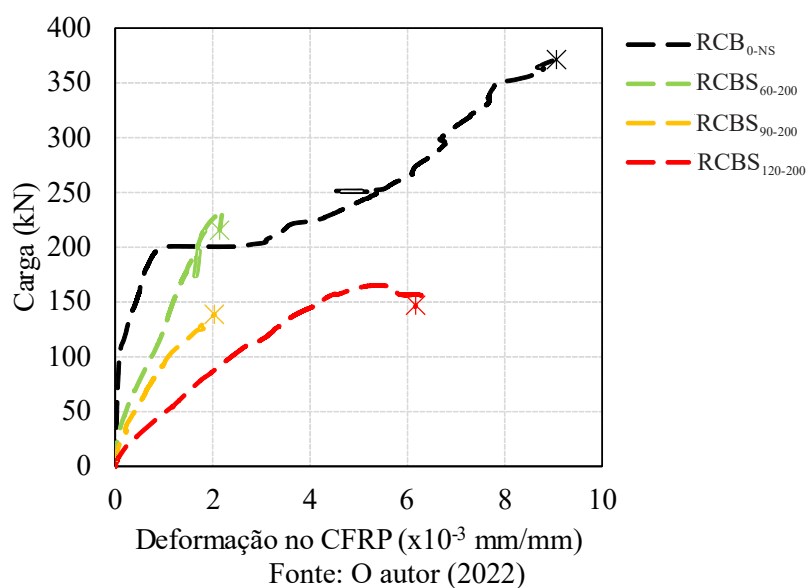
Figura 54 – Carga-deformação na armadura longitudinal



Fonte: O autor (2022)

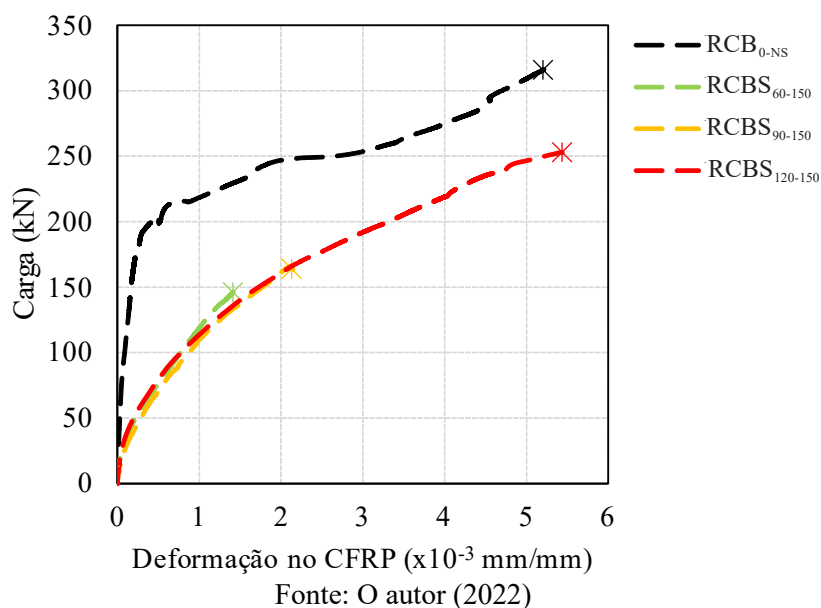
A deformação observada na armadura longitudinal (Figura 54) foi menor do que na armadura transversal. A deformação menor do que 2‰ indica que não houve escoamento da armadura longitudinal nas vigas reforçadas. Houve uma perda prematura da leitura do *strain gage* da viga RCB<sub>0-NS</sub>, e não foi possível observar uma diferença na sollicitação do aço longitudinal na presença do reforço NSM CFRP. As Figuras 55 e 56 apresentam as deformações nos laminados de CFRP em função do tempo de exposição ao incêndio para os espaçamentos de 200 e 150 mm, respectivamente.

Figura 55 – Deformação no laminado de CFRP em função do tempo de incêndio



Na Figura 55 observa-se que houve uma sollicitação diferente no laminado em função do tempo de exposição ao incêndio da viga, quanto mais exposta ao incêndio maior foi a deformação no laminado.

Figura 56 – Deformação no laminado de CFRP em função do tempo de incêndio



A diferença na solicitação dos laminados para as vigas reforçadas após incêndio com laminados a cada 200 mm, não foi observada para as vigas com laminados a cada 150 mm (Figura 56). Isso pode ter sido motivado porque uma maior taxa de reforço garante uma maior rigidez ao elemento, indicando uma tendência de uniformização na solicitação dos laminados. No entanto, foi nítida que a perda de rigidez do concreto após incêndio faz com que a viga se deforme mais para menores cargas, e consequentemente transfira a solicitação para os laminados.

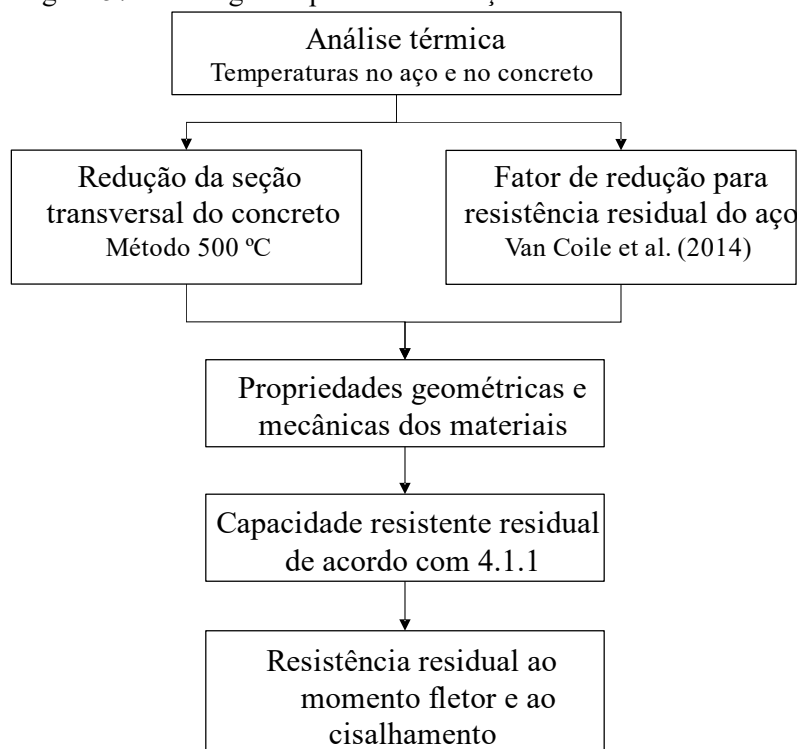
## 4 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

### 4.1 Resistência residual de vigas de concreto armado

Um procedimento é proposto para estimar a resistência residual após incêndio para o momento fletor e o cisalhamento de vigas em concreto armado. O método de cálculo é baseado no Método das Isotermas dos 500 °C (EN 1992 1-2, 2004) para resistência residual do concreto, e adota os coeficientes de redução para resistência residual ao escoamento do aço propostos por Van Coile et al. (2014), que não considera perda de resistência do aço, após incêndio, para temperaturas até 600 °C, conforme observado no programa experimental apresentado no Capítulo 3.

O Método das Isotermas de 500 °C é aplicado para situação de incêndio e não para capacidade de carga residual de vigas em concreto armado. O objetivo foi extrapolar e verificar sua aplicabilidade após incêndio. A validação foi feita com resultados experimentais de 62 vigas disponíveis na literatura, além da série experimental conduzida pelo autor. A Figura 57 apresenta um fluxograma do procedimento para determinar a resistência residual das vigas.

Figura 57 – Fluxograma para determinação da resistência residual



Fonte: O autor (2022)

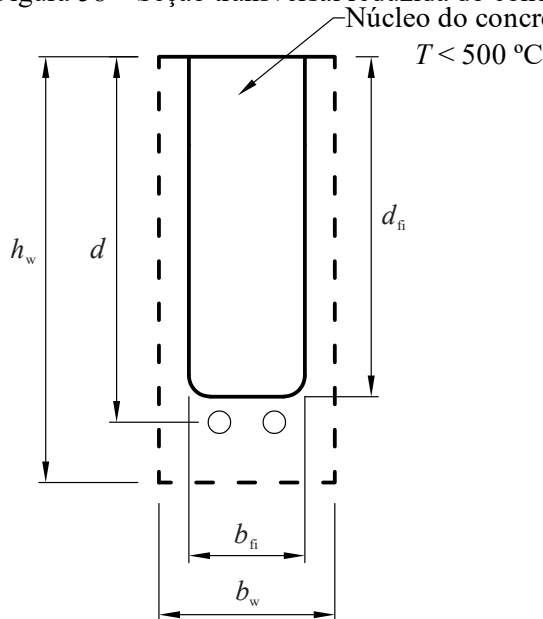
### 4.1.1 Procedimento para determinação da capacidade residual das vigas

#### 4.1.1.1 Análise térmica

Análises térmicas foram realizadas para se obter a evolução da temperatura na seção transversal determinada pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), através do *software* ABAQUS, com elementos 2D de 4 nós (DC2D4), e malha  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ . No modelo, foram considerados com o aumento da temperatura: a variação da condutividade e do calor específico do concreto (umidade de 1,5%) de acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2012), bem como, a emissividade de 0,7 e o coeficiente de transferência de calor por convecção de  $25\text{ W/m}^2\text{°C}$ .

A resistência residual para o concreto foi determinada de acordo com o Método das Isotermas dos  $500\text{ °C}$  (EN 1992 1-2, 2004). Na Figura 58 é possível identificar as variáveis para uma viga com três faces expostas ao fogo, onde  $b_{fi}$  é a largura reduzida da viga após incêndio (cm);  $d_{fi}$  é a profundidade da isoterma dos  $500\text{ °C}$  (cm);  $d_{500}$  é o menor valor entre ( $d$  e  $d_{fi}$ ) (cm).

Figura 58 – Seção transversal reduzida do concreto



Fonte: Adaptado do EN 1992 1-2 (2004).

De acordo com o Método dos  $500\text{ °C}$ , a resistência do concreto para temperaturas a partir de  $500\text{ °C}$  é desprezada, e considerada integralmente para temperaturas menores.

As armaduras de aço têm resistência reduzida por meio da utilização de fatores de redução ( $k_{sr}$ ) propostos por Van Coile et al. (2014), e foram determinados utilizando um modelo estocástico com base em resultados experimentais, conforme Tabela 24.

Tabela 24 – Fator de redução para resistência residual do aço

| $T$ (°C) | $k_{sr}$ (-) |
|----------|--------------|
| 20       | 1,0          |
| 100      | 1,0          |
| 200      | 1,0          |
| 400      | 1,0          |
| 550      | 1,0          |
| 600      | 1,0          |
| 700      | 0,7          |
| 850      | 0,6          |

Fonte: Adaptado de Van Coile et al. (2014)

As barras de aço longitudinais têm a temperatura medida no seu eixo para aplicação do respectivo fator redutor. Já as barras de aço transversais tiveram o fator de redução em função da temperatura no ponto recomendado na EN 1992 1-2 (2004) que cita a EN 1992 1-1 (2004) para encontrar a altura  $h_{c,ef}$  cujo valor é dado pela Equação 68:

$$h_{c,ef} = \min \left[ 2,5 \cdot (h_w - d_{500}), \frac{(h_w - y_\theta)}{3}, \frac{h_w}{2} \right] \quad (68)$$

onde:  $h_{c,ef}$  é a altura a partir da base da viga (cm);  $h_w$  é a altura da viga (cm);  $y_\theta$  é a posição da linha neutra após incêndio (cm).

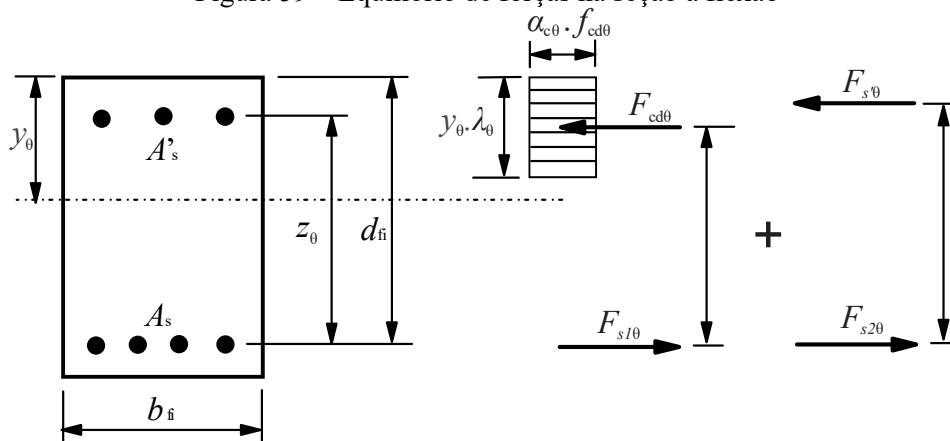
A altura ( $h_{c,ef}$ ) refere-se à região onde as primeiras fissuras de cisalhamento tendem a surgir. Outros autores como, Xiang et al. (2013), usaram a temperatura na metade da altura do estribo, e Diab (2014) e Cai et al. (2019) usaram a média ao longo da altura do estribo. A diferença entre o ponto para escolha da temperatura é marginal e não apresenta influência significativa no resultado.

#### 4.1.1.2 Resistência residual à flexão

O momento fletor residual é determinado a partir do conhecimento da profundidade da isoterma de 500 °C ( $d_{500}$ ), largura da seção de concreto reduzida ( $b_{fi}$ ), e da altura útil ( $d_{fi}$ ). A Figura 59 mostra o equilíbrio de forças das parcelas referentes ao concreto e ao aço.

Aplicando o equilíbrio de forças e de momentos na seção transversal, encontram-se as parcelas resistentes referentes ao concreto e ao aço, em procedimento análogo as orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014). Os coeficientes  $\alpha_{c\theta}$ ,  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  foram adotados iguais a 1 e  $\lambda_\theta$  igual a 0,8.

Figura 59 – Equilíbrio de forças na seção à flexão



Fonte: Adaptado de EN 1992 1-2 (2004)

#### 4.1.1.3 Resistência residual ao cisalhamento

O esforço cortante resistente após incêndio foi baseado o Modelo I sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para dimensionamento à temperatura ambiente, e segue o modelo de treliça clássica com estribos a 90° e bielas comprimidas a 45°.

Quanto à capacidade resistente ao cisalhamento, um parâmetro relevante é a relação  $(a/d)$  que pode levar à mudança no modo de ruptura por cisalhamento em vigas de concreto armado, já destacado por Nakamura et al. (2018). Em pesquisa a respeito, Plasencia et al. (2018) afirmam que a falha de vigas com relação  $(a/d < 2)$  se deu por ruptura da biela comprimida. Este comportamento também foi observado na capacidade de cisalhamento residual nos dados experimentais analisados, cuja capacidade resistente foi influenciada pela distância da carga aplicada até o apoio ( $a$ ), altura útil ( $d$ ), e o vão livre da viga ( $L$ ).

É pertinente, portanto, que as formulações considerem o vão de cisalhamento ( $\xi = a/d$ ) e a relação  $(a/L)$  nas expressões, a fim de contemplar o “efeito arco” que é promovido pela distância entre a carga aplicada e o apoio. Foi observado também que a presença de estribos muda o comportamento das vigas de concreto armado, sendo a abordagem de cálculo diferente para vigas com presença ou ausência de armadura transversal.

As equações apresentadas a seguir foram ajustadas com base na observação do comportamento experimental das vigas analisadas e contemplam as relações ( $\xi = a/d$ ) e  $(a/L)$  na formulação.

a) Vigas sem estribos ( $V_r^{ana} = V_{c0}$ )

Para  $\xi \leq 2$ , a falha ocorre na biela comprimida do concreto com valor proporcional a  $\xi$ .

$$V_{c0} = \frac{V_{Rd2}}{\xi} \quad (69)$$

Para  $2 < \xi \leq 3,5$ , a ruptura ocorre na diagonal tracionada sob influência de  $a$ .

$$V_{c\theta} = V_{c0} \cdot \xi^{-a/L} \quad (70)$$

Para  $\xi > 3,5$ , a parcela resistente do concreto não sofre influência de  $\xi$ .

$$V_{c\theta} = V_{c0} \quad (71)$$

Onde: 
$$V_{c0} = 0,6 \cdot \frac{f_{ct}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \quad (72)$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \quad (73)$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (74)$$

onde:  $V_r^{ana}$  é a força cortante residual;  $V_{Rd2}$  é a força cortante relativa à ruína da biela comprimida de concreto;  $V_{c0}$  é parcela da força cortante do concreto resistida por mecanismos complementares.

b) Vigas com estribos ( $V_r^{ana} = V_{R\theta}$ )

No caso de vigas profundas com armaduras de cisalhamento, a contribuição da armadura transversal é reduzida para  $\xi$  menores [Hayashikawa et al. (1990) apud Nakamura et al. (2018)]. As equações a seguir são utilizadas com base na relação de  $\xi$ .

Para  $\xi \leq 2$ : a parcela do cisalhamento referente ao concreto está relacionada à resistência da biela comprimida e a parcela do cisalhamento referente ao aço perde eficiência devido à proximidade da carga aplicada com o apoio

$$V_{R\theta} = \frac{V_{Rd2}}{\xi^{1+a/L}} + \frac{V_{s\theta}}{\xi} \quad (75)$$

Para  $2 < \xi \leq 3,5$ : a parcela do concreto está relacionada aos mecanismos complementares e ao aço passa a ter sua contribuição efetiva.

$$V_{R\theta} = \frac{V_{c0}}{\xi^{1-a/L}} + V_{s\theta} \quad (76)$$

Para  $\xi > 3,5$ : as parcelas resistentes do concreto e do aço não sofrem influência de  $\xi$ .

$$V_{R\theta} = V_{c0} + V_{s\theta} \quad (77)$$

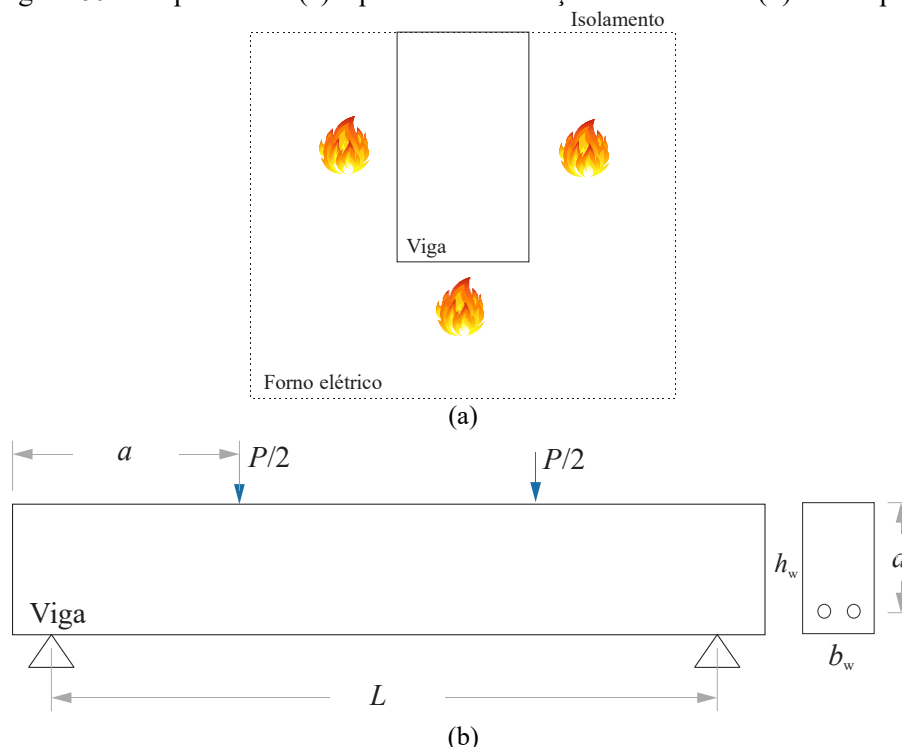
$$V_{s\theta} = \frac{A_{sw}}{s_{sw}} \cdot k_{sr} \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} \cdot d_{500} \quad (78)$$

onde:  $V_{s\theta}$  é a parcela do cortante resistida pelos estribos após incêndio. Os coeficientes  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  iguais a 1.

#### 4.1.2 Dados experimentais

Foi utilizado um banco de dados experimentais de 62 vigas disponível na literatura para avaliar o desempenho da proposta. As vigas analisadas foram aquecidas em três faces, sem carga durante a fase de aquecimento, e testadas à flexão pura após incêndio, ver Figura 60.

Figura 60 – Esquemas de (a) aquecimento da seção transversal e (b) flexão pura



Fonte: O autor (2022)

Um total de 22 vigas ensaiadas experimentalmente foram utilizadas para verificação do procedimento para determinação do momento fletor residual, ver Tabela 25. Maiores detalhes estão presentes nos trabalhos de Xu et al. (2013), Pereira et al. (2018) e Thanaraj et al. (2020).

Não foi identificada a influência da relação  $(a/d)$  na resistência residual à flexão das vigas ensaiadas. Como esperado, maiores tempos de exposição ao fogo levaram a maiores reduções de resistência, principalmente para concretos de menor resistência. A resistência à compressão do concreto também teve influência no modo de ruptura.

Um total de 40 vigas ensaiadas experimentalmente foram utilizadas na validação do procedimento para estimar a capacidade residual ao cisalhamento em vigas de concreto armado, ver Tabela 26. Os parâmetros considerados nas vigas analisadas experimentalmente foram: seção transversal, resistência à compressão do concreto, tempo de exposição ao fogo, taxa de armadura transversal ( $\rho_t$ ), taxa da armadura longitudinal ( $\rho_l$ ) e vão de cisalhamento ( $a$ ).

Tabela 25 – Identificação e características das vigas analisadas à flexão

| Ref.                   | ID.       | Seção<br>(cm × cm) | Curva-incêndio | TI<br>(min) | $f_c$<br>(MPa) | $\rho_l = \frac{A_s}{b \cdot h}$<br>% | $\rho_t = \frac{A_{sw}}{b \cdot s}$<br>% | $\xi$<br>- |
|------------------------|-----------|--------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------|
| -                      | -         | (cm × cm)          | -              | (min)       | (MPa)          | %                                     | %                                        | -          |
| Xu et al. (2013)       | L5        | 25×40              | ISO 834        | 60          | 41,2           | 1,47%                                 | 0,27%                                    | 1,51       |
| Xu et al. (2013)       | L6        | 25×40              | ISO 834        | 60          | 41,2           | 1,47%                                 | 0,27%                                    | 1,71       |
| Xu et al. (2013)       | L7        | 25×40              | ISO 834        | 60          | 41,2           | 1,47%                                 | 0,27%                                    | 2,22       |
| Xu et al. (2013)       | L9        | 25×40              | ISO 834        | 120         | 41,2           | 1,47%                                 | 0,27%                                    | 3,31       |
| Pereira et al. (2018)  | REC15_210 | 12×20              | -              | 210         | 47,6           | 0,65%                                 | 0,79%                                    | 1,43       |
| Pereira et al. (2018)  | REC30_210 | 12×20              | -              | 210         | 47,6           | 0,65%                                 | 0,79%                                    | 1,57       |
| Thanaraj et al. (2020) | M20-60    | 20×20              | ISO 834        | 60          | 27,1           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M20-120   | 20×20              | ISO 834        | 120         | 27,1           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M20-180   | 20×20              | ISO 834        | 180         | 27,1           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M20-240   | 20×20              | ISO 834        | 240         | 27,1           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M30-60    | 20×20              | ISO 834        | 60          | 37,8           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M30-120   | 20×20              | ISO 834        | 120         | 37,8           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M30-180   | 20×20              | ISO 834        | 180         | 37,8           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M30-240   | 20×20              | ISO 834        | 240         | 37,8           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M40-60    | 20×20              | ISO 834        | 60          | 47,3           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M40-120   | 20×20              | ISO 834        | 120         | 47,3           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M40-180   | 20×20              | ISO 834        | 180         | 47,3           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M40-240   | 20×20              | ISO 834        | 240         | 47,3           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M50-60    | 20×20              | ISO 834        | 60          | 56,7           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M50-120   | 20×20              | ISO 834        | 120         | 56,7           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M50-180   | 20×20              | ISO 834        | 180         | 56,7           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |
| Thanaraj et al. (2020) | M50-240   | 20×20              | ISO 834        | 240         | 56,7           | 0,39%                                 | 0,62%                                    | 1,23       |

Fonte: O autor (2022)

Tabela 26 – Identificação e características das vigas analisadas ao cisalhamento

| Ref.                 | ID.         | Seção     | Curva-incêndio | TI    | $f_c$ | $\rho_l$ | $\rho_t$ | $\xi$ | $a/L$ |
|----------------------|-------------|-----------|----------------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| -                    | -           | (cm × cm) | -              | (min) | (MPa) | (%)      | (%)      | -     | -     |
| Kumar e Kumar (2003) | V120        | 20×30     | ISO 834        | 120   | 17,1  | 0,75%    | 0,14%    | 4,4   | 0,25  |
| Kumar e Kumar (2003) | V60         | 20×30     | ISO 834        | 60    | 17,1  | 0,75%    | 0,14%    | 4,4   | 0,25  |
| Kumar e Kumar (2003) | V90         | 20×30     | ISO 834        | 90    | 17,1  | 0,75%    | 0,14%    | 4,4   | 0,25  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº17   | 30×45     | ASTM E119      | 60    | 34,7  | 2,53%    | 0,00%    | 1,5   | 0,36  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº18   | 30×45     | ASTM E119      | 180   | 34,7  | 2,53%    | 0,00%    | 1,5   | 0,36  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº2    | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 34,7  | 1,90%    | 0,00%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº27   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 60,5  | 1,90%    | 0,00%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº28   | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 62,5  | 1,90%    | 0,00%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº3    | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 34,7  | 1,90%    | 0,00%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº32   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 65,2  | 3,80%    | 0,00%    | 1,5   | 0,32  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº33   | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 66,5  | 3,80%    | 0,00%    | 1,5   | 0,32  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº8    | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 35,8  | 3,80%    | 0,00%    | 1,5   | 0,32  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº9    | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 35,8  | 3,80%    | 0,00%    | 1,5   | 0,32  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº14   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 34,7  | 1,90%    | 0,98%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº15   | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 34,7  | 1,90%    | 0,98%    | 1,5   | 0,33  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº23   | 30×45     | ASTM E119      | 180   | 34,7  | 2,53%    | 0,98%    | 1,5   | 0,36  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº11   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 35,8  | 3,80%    | 0,00%    | 4,0   | 0,41  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº12   | 20×30     | ASTM E119      | 180   | 35,8  | 3,80%    | 0,00%    | 4,0   | 0,41  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº20   | 30×45     | ASTM E119      | 60    | 35,8  | 5,47%    | 0,00%    | 4,0   | 0,44  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº21   | 30×45     | ASTM E119      | 180   | 35,8  | 5,47%    | 0,00%    | 4,0   | 0,44  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº30   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 71,6  | 1,90%    | 0,00%    | 4,0   | 0,42  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº35   | 20×30     | ASTM E119      | 60    | 65,7  | 3,80%    | 0,00%    | 4,0   | 0,41  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº25   | 30×45     | ASTM E119      | 180   | 35,8  | 5,47%    | 0,52%    | 4,0   | 0,44  |
| Xu et al. (2013)     | L4          | 25×40     | ISO 834        | 60    | 41,2  | 1,47%    | 0,00%    | 2,2   | 0,36  |
| Xu et al. (2015)     | L4          | 20×30     | ISO 834        | 60    | 51,5  | 3,27%    | 0,17%    | 2,7   | 0,50  |
| Song et al. (2020)   | B5-2.1-f120 | 25×40     | ISO 834        | 120   | 31,6  | 1,96%    | 0,00%    | 2,1   | 0,21  |

Tabela 26 – Identificação e características das vigas analisadas ao cisalhamento

| <b>Ref.</b>        | <b>ID.</b>  | <b>Seção</b> | <b>Curva-<br/>incêndio</b> | <b>TI</b> | <b><math>f_c</math></b> | <b><math>\rho_l</math></b> | <b><math>\rho_t</math></b> | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>a/L</math></b> |
|--------------------|-------------|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| -                  | -           | (cm × cm)    | -                          | (min)     | (MPa)                   | (%)                        | (%)                        | -                       | -                       |
| Song et al. (2020) | B5-2.1-f60  | 25×40        | ISO 834                    | 60        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,00%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B5-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,00%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B6-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,61%                      | 0,00%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B7-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,47%                      | 0,00%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B4-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,20%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B1-2.1-f120 | 25×40        | ISO 834                    | 120       | 31,6                    | 1,96%                      | 0,27%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B1-2.1-f60  | 25×40        | ISO 834                    | 60        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,27%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B1-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,27%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B2-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,61%                      | 0,27%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B3-2.1-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,47%                      | 0,27%                      | 2,1                     | 0,21                    |
| Song et al. (2020) | B5-2.6-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,00%                      | 2,6                     | 0,26                    |
| Song et al. (2020) | B1-2.6-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,27%                      | 2,6                     | 0,26                    |
| Song et al. (2020) | B5-3.3-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,00%                      | 3,3                     | 0,32                    |
| Song et al. (2020) | B1-3.3-f90  | 25×40        | ISO 834                    | 90        | 31,6                    | 1,96%                      | 0,27%                      | 3,3                     | 0,32                    |

Fonte: O autor (2021)

### 4.1.3 Resultados e discussão

#### 4.1.3.1 Resistência residual à flexão

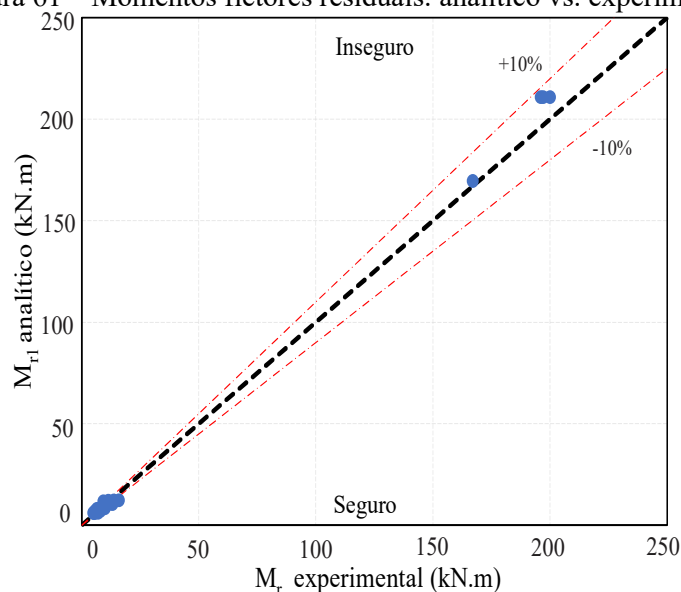
A Tabela 27 apresenta os resultados encontrados para a resistência residual ao momento fletor e as relações  $M_{r1}^{ana}/M_r^{exp}$  entre o procedimento analítico e os dados experimentais.

| Tabela 27 – Resultados analítico e experimental para momento fletor |           |                       |                          |                          |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Referência                                                          | Id.       | $M_r^{exp}$<br>(kN.m) | $M_{r1}^{ana}$<br>(kN.m) | $M_{r1}^{ana}/M_r^{exp}$ |
| -                                                                   | -         | -                     | -                        | -                        |
| Xu et al. (2013)                                                    | L5        | 196,0                 | 210,9                    | 1,08                     |
| Xu et al. (2013)                                                    | L6        | 200,0                 | 210,9                    | 1,05                     |
| Xu et al. (2013)                                                    | L7        | 197,0                 | 210,9                    | 1,07                     |
| Xu et al. (2013)                                                    | L9        | 167,0                 | 169,6                    | 1,02                     |
| Pereira et al. (2018)                                               | REC15_210 | 13,1                  | 10,5                     | 0,80                     |
| Pereira et al. (2018)                                               | REC30_210 | 12,2                  | 10,6                     | 0,87                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M20-60    | 9,2                   | 11,8                     | 1,28                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M20-120   | 6,5                   | 8,1                      | 1,24                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M20-180   | 5,6                   | 6,9                      | 1,23                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M20-240   | 5,2                   | 6,0                      | 1,16                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M30-60    | 11,3                  | 12,0                     | 1,06                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M30-120   | 7,5                   | 8,2                      | 1,09                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M30-180   | 5,8                   | 7,0                      | 1,21                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M30-240   | 4,9                   | 6,1                      | 1,24                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M40-60    | 13,6                  | 12,2                     | 0,89                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M40-120   | 8,7                   | 8,3                      | 0,95                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M40-180   | 7,0                   | 7,1                      | 1,01                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M40-240   | 5,5                   | 6,2                      | 1,12                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M50-60    | 15,8                  | 12,3                     | 0,78                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M50-120   | 9,8                   | 8,3                      | 0,85                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M50-180   | 8,0                   | 7,1                      | 0,89                     |
| Thanaraj et al. (2020)                                              | M50-240   | 6,9                   | 6,2                      | 0,90                     |
| Média                                                               |           |                       |                          | 1,04                     |
| Desvio Padrão                                                       |           |                       |                          | 0,15                     |
| Intervalo de confiança (IC)                                         |           |                       |                          | 0,98–1,08                |

Fonte: O autor (2021)

Os resultados analítico-experimental compilados na Tabela 27 resultam em uma relação média  $M_{r1}^{ana}/M_r^{exp}$  de 1,04 com um desvio padrão de 0,15. O intervalo de confiança foi determinado com nível de confiança de 95%. A Figura 61 mostra as resistências residuais comparadas aos resultados experimentais com uma margem de segurança adotada de  $\pm 10\%$ .

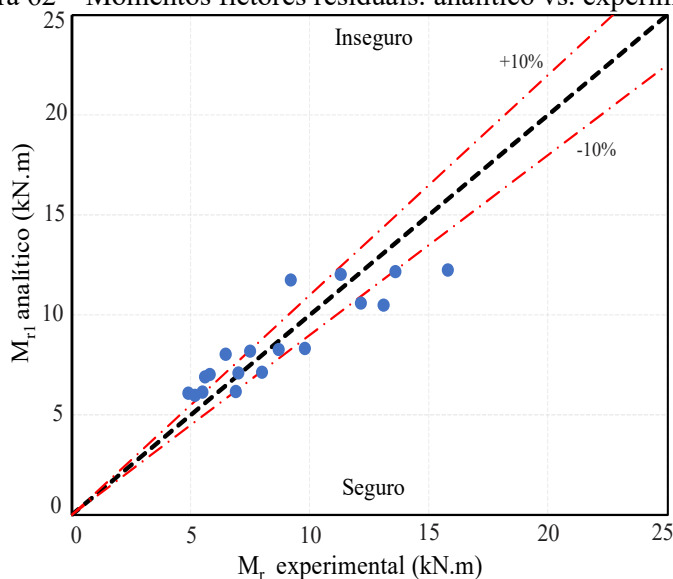
Figura 61 – Momentos fletores residuais: analítico vs. experimental.



Fonte: O autor (2022)

A Figura 62 apresenta os resultados sem os dados de Xu et al. (2013), o que permite analisar com maiores detalhes o grupo de vigas que tiveram uma carga de ruptura menor e que consistem na maior parte dos dados.

Figura 62 – Momentos fletores residuais: analítico vs. experimental.

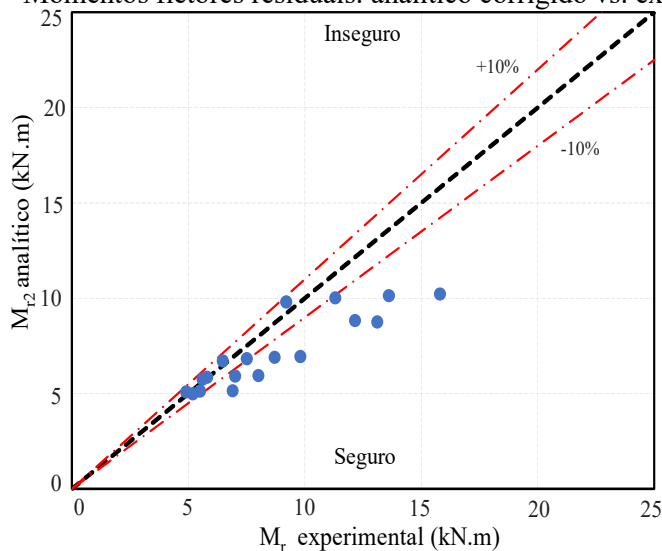


Fonte: O autor (2022)

Destaca-se que 14 vigas apresentaram relação  $M_{r1}^{ana}/M_r^{exp}$  superior a 1, com valor médio de 1,13. Segundo Coelho et al. (2015), embora isso possa indicar que os resultados são menos seguros, eles convergem com a filosofia apresentada nos eurocódigos, onde um modelo de cálculo deve prever o fenômeno em sua média, sendo a segurança do modelo proporcionada por fatores de redução.

É sugerido, então, a proposição de um fator de redução  $\gamma_M$  de 1,2 para atender ao requisito de segurança do modelo, resultando em uma relação média  $M_{r2}^{ana}/M_r^{exp}$  de 0,86 com um desvio padrão de 0,13. A Figura 63 apresenta os resultados corrigidos pelo coeficiente.

Figura 63 – Momentos fletores residuais: analítico corrigido vs. experimental.



Fonte: O autor (2022)

Um total de 5 vigas (22,72%) apresentaram resultados analíticos com relação  $M_{r2}^{ana}/M_r^{exp}$  superior a 1, com valor médio de 1,04, e coeficiente de variação de 1,92%. Nenhum valor superior a margem de segurança adotada de 1,10. Portanto, o procedimento analítico para mensurar o momento fletor residual em vigas de concreto armado após incêndio, apesar de simplificado, apresentou capacidade de prever a resistência à flexão de vigas após incêndio.

#### 4.1.3.2 Resistência residual ao cisalhamento

A Tabela 28 apresenta os resultados encontrados para resistência residual ao cisalhamento determinado pelo procedimento analítico proposto, os resultados são comparados aos resultados experimentais através da relação  $V_r^{ana}/V_r^{exp}$ .

Tabela 28 – Resultados analítico e experimental para o esforço cortante

| Referência           | Id.       | $V_r^{exp}$<br>(kN) | $V_r^{ana}$<br>(kN) | $V_r^{ana}/V_r^{exp}$ |
|----------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| -                    | -         | -                   | -                   | -                     |
| Kumar e Kumar (2003) | V120      | 47,4                | 45,9                | 0,97                  |
| Kumar e Kumar (2003) | V60       | 71,9                | 71,7                | 1,00                  |
| Kumar e Kumar (2003) | V90       | 61,9                | 55,0                | 0,89                  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº17 | 468,3               | 484,1               | 1,03                  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº18 | 279,0               | 387,3               | 1,39                  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº2  | 213,9               | 209,8               | 0,98                  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº27 | 337,5               | 321,9               | 0,95                  |
| Hsu e Lin (2008)     | test nº28 | 229,5               | 136,7               | 0,60                  |

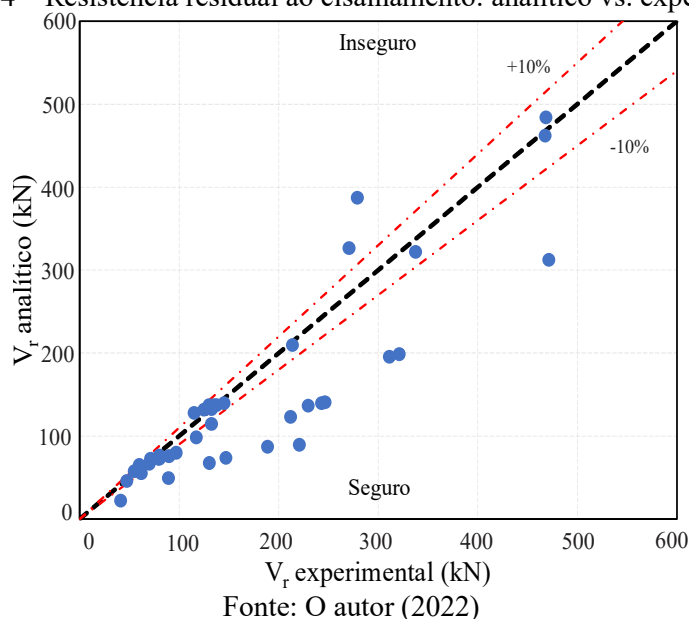
Tabela 28 – Resultados analítico e experimental para o esforço cortante

| Referência                  | Id.         | $V_r^{exp}$<br>(kN) | $V_r^{ana}$<br>(kN) | $V_r^{ana}/V_r^{exp}$ |
|-----------------------------|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| -                           | -           | -                   | -                   | -                     |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº3    | 188,8               | 87,1                | 0,46                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº32   | 471,4               | 312,3               | 0,66                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº33   | 246,5               | 140,5               | 0,57                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº8    | 321,0               | 198,8               | 0,62                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº9    | 220,7               | 89,4                | 0,41                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº14   | 270,6               | 326,4               | 1,21                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº15   | 243,1               | 139,7               | 0,57                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº23   | 467,6               | 462,3               | 0,99                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº11   | 89,2                | 49,27               | 0,55                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº12   | 41,3                | 22,17               | 0,54                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº20   | 211,9               | 123,17              | 0,58                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº21   | 117,2               | 98,54               | 0,84                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº30   | 89,8                | 75,81               | 0,84                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº35   | 130,3               | 67,55               | 0,52                  |
| Hsu e Lin (2008)            | test nº25   | 311,1               | 195,6               | 0,63                  |
| Xu et al. (2013)            | L4          | 97,0                | 80,0                | 0,82                  |
| Xu et al. (2015)            | L4          | 147,0               | 50,4                | 0,34                  |
| Song et al. (2020)          | B5-2.1-f120 | 60,0                | 65,1                | 1,08                  |
| Song et al. (2020)          | B5-2.1-f60  | 80,0                | 76,6                | 0,96                  |
| Song et al. (2020)          | B5-2.1-f90  | 71,3                | 72,8                | 1,02                  |
| Song et al. (2020)          | B6-2.1-f90  | 79,0                | 72,8                | 0,92                  |
| Song et al. (2020)          | B7-2.1-f90  | 80,0                | 72,8                | 0,91                  |
| Song et al. (2020)          | B4-2.1-f90  | 132,5               | 114,7               | 0,87                  |
| Song et al. (2020)          | B1-2.1-f120 | 132,5               | 132,4               | 1,00                  |
| Song et al. (2020)          | B1-2.1-f60  | 145,0               | 139,8               | 0,96                  |
| Song et al. (2020)          | B1-2.1-f90  | 137,5               | 137,3               | 1,00                  |
| Song et al. (2020)          | B2-2.1-f90  | 135,0               | 137,3               | 1,02                  |
| Song et al. (2020)          | B3-2.1-f90  | 130,0               | 137,3               | 1,06                  |
| Song et al. (2020)          | B5-2.6-f90  | 70,0                | 66,4                | 0,95                  |
| Song et al. (2020)          | B1-2.6-f90  | 125,0               | 131,9               | 1,06                  |
| Song et al. (2020)          | B5-3.3-f90  | 55,0                | 57,5                | 1,05                  |
| Song et al. (2020)          | B1-3.3-f90  | 115,0               | 128,1               | 1,10                  |
| Média                       |             |                     |                     | 0,85                  |
| Desvio Padrão               |             |                     |                     | 0,23                  |
| Intervalo de confiança (IC) |             |                     |                     | 0,78–0,92             |

Fonte: O autor (2022)

Analisando os dados da Tabela 28 é possível encontrar uma relação média de  $V_r^{ana}/V_r^{exp}$  de 0,85 e um desvio padrão médio de 0,23. O intervalo de confiança foi determinado com nível de confiança de 95%. A Figura 64 apresenta os resultados encontrados experimental e analiticamente para todas as vigas analisadas.

Figura 64 – Resistência residual ao cisalhamento: analítico vs. experimental.



Um total de 47,5% das vigas estão dentro do intervalo  $V_r^{\text{ana}}/V_r^{\text{exp}}$  de 0,90 e 1,10. Apenas duas vigas (5%) se destacaram contra a segurança ( $V_r^{\text{ana}}/V_r^{\text{exp}} > 1,1$ ): as amostras “test nº14” e “test nº18”.

Os resultados se mostraram mais conservadores para amostras submetidas a tempos de incêndio mais altos (180 min), no entanto, devido ao modo de falha por cisalhamento ser brusco e indesejável, é prudente que o procedimento tenha essa premissa. O procedimento analítico, portanto, conseguiu estimar com razoável precisão e a favor da segurança a capacidade resistente residual ao cisalhamento de vigas em concreto armado após incêndio.

## 4.2 Dimensionamento do reforço à temperatura ambiente

Um procedimento foi proposto com base nos modelos de aderência CFRP-Adesivo-concreto disponíveis na literatura, e na formulação de Bui e Stitmannathum (2020) para dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado. O procedimento é validado com base em resultados experimentais disponíveis na literatura e o desempenho é comparado a quatro modelos analíticos, a saber: Dias (2008), Bianco et al. (2014), Mofidi et al. (2018), e Bui e Stitmannathum (2020).

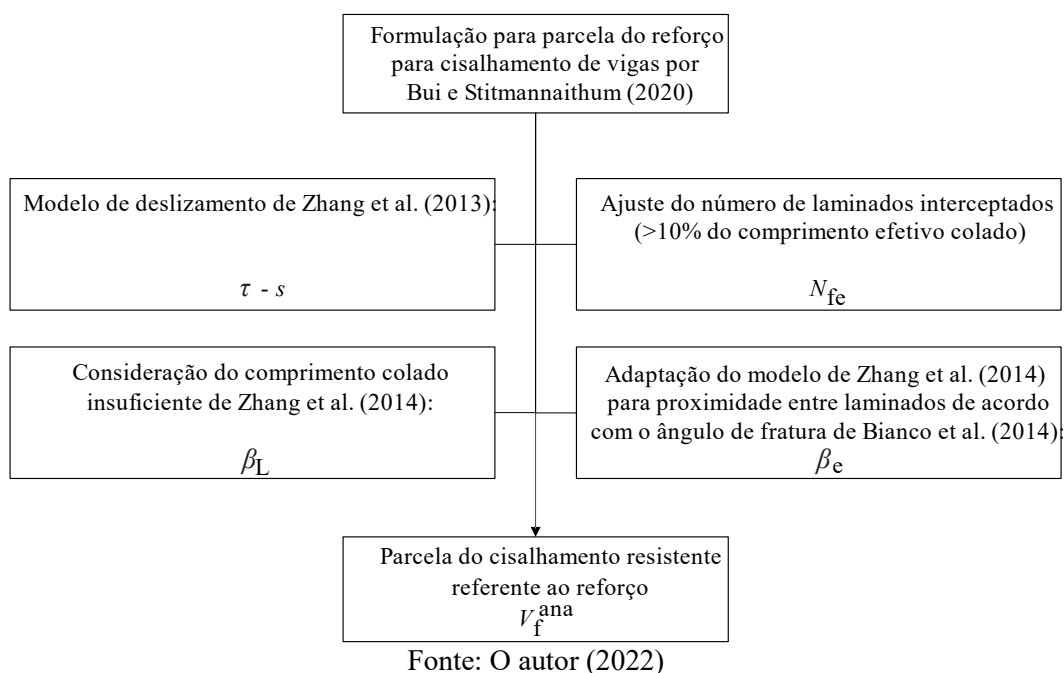
### 4.2.1 Procedimento para dimensionamento

O procedimento simplificado tem como base a proposta analítica de Bui e Stitmannathum (2020). O modelo de deslizamento de Zhang et al. (2013) foi adotado para determinar a tensão média de aderência ( $\tau_b$ ) e os deslizamentos na tensão de pico ( $s_m$ ) e na

tensão de descolamento ( $s_f$ ). O método considera a quantidade de laminados interceptados pela fissura diagonal de cisalhamento, do comprimento insuficiente do laminado colado (ZHANG et al., 2014), e o efeito da proximidade entre os laminados considerando o ângulo que define a superfície de fratura usado por Bianco et al. (2014).

A Figura 65 apresenta o procedimento e as considerações introduzidas para o cálculo da contribuição do reforço nas vigas de concreto armado.

Figura 65 – Fluxograma para o procedimento de dimensionamento do reforço



A equação 79 usada para contribuição ao cisalhamento é apresentada como uma modificação da formulação de Bui e Stitmannathum (2020), realizada a partir das considerações elencadas e descritas a seguir. Todas as expressões estão de acordo com o Sistema Internacional de unidades: comprimento (mm) e força (N).

$$V_f^{ana} = 2 \cdot N_{fe} \cdot \beta_L \cdot \beta_e \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \frac{p_r}{E_f \cdot A_f}} \quad (79)$$

Onde:  $N_{fe}$  é a quantidade de laminados interceptados que tenham no mínimo 10% do comprimento colado efetivo ( $L_e$ );  $\beta_L$  é o fator de redução que contempla os laminados que tenham comprimento colado inferior a  $L_e$ ;  $\beta_e$  é o fator de redução que considera o efeito entre laminados adjacentes;  $G_f$  é a energia de fratura interfacial;  $p_r$  é o perímetro do laminado.

O modelo de deslizamento proposto por Zhang et al. (2013) é baseado no modo de falha por coesão no concreto perto da interface epóxi-concreto, e representado pela Equação (80). As

dimensões da ranhura (ou seja, espessura  $a_g$  e a largura  $b_g$ ) e a resistência do concreto à compressão ( $f_c$ ) são parâmetros de entrada.

$$\tau(s) = A \cdot \left( \frac{2 \cdot B - s}{B} \right)^2 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2 \cdot B - s}{B} \right) \quad \text{para } s \leq 2 \cdot B \quad (80)$$

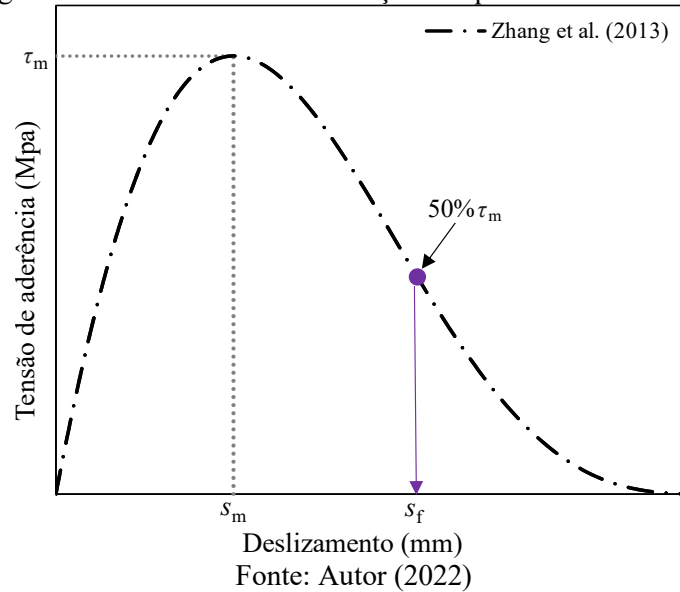
$$\gamma = \frac{b_g}{a_g} \quad (81)$$

$$A = 0,72 \cdot \gamma^{0,138} \cdot f_c^{0,613} \quad (82)$$

$$B = 0,37 \cdot \gamma^{0,284} \cdot f_c^{0,006} \quad (83)$$

Adotada a relação  $\tau - s$  proposta por Zhang et al. (2013), é possível identificar a tensão de aderência média ( $\tau_b$ ), a tensão de aderência máxima ( $\tau_m$ ), o deslizamento no pico de tensão ( $s_m$ ), e o deslizamento na descolagem ( $s_f$ ), indicados na Figura 66. Sendo o deslizamento na descolagem referente ao valor correspondente à tensão residual observado por Cruz et al. (2020) que é de 50% da tensão de pico na curva descendente.

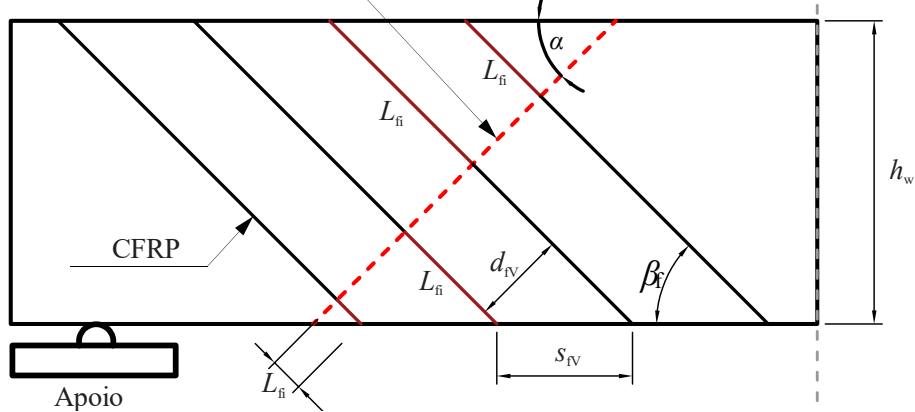
Figura 66 – Curva "τ-s": identificação dos parâmetros de entrada



A quantidade de laminados ( $N_f$ ) interceptados pela fissura diagonal na falha por cisalhamento pode ser identificada na Figura 67, e determinada pela Equação (84) já utilizada em Dias (2008), Bianco et al. (2014) e Bui e Stitmannathum (2020):

$$N_f = \text{round off} \left[ h_w \cdot \frac{(\cot(\beta_f) + \cot(\alpha))}{s_{fv}} \right] \quad (84)$$

Figura 67 – Identificação dos laminados interceptados e parâmetros  
Fissura diagonal de cisalhamento



Fonte: O autor (2022)

O comprimento de cada laminado interceptado é determinado pela Equação (85), que é análoga à proposta por Bui e Stitmannathum (2020):

$$L_{fi} = \min \left( i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)}, L_f - i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)} \right) \quad (85)$$

$$L_f = \frac{h_w}{\sin(\beta_f)} \quad (86)$$

Os laminados efetivamente interceptados pela fissura de cisalhamento e responsáveis por resistir ( $N_{fe}$ ) são aqueles que tenham comprimentos colados maiores do que 10% de  $L_e$ . Identificado o comprimento de cada laminado interceptado é possível determinar o comprimento médio desses laminados ( $L_{fim}$ ).

A energia de fratura interfacial ( $G_f$ ) dada pela Equação (87), definida em Bui e Stitmannathum (2020), é função dos parâmetros  $A_b$  e  $B_b$  que dependem de  $L_{fim}$ ,  $p_r$ ,  $\tau_b$ ,  $s_m$  e  $s_f$ .

$$G_f = \frac{E_f \cdot A_f}{p_r} \cdot A_b^2 \cdot \left( \frac{1}{2} e^{-2 \cdot s_f \cdot B_b} - e^{-s_f \cdot B_b} + \frac{1}{2} \right) \quad (87)$$

$$p_r = 2 \cdot (a_f + b_f) \quad (88)$$

$$B_b = \frac{\ln(2)}{s_m} \quad (89)$$

$$A_b = \frac{p_r \cdot \tau_b \cdot L_{fim}}{E_f \cdot A_f \cdot (1 - e^{-B_b \cdot s_f})} \quad (90)$$

O comprimento colado efetivo ( $L_e$ ) é determinado pela Equação (91) dada em Zhang et al. (2014):

$$L_e = \frac{1,66}{\eta} \quad (91)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_b^2 \cdot C_{falha}}{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot A_f}} \quad (92)$$

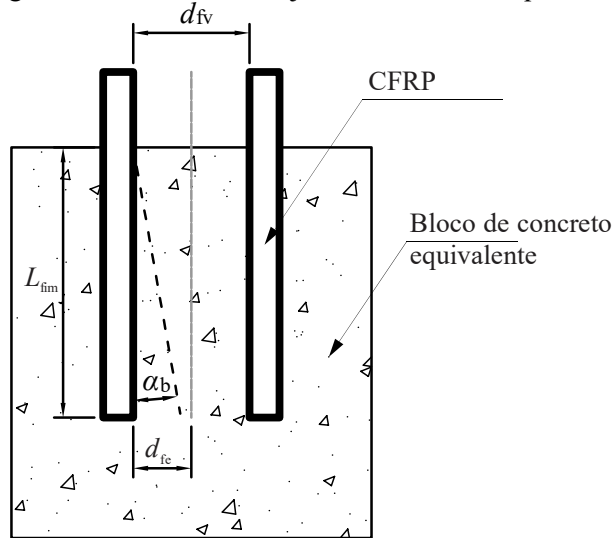
$$C_{falha} = 2 \cdot (b_f + 1) + (a_f + 1) \quad (93)$$

O fator de redução  $\beta_L$  é determinado conforme Equação (94) recomendada por Zhang et al. (2014), utilizando o comprimento colado médio do laminado ( $L_{fim}$ ) encontrado segundo Bui e Stitmannathum (2020):

$$\beta_L = \begin{cases} \frac{L_{fim}}{L_e} (2,08 - 1,08 \cdot \frac{L_{fim}}{L_e}), & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} \geq 1 \end{cases} \quad (94)$$

O fator de redução referente à proximidade entre laminados adjacentes ( $\beta_e$ ) é identificado na Figura 68. Para o cálculo de  $\beta_e$  foi considerada a distância perpendicular livre entre laminados ( $d_{fv}$ ) e a distância limite para um laminado exercer influência no laminado adjacente ( $d_{fe}$ ), dadas pelas Equações (95–97).

Figura 68 – Laminados adjacentes no bloco equivalente



Fonte: O autor (2022)

$$d_{fv} = (s_{fv} - a_g) \cdot \sin(\beta_f) \quad (95)$$

$$d_{fe} = L_{fim} \cdot \tan(\alpha_b) \quad (96)$$

$$\beta_e = \begin{cases} \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}}, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} \geq 1 \end{cases} \quad (97)$$

onde  $\alpha_b$  é o ângulo 28,5° sugerido por Bianco et al. (2014).

#### **4.2.2 *Dados experimentais***

A análise de desempenho da proposta é realizada comparando os resultados analiticamente cálculos e os resultados experimentais disponíveis na literatura. Resultados de sete autores contemplando 70 resultados experimentais de vigas em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP usando a técnica NSM são utilizados. Todas as vigas utilizadas falharam por cisalhamento e os parâmetros estudados experimentalmente foram seção transversal (retangular e T), resistência à compressão do concreto, espaçamento e inclinação do laminado.

A Tabela 29 compila os trabalhos experimentais utilizados para fins de comparação com os modelos analíticos e os respectivos dados de entrada necessários para aplicação dos procedimentos de cálculo dos autores, resistência ao cortante experimental, seção transversal e identificação dos modos de ruptura.

Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental

| <b>Autor</b>              | <b>Id.</b>       | <b>CS</b> | $\alpha$<br>° | $\beta_f$<br>° | $a_f$<br>mm | $b_f$<br>mm | $s_{fv}$<br>mm | $\rho_f$<br>% | $E_f$<br>GPa | $f_{fu}$<br>MPa | $a_g$<br>mm | $b_g$<br>mm | $f_c$<br>MPa | $b_w$<br>mm | $h_w$<br>mm | $d$<br>mm | $\rho_s$<br>% | $V_f^{exp}$<br>kN | <b>Falha</b><br>- |
|---------------------------|------------------|-----------|---------------|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| Al Rjoub<br>et al. (2019) | CS20–<br>S80–I0  | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 80             | 0,63          | 165          | 3100            | 7,0         | 20,0        | 32,4         | 150         | 200         | 163       | 0,40          | 37,5              | P                 |
| Al Rjoub<br>et al. (2019) | CS20–<br>S80–I45 | RT        | 45            | 45             | 2,5         | 15          | 80             | 0,88          | 165          | 3100            | 7,0         | 20,0        | 32,4         | 150         | 200         | 163       | 0,40          | 62                | P                 |
| Al Rjoub<br>et al. (2019) | CS30–<br>S80–I0  | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 80             | 0,63          | 165          | 3100            | 7,0         | 20,0        | 32,4         | 150         | 200         | 153       | 0,40          | 35                | P                 |
| Al Rjoub<br>et al. (2019) | CS40–<br>S80–I0  | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 80             | 0,63          | 165          | 3100            | 7,0         | 20,0        | 32,4         | 150         | 200         | 143       | 0,40          | 52,5              | P                 |
| Barros<br>e Dias (2006)   | B10-IL           | RT        | 45            | 45             | 1,4         | 10          | 150            | 0,18          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 56           | 150         | 150         | 123       | 0             | 23,2              | P                 |
| Barros<br>e Dias (2006)   | B10-VL           | RT        | 45            | 90             | 1,4         | 10          | 100            | 0,19          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 56           | 150         | 150         | 123       | 0             | 28,6              | P                 |
| Barros<br>e Dias (2006)   | B12-IL           | RT        | 45            | 45             | 1,4         | 10          | 75             | 0,35          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 56           | 150         | 150         | 123       | 0             | 36,4              | P                 |
| Barros<br>e Dias (2006)   | B12-VL           | RT        | 45            | 90             | 1,4         | 10          | 50             | 0,37          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 56           | 150         | 150         | 123       | 0             | 31,8              | P                 |
| Barros<br>e Dias (2006)   | A10-VL           | RT        | 45            | 90             | 1,4         | 10          | 200            | 0,09          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 49,2         | 150         | 300         | 273       | 0             | 29,1              | SL                |
| Barros<br>e Dias (2006)   | A12-VL           | RT        | 45            | 90             | 1,4         | 10          | 100            | 0,19          | 150          | 2200            | 5,0         | 12,0        | 49,2         | 150         | 300         | 273       | 0             | 59,3              | SL                |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S45-6a           | RT        | 45            | 45             | 2,5         | 15          | 115            | 0,46          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 22,9         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 77,1              | P                 |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S45-6b           | RT        | 45            | 45             | 2,5         | 15          | 115            | 0,46          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 28,4         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 106,4             | P                 |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S90-6a           | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 115            | 0,33          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 26,6         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 75,8              | P                 |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S90-6b           | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 115            | 0,33          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 24,0         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 38,9              | P                 |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S45-3a           | RT        | 45            | 45             | 2,5         | 15          | 230            | 0,23          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 29,1         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 58,1              | <i>Shear</i>      |
| Cisneros<br>et al. (2012) | S45-3b           | RT        | 45            | 45             | 2,5         | 15          | 230            | 0,23          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 23,9         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 98                | <i>Shear</i>      |

Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental

| <b>Autor</b>           | <b>Id.</b> | <b>CS</b> | $\alpha$<br>° | $\beta_f$<br>° | $a_f$<br>mm | $b_f$<br>mm | $s_{fv}$<br>mm | $\rho_f$<br>% | $E_f$<br>GPa | $f_{fu}$<br>MPa | $a_g$<br>mm | $b_g$<br>mm | $f_c$<br>MPa | $b_w$<br>mm | $h_w$<br>mm | $d$<br>mm | $\rho_s$<br>% | $V_f^{exp}$<br>kN | <b>Falha</b><br>- |
|------------------------|------------|-----------|---------------|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| Cisneros et al. (2012) | S90-3a     | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 230            | 0,16          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 22,8         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 10,5              | <i>Shear</i>      |
| Cisneros et al. (2012) | S90-3b     | RT        | 45            | 90             | 2,5         | 15          | 230            | 0,16          | 165          | 2500            | 7,0         | 20,0        | 26,0         | 200         | 350         | 310       | 0,12          | 20,4              | <i>Shear</i>      |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-6LI60-c | T         | 27            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 42,7              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 4S-6LI60-c | T         | 30            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 35,2              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-3LI60-a | T         | 33            | 60             | 1,4         | 10          | 325            | 0,06          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 35,4              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-5LI60-a | T         | 36            | 60             | 1,4         | 10          | 195            | 0,09          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 61,3              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-3LV-a   | T         | 40            | 90             | 1,4         | 10          | 267            | 0,06          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 15,7              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-4LI45-c | T         | 40            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 33,9              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-4LI60-c | T         | 40            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 33,1              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-5LV-a   | T         | 40            | 90             | 1,4         | 10          | 160            | 0,10          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 40,3              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 4S-4LI45-c | T         | 40            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 26                | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 4S-4LI60-c | T         | 40            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 25,2              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-3LI45-a | T         | 45            | 45             | 1,4         | 10          | 367            | 0,06          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 37,9              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-4LI45-b | T         | 45            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 53,4              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-4LI60-b | T         | 45            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 49,6              | CF                |
| Dias e Barros (2013)   | 2S-4LV-b   | T         | 45            | 90             | 1,4         | 9,5         | 180            | 0,08          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 20,2              | CF                |

Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental

| Autor                | Id.         | CS | $\alpha$<br>° | $\beta_f$<br>° | $a_f$<br>mm | $b_f$<br>mm | $s_{fv}$<br>mm | $\rho_f$<br>% | $E_f$<br>GPa | $f_{fu}$<br>MPa | $a_g$<br>mm | $b_g$<br>mm | $f_c$<br>MPa | $b_w$<br>mm | $h_w$<br>mm | $d$<br>mm | $\rho_s$<br>% | $V_f^{exp}$<br>kN | Falha               |
|----------------------|-------------|----|---------------|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------------|---------------------|
| -                    | -           | -  | -             | -              | -           | -           | -              | -             | -            | -               | -           | -           | -            | -           | -           | -         | -             | -                 | -                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-5LI45-a  | T  | 45            | 45             | 1,4         | 10          | 220            | 0,10          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 56,5              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 2S-6LI60-b  | T  | 45            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 54,4              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 4S-4LI45-b  | T  | 45            | 45             | 1,4         | 10          | 275            | 0,08          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 42,7              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 4s-4LI60-b  | T  | 45            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 43,5              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 4S-4LV-b    | T  | 45            | 90             | 1,4         | 9,5         | 180            | 0,08          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 31,9              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 4S-6LI60-b  | T  | 45            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 51,7              | CF                  |
| Dias e Barros (2013) | 3S-5LI60-d  | T  | 32            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 84,6              | FRP<br>rupture<br>P |
| Dias e Barros (2013) | 3S-8LI60-d  | T  | 19            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 127,9             |                     |
| Dias e Barros (2013) | 2S-7LI45-c  | T  | 30            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 48                | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 3S-9LI45-d  | T  | 32            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 117,4             | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-7LI60-a  | T  | 33            | 60             | 1,4         | 10          | 139            | 0,13          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 69,7              | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-8LI45-a  | T  | 36            | 45             | 1,4         | 10          | 135            | 0,16          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 70,3              | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-8LV-a    | T  | 36            | 90             | 1,4         | 10          | 100            | 0,16          | 167          | 2952            | 4,5         | 13,5        | 31           | 180         | 300         | 356       | 0,1           | 63,7              | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 4S-7LI45-c  | T  | 40            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 31,7              | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-10LI45-b | T  | 45            | 45             | 1,4         | 9,5         | 110            | 0,19          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 85,6              | P                   |
| Dias e Barros (2013) | 2S-10LV-b   | T  | 45            | 90             | 1,4         | 9,5         | 80             | 0,18          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 71,5              | P                   |

Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental

| <b>Autor</b>         | <b>Id.</b>   | <b>CS</b> | $\alpha$<br>° | $\beta_f$<br>° | $a_f$<br>mm | $b_f$<br>mm | $s_{fv}$<br>mm | $\rho_f$<br>% | $E_f$<br>GPa | $f_{fu}$<br>MPa | $a_g$<br>mm | $b_g$<br>mm | $f_c$<br>MPa | $b_w$<br>mm | $h_w$<br>mm | $d$<br>mm | $\rho_s$<br>% | $V_f^{exp}$<br>kN | <b>Falha</b><br>- |
|----------------------|--------------|-----------|---------------|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| Dias e Barros (2013) | 2S-7LI45-b   | T         | 45            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 70,7              | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 2S-7LV-b     | T         | 45            | 90             | 1,4         | 9,5         | 114            | 0,13          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 57,5              | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 2S-9LI60-b   | T         | 45            | 60             | 1,4         | 9,5         | 108            | 0,16          | 171          | 2742            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 65,3              | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 4S-7LI45-b   | T         | 45            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 64                | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 4S-7LV-b     | T         | 45            | 90             | 1,4         | 9,5         | 114            | 0,13          | 171          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 40           | 180         | 300         | 360       | 0,17          | 33,6              | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 2S-7LV-c     | T         | 46            | 90             | 1,4         | 9,5         | 114            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 19           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 43,6              | P                 |
| Dias e Barros (2013) | 5S-8LI60-d   | T         | 22            | 60             | 1,4         | 9,5         | 162            | 0,11          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 122,5             | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 3S-5LI45F1-d | T         | 23            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 85,75             | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 5S-5LI60-d   | T         | 25            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 73,4              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 5S-5LI60F-d  | T         | 25            | 60             | 1,4         | 9,5         | 243            | 0,07          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 72,6              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 5S-5LI45-d   | T         | 28            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 74,9              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 5S-5LI45F-d  | T         | 28            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 74,9              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 3S-5LI45-d   | T         | 30            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 81,7              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 3S-5LI45F2-d | T         | 30            | 45             | 1,4         | 9,5         | 275            | 0,08          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 80,9              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 3S-10LV-d    | T         | 32            | 90             | 1,4         | 9,5         | 114            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 81,5              | SL                |
| Dias e Barros (2013) | 5S-9LI45-d   | T         | 32            | 45             | 1,4         | 9,5         | 157            | 0,13          | 174          | 2848            | 4,5         | 13,5        | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,16          | 108,9             | SL                |

Tabela 29 – Parâmetros das vigas, modos de falha e resistência experimental

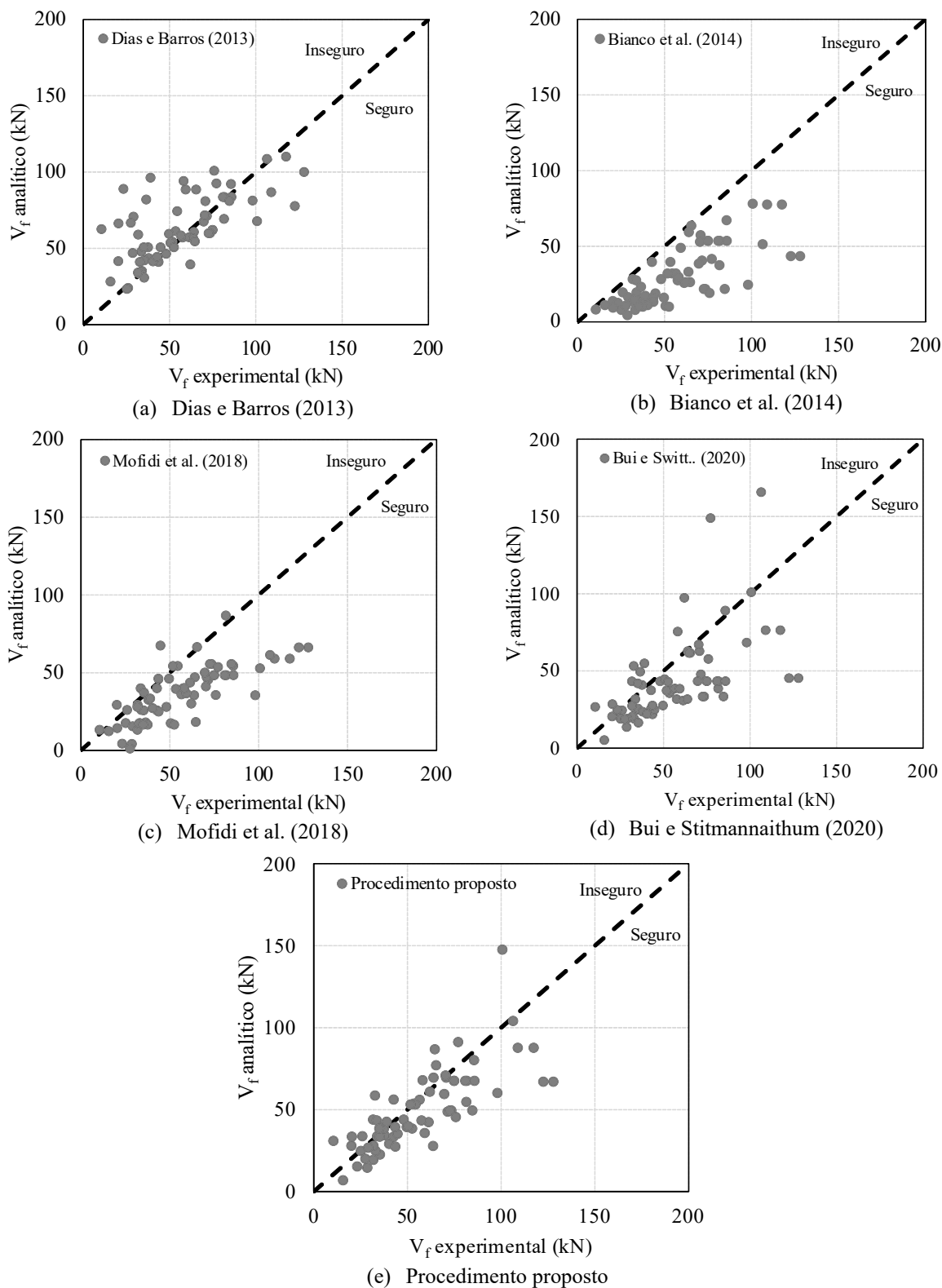
| <b>Autor</b>               | <b>Id.</b> | <b>CS</b> | $\alpha$<br>°                | $\beta_f$<br>° | $a_f$<br>mm | $b_f$<br>mm                  | $s_{fv}$<br>mm | $\rho_f$<br>% | $E_f$<br>GPa                                       | $f_{fu}$<br>MPa | $a_g$<br>mm | $b_g$<br>mm                                        | $f_c$<br>MPa | $b_w$<br>mm | $h_w$<br>mm | $d$<br>mm | $\rho_s$<br>% | $V_f^{exp}$<br>kN | <b>Falha</b><br>- |
|----------------------------|------------|-----------|------------------------------|----------------|-------------|------------------------------|----------------|---------------|----------------------------------------------------|-----------------|-------------|----------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| Dias e Barros (2013)       | 3S-6LV-d   | T         | 45                           | 90             | 1,4         | 9,5                          | 180            | 0,08          | 174                                                | 2848            | 4,5         | 13,5                                               | 59           | 180         | 300         | 360       | 0,1           | 44,7              | SL                |
| Haddad e Almasaeid (2016)  | C-RS20     | RT        | 45                           | 90             | 2,5         | 15                           | 200            | 0,25          | 165                                                | 3100            | 8,0         | 22,5                                               | 47           | 150         | 250         | 204       | 0,12          | 27,55             | Shear             |
| Kotynia (2010)             | BI-2/3B    | RT        | 45                           | 45             | 2,4         | 15                           | 360            | 0,19          | 170                                                | 2500            | 5,0         | 20,0                                               | 39           | 150         | 350         | 310       | 0,18          | 64,6              | Shear             |
| Kotynia (2010)             | BI-3/5A    | RT        | 45                           | 45             | 2,4         | 15                           | 210            | 0,32          | 163                                                | 2500            | 5,0         | 200                                                | 38,5         | 150         | 350         | 310       | 0,18          | 100,7             | Shear             |
| Rizzo e De Lorenzis (2009) | NS45-146-a | RT        | 45                           | 45             | 2,0         | 16                           | 146            | 0,31          | 122                                                | 2068            | 5,0         | 18,0                                               | 29           | 200         | 210         | 173       | 0,18          | 32,7              | P                 |
| Rizzo e De Lorenzis (2009) | NS90-73-a  | RT        | 45                           | 90             | 2,0         | 16                           | 73             | 0,44          | 122                                                | 2068            | 5,0         | 18,0                                               | 29           | 200         | 210         | 173       | 0,18          | 50,5              | P                 |
| <b>Notas:</b>              |            |           | <b>CS:</b> Seção transversal |                |             | <b>CF:</b> Falha no concreto |                |               | <b>Shear:</b> Falha por cisalhamento, sem detalhes |                 |             | <b>RT:</b> Retangular                              |              |             |             |           |               |                   |                   |
|                            |            |           |                              |                |             | <b>P:</b> Peeling-off        |                |               |                                                    |                 |             | <b>SL:</b> Deslizamento na interface adhesive-CFRP |              |             |             |           |               |                   |                   |

Fonte: O autor (2022)

### 4.2.3 Resultados e discussão

A Figura 69 mostra dispersão entre os resultados analíticos e experimentais. A Tabela 30 apresenta a relação média  $V_f^{\text{ana}}/V_f^{\text{exp}}$  e o coeficiente de variação (CV) para cada formulação.

Figura 69 – Dispersão dos resultados analíticos vs. experimental



Fonte: O autor (2020)

Tabela 30 – Relações médias  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$  e coeficiente de variação

| <b>Autor</b>                 | $V_f^{ana}/V_f^{exp}$<br>(-) | <b>CV</b><br>(%) | <b><math>0,9 \leq V_f^{ana}/V_f^{exp} \leq 1,1</math></b><br>(%) |
|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------|
| Dias e Barros (2013)         | 1,30                         | 62,0%            | 41,4%                                                            |
| Bianco et al. (2014)         | 0,63                         | 39,3%            | 18,6%                                                            |
| Bianco et al. (2014)*        | 0,52                         | 39,1%            | 5,7%                                                             |
| Mofidi et al. (2018)         | 0,68                         | 39,7%            | 14,3%                                                            |
| Bui e Stitmannathum (2020)** | 0,83                         | 48,2%            | 17,1%                                                            |
| Procedimento proposto        | 0,94                         | 39,5%            | 32,9%                                                            |

\* Modelo utilizando o ângulo da fissura diagonal de cisalhamento de 45°

\*\* Modelo usando a expressão para  $\tau_m$  do ACI 440.1R-15

Fonte: O autor (2022)

Os resultados de Dias e Barros (2013) apresentaram um valor médio contra a segurança, mas com 41,4% das amostras dentro do intervalo  $0,90 \leq V_f^{ana}/V_f^{exp} \leq 1,10$ . No entanto, o resultado neste intervalo se reduz para 12,9% com a utilização de um fator de redução de ( $\phi$ ), sugerido pelos autores, igual a 1,3. O procedimento proposto apresentou uma relação  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$  mais próxima de 1, com menor coeficiente de variação, e 32,9% dentro do intervalo  $0,90 \leq V_f^{ana}/V_f^{exp} \leq 1,10$ . Um destaque da proposta é atribuído ao fato de não necessitar de dados de entrada experimentais para uma maior precisão, como demandam os modelos de Bianco et al. (2014) e Bui e Stitmannathum (2020), e que apresentaram resultados muito conservadores.

A área e o perímetro do laminado apresentaram influência nos modelos de dimensionamento do reforço. Foi analisada a relação  $p_r/A_f$  para observar a precisão dos modelos, conforme Tabela 31. O limite aplicado para relação  $p_r/A_f$  está relacionado principalmente à espessura do laminado. As razões  $p_r/A_f > 1$  tiveram laminados com espessura igual ou menor a 2,0 mm, sendo a espessura de 1,4 mm comumente comercializada e utilizada em diversos experimentos (Sena-Cruz e Barros, 2004; Sena-Cruz et al., 2006; Seracino et al., 2007; Cruz et al., 2020), enquanto a espessura de 2,0 mm foi utilizada por Zhang et al. (2013).

Tabela 31 – Relações médias  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$  em função do perímetro e área do laminado

| -                     | <b>Dias<br/>(2008)</b> | <b>Bianco et al.<br/>(2014)</b> | <b>Mofidi et al.<br/>(2018)</b> | <b>Bui e<br/>Stitman.(2020)</b> | <b>Procedimento<br/>proposto</b> |
|-----------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| $p_r/A_f > 1$         |                        |                                 |                                 |                                 |                                  |
| $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ | 1,18                   | 0,69                            | 0,72                            | 0,71                            | 0,87                             |
| CV                    | 43,41%                 | 34,63%                          | 35,81%                          | 36,95%                          | 29,98%                           |
| $p_r/A_f < 1$         |                        |                                 |                                 |                                 |                                  |
| $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ | 1,74                   | 0,43                            | 0,55                            | 1,26                            | 1,18                             |
| CV                    | 79,95%                 | 40,85%                          | 51,70%                          | 40,27%                          | 49,02%                           |

Fonte: O autor (2022)

É trivial perceber que os modelos tenderam a apresentar resultados contra a segurança para  $p_r/A_f < 1$ , com exceção dos modelos de Bianco et al. (2014) e Mofidi et al. (2018) que se mostraram muito conservadores. Esses resultados precisam de maior compreensão através de mais programas experimentais com laminados de maior espessura. A dispersão ainda é alta para todos os modelos, mas destaca-se o procedimento proposto que obteve menor coeficiente de variação (29,98%) e relação média  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$  de 0,87 para  $p_r/A_f > 1$ .

Quando a análise do procedimento proposto é correlacionada com o modo de falha das vigas (Tabela 32), consegue-se visualizar o desempenho da proposta na ocorrência dos modos de falha nas vigas estudadas.

Tabela 32 – Modos de falha, incidência e relações médias  $V_f^{ana}/V_f^{exp}$

| Modo de falha                                     | Ocorrência (%) | $V_f^{ana}/V_f^{exp}$ | CV    |
|---------------------------------------------------|----------------|-----------------------|-------|
| Deslizamento ( <i>Sliding</i> )                   | 18,6%          | 0,77                  | 15,6% |
| Ruptura do laminado ( <i>CFRP rupture</i> )       | 1,4%           | 0,59                  | -     |
| Falha no concreto ( <i>CF</i> )                   | 28,6%          | 0,92                  | 25,2% |
| Destacamento do cobrimento ( <i>Peeling-off</i> ) | 41,4%          | 0,92                  | 32,5% |
| Cisalhamento ( <i>Shear</i> )                     | 10,0%          | 1,42                  | 54,6% |

Fonte: O autor (2022)

Como é possível observar, os modos de falha mais presentes estão relacionados ao destacamento do concreto aderido ao laminado (CF), ao deslizamento do laminado (*Sliding*) e ao destacamento da cobertura de concreto (*Peeling-off*), totalizando 88,6% dos modos de falham, onde o procedimento se mostrou mais ajustado. O colapso devido a ruptura pelo laminado ocorre na minoria das amostras, indicando que a capacidade máxima do compósito é limitada a questões como resistência do concreto e aspectos relacionados à aderência.

Observa-se com mais clareza que os modos de falha relacionados à ligação do concreto-adesivo-FRP são melhor representados pelo procedimento proposto. As amostras identificadas com falhas do tipo “*Shear*” apresentaram resultados contra a segurança e alta dispersão. Apesar de as vigas terem rompido ao cortante, não tiveram o modo de falha detalhado pelos autores. Uma motivação pode estar relacionada com o espaçamento entre laminados (> 200 mm no grupo citado), então, é possível que a ruptura possa ter ocorrido entre laminados e, portanto, o reforço não ter contribuído efetivamente para resistência da viga, e consequentemente o modelo não foi capaz de prever.

Os resultados apresentados atribuem ao procedimento proposto um desempenho levemente superior aos modelos existentes, com destaque para não necessidade de dados experimentais de entrada ou utilização de valores médios para tensões de aderência e deslizamentos. Apesar das limitações e da dispersão ainda presente nos modelos, a proposta apresentou-se mais próxima dos resultados experimentais.

### 4.3 Proposta de dimensionamento do reforço em vigas após incêndio

#### 4.3.1 Procedimento

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento após incêndio nas vigas de concreto armado é composto pela soma da resistência residual após incêndio da viga, de acordo com o procedimento apresentado no item 4.1.1, e da parcela resistente do reforço apresentada no item 4.2.1, ver Equação 98.

$$V_{ana} = V_{R\theta}^{ana} + V_f \quad (98)$$

De acordo com a ACI 440.2R-17 a soma da resistência proveniente do reforço ao cisalhamento ( $V_f$ ) é limitada com base no critério apresentado pela ACI 318-19 dado pela Equação 99.

$$V_{sw} + V_f \leq 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d \quad (99)$$

onde  $f_c$ : resistência a compressão do concreto (MPa);  $b_w$ : largura da viga (mm);  $d$ : altura efetiva da viga (mm).

Por analogia, considerando na análise após incêndio a isoterma dos 500 °C na seção de concreto e a parcela do cortante residual da armadura transversal, a Equação (99), fica:

$$V_{s\theta} + V_{flim} \leq 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \quad (100)$$

$$V_{f\theta}^{ana} = \text{menor}(V_f; V_{flim}) \quad (101)$$

onde  $V_{flim}$  é a parcela limite do reforço para o cisalhamento;  $V_{f\theta}^{ana}$  é a parcela do cisalhamento dada pelo reforço na viga após incêndio.

Adicionalmente, é sabido que uma maior resistência do concreto aumenta a eficiência do reforço colado (Zhang et al., 2013; Wang e Cheng, 2021), mas após incêndio a aderência do reforço ao concreto é reduzida, como observado por Al-Jadooe et al. (2017a, b). Portanto, é imprescindível a adoção de fatores de redução da resistência do reforço colado no concreto após o fogo. Neste sentido, duas abordagens são propostas a fim de considerar a redução de eficiência na aderência CFRP-concreto, a saber:

- (a) Consideração de fator de redução: a ACI 440.2.R-17 não apresenta orientação sobre o uso do reforço após incêndio, mas recomenda um fator de redução adicional ( $\psi_f$ ) de 0,85 para o esquema de reforço ao cisalhamento nos dois lados da viga. Então, a parcela de cisalhamento para viga reforçada após incêndio, fica:

$$V_{ana} = V_{R\theta}^{ana} + \psi_f \cdot V_{f\theta}^{ana} \quad (102)$$

(b) Uso de técnicas não destrutivas para determinar a resistência residual do concreto. Neste trabalho, foram utilizadas duas técnicas, o ultrassom e o teste de arrancamento. Portanto, recomenda-se utilizar, no mínimo, dois ensaios não destrutivos, e estimar a resistência residual a partir de expressões sugeridas na literatura (como as utilizadas nos itens 3.4.3 e 3.4.4). Propõe-se utilizar a menor resistência residual do concreto determinada por ensaios não destrutivos (END), e então, determinar a parcela do cortante relativo ao reforço ( $V_{f\theta-ND}^{ana}$ ), conforme apresentado no item 4.1.1.

$$V_{ana} = V_{R\theta}^{ana} + V_{f\theta-ND}^{ana} \quad (103)$$

onde:  $V_{f\theta-ND}^{ana}$  é a parcela do cortante relativa ao reforço determinada com base na resistência residual do concreto estimada por END após incêndio.

O desempenho do procedimento simplificado foi apresentado de duas formas, a saber:  $V_{ana1}$  = conforme Equação 102, e  $V_{ana2}$  = conforme Equação 103.

#### 4.3.2 *Dados experimentais*

Os dados experimentais disponíveis na literatura são poucos, como já apresentado. Até então, os resultados disponíveis com reforço ao cisalhamento de vigas após incêndio são de Haddad e Almasaeid (2016). No entanto, a série experimental dos autores analisou as vigas no estado estacionário de temperatura, o que inviabiliza a utilização dos dados porque o procedimento proposto nesta tese está relacionado ao gradiente de temperatura na seção transversal da viga para aplicação do Método dos 500 °C. Portanto, o programa experimental com 16 vigas conduzido neste trabalho, e apresentado no Capítulo 3, foi utilizado para a validação do procedimento analítico. Ao total oito vigas foram utilizadas para avaliação do procedimento para dimensionamento do reforço após incêndio.

#### 4.3.3 *Resultados e discussão*

As Tabelas 33 e 34 apresentam os resultados do programa experimental desenvolvido e verificação da resistência analítica para as vigas após incêndio (sem reforço) e reforçadas à temperatura ambiente, respectivamente. As parcelas resistentes relativas ao concreto, aço e laminados de CFRP são apresentadas individualmente, além do coeficiente de variação (CV) e intervalo de confiança (IC) com nível de confiança de 95%.

Tabela 33 – Capacidade de cisalhamento residual das vigas

| Id.                   | $V_{c0}$<br>(kN) | $V_{s0}$<br>(kN) | $V_{R0}^{ana}$<br>(kN) | $V_{exp}$<br>(kN) | $V_{R0}^{ana}/V_{exp}$ |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| RCB <sub>60-NS</sub>  | 37,45            | 27,95            | 65,40                  | 88,58             | 0,74                   |
| RCB <sub>90-NS</sub>  | 30,94            | 27,95            | 58,89                  | 79,33             | 0,74                   |
| RCB <sub>120-NS</sub> | 19,27            | 24,83            | 44,10                  | 63,96             | 0,69                   |
| Média                 |                  |                  |                        |                   | 0,72                   |
| CV                    |                  |                  |                        |                   | 4,1%                   |
| IC                    |                  |                  |                        |                   | 0,69–0,76              |

Fonte: O autor (2022)

Os resultados analíticos encontrados para a resistência residual ao cisalhamento das vigas se mostraram a favor da segurança para todos os tempos de exposição ao incêndio. O procedimento apresentou baixa dispersão com CV menor que 5%, e uma boa aproximação aos resultados experimentais. O Apêndice A apresenta a aplicação do procedimento para um exemplo resolvido.

Tabela 34 – Capacidade de cisalhamento das vigas reforçadas à temperatura ambiente

| Id.                   | $V_c$<br>(kN) | $V_{sw}$<br>(kN) | $V_f$<br>(kN) | $V_{ana}$<br>(kN) | $V_{exp}$<br>(kN) | $V_{ana}/V_{exp}$ |
|-----------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| RCBS <sub>0-75</sub>  | 84,62         | 27,95            | 117,42        | 229,99            | 183,65            | 1,25 <sup>1</sup> |
| RCBS <sub>0-150</sub> | 84,62         | 27,95            | 102,74        | 215,31            | 198,18            | 1,09              |
| RCBS <sub>0-200</sub> | 84,62         | 27,95            | 67,43         | 180,00            | 188,19            | 0,96              |
| Média                 |               |                  |               |                   |                   | 1,10              |
| CV                    |               |                  |               |                   |                   | 13,5%             |
| IC                    |               |                  |               |                   |                   | 0,93–1,27         |

**Nota:** <sup>1</sup> Falha na extremidade da viga não reforçada

Fonte: O autor (2022)

Analisando a Tabela 34, observa-se que o procedimento apresentou uma relação média  $V_{ana}/V_{exp}$  muito próxima de 1. Apesar da amostra RCBS<sub>0-75</sub> não ter falhado na extremidade da viga com reforço, a sua relação  $V_{ana}/V_{exp}$  de 1,25 ainda esteve dentro do intervalo de confiança do procedimento. O Apêndice B apresenta a aplicação do procedimento para um exemplo resolvido.

O dimensionamento do reforço nas vigas após incêndio foi realizado com base em dois procedimentos, como já descrito. No primeiro ( $V_{ana1}$ ), foi utilizado um fator redutor conforme ACI 440.2R-17 na parcela do reforço. No segundo ( $V_{ana2}$ ), a parcela do reforço foi determinada com base na resistência do concreto estimada através de ensaios não destrutivos (Tabela 35).

Tabela 35 – Resistência residual do concreto e parcela do cortante devido ao reforço

| TI<br>(min) | Ultrassom<br>(MPa) | Arrancamento<br>(MPa) | $f_{c0-ND}$<br>(MPa) | $V_{f0-ND}^{ana}$ |        |       |
|-------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--------|-------|
|             |                    |                       |                      | 200 mm            | 150 mm | 75 mm |
| 60          | 36,9               | 33,2                  | 33,2                 | 44,85             | 68,3   | 78,06 |
| 90          | 27,7               | 22,0                  | 22,0                 | 35,03             | 53,35  | 60,98 |
| 120         | 18,4               | 21,5                  | 18,4                 | 31,36             | 47,77  | 54,59 |

$f_{c0-ND}$  é menor resistência residual do concreto determinada a partir de END

Fonte: O autor (2022)

A Tabela 36 e Figura 70 resumem os resultados para o procedimento de dimensionamento do reforço após incêndio. O Apêndice C apresenta a aplicação do procedimento para um exemplo resolvido.

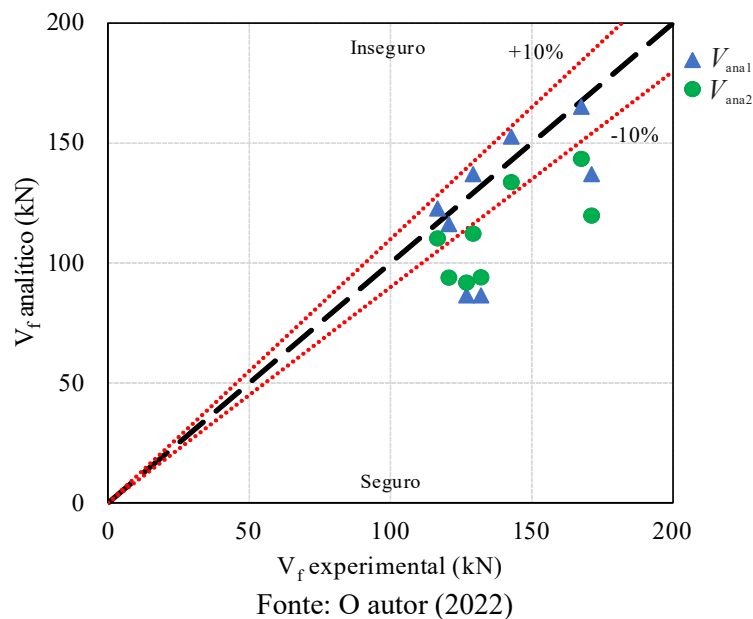
Tabela 36 – Resistência ao cisalhamento experimental e analítica

| Id.                     | $V_{ana1}$<br>(kN) | $V_{ana2}$<br>(kN) | $V_{exp}$<br>(kN) | $V_{ana1}/V_{exp}$ |   | $V_{ana2}/V_{exp}$ |   |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---|--------------------|---|
|                         |                    |                    |                   | -                  | - | -                  | - |
| RCBS <sub>60-75</sub>   | 165,12             | 143,46             | 167,51            | 0,99               |   | 0,86               |   |
| RCBS <sub>90-75</sub>   | 137,14             | 119,87             | 171,14            | 0,80               |   | 0,70               |   |
| RCBS <sub>120-75</sub>  | 86,54              | 94,03              | 132,04            | 0,66               |   | 0,71               |   |
| RCBS <sub>60-150</sub>  | 152,73             | 133,70             | 142,77            | 1,07               |   | 0,94               |   |
| RCBS <sub>90-150</sub>  | 137,14             | 112,24             | 129,26            | 1,06               |   | 0,87               |   |
| RCBS <sub>120-150</sub> | 86,54              | 91,87              | 126,92            | 0,68               |   | 0,72               |   |
| RCBS <sub>60-200</sub>  | 122,72             | 110,25             | 116,62            | 1,05               |   | 0,95               |   |
| RCBS <sub>90-200</sub>  | 116,21             | 93,92              | 120,66            | 0,96               |   | 0,78               |   |
| Média                   |                    |                    |                   | 0,91               |   | 0,82               |   |
| CV                      |                    |                    |                   | 18,9%              |   | 12,1%              |   |
| IC                      |                    |                    |                   | 0,88–1,01          |   | 0,75–0,88          |   |

Fonte: O autor (2022)

Na hipótese de adotar o fator de redução da resistência, a relação média ( $V_{ana1}/V_{exp}$ ) foi de 0,91 com coeficiente de variação de 18,9%. Os resultados foram a favor da segurança com 75% dos resultados analíticos dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ , adotado como margem de segurança. O procedimento utilizando os dados para resistência do concreto através de ensaios não destrutivos (END) apresentou relação média ( $V_{ana2}/V_{exp}$ ) de 0,82 e menor coeficiente de variação (12,1%).

Figura 70 – Resistência ao cisalhamento analítico-experimental



O desempenho do procedimento com dados de ensaios não destrutivos se mostrou mais conservador, e 100% das amostras apresentaram o resultado analítico inferior ao resultado experimental. Os poucos estudos experimentais sobre a ligação CFRP-concreto após incêndio, e as incertezas da estimativa da resistência com END, dificultam a introdução de um fator redutor mais consistente.

O reforço ao cisalhamento com a técnica NSM e usando laminados de CFRP se mostrou eficiente experimentalmente, e com dimensionamento perfeitamente previsível através de expressões analíticas simplificadas, mesmo um problema tão complexo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Um programa experimental foi realizado com dezesseis vigas de concreto armado para análise da reabilitação após incêndio. As vigas foram submetidas a diferentes tempos de exposição (60, 90 e 120 min) de acordo com a curva de incêndio da ISO 834 (2014), resfriadas lentamente, e reforçadas com espaçamentos entre laminados de 75, 150 e 200 mm. As vigas foram estudadas à temperatura ambiente e após incêndio, sem e com reforço ao cisalhamento usando laminados de CFRP e a técnica NSM. Um estudo analítico foi conduzido analisando procedimentos propostos para verificação da resistência residual de vigas após incêndio, o dimensionamento do reforço ao cisalhamento com NSM CFRP à temperatura ambiente e após incêndio. Como resultados, pode-se concluir:

- O ultrassom pode ser usado como técnica não destrutiva para estimar a perda de resistência do concreto, no entanto, há a necessidade de uma expressão ajustada em função da VPU para diferentes classes de concretos;
- A recomendação da norma americana ACI 440.2R-17 é conservadora ao limitar a aplicação do FRP em concretos com tensão de tração mínima de 1,4 MPa;
- A resistência residual do aço após incêndio é recuperada para temperaturas inferiores a 600 °C;
- A ocorrência de *spalling* no concreto aconteceu para temperaturas do forno entre 700 e 800 °C, a alta taxa de aquecimento, a elevada resistência do concreto, e o alto gradiente de temperatura foram fundamentais para ocorrência do fenômeno;
- O *spalling* não inviabilizou a aplicação dos laminados inseridos no cobrimento do concreto nas faces laterais das vigas;
- O reforço ao cisalhamento com NSM CFRP foi eficiente no aumento da capacidade de carga das vigas em concreto armado após incêndio;
- O sistema de reforço foi capaz de recuperar a resistência inicial das vigas, e até aumentá-la consideravelmente;
- Uma maior taxa de reforço implica em uma maior capacidade de carga;
- A rigidez das vigas reforçadas após incêndio aumentou, mas não foi recuperada à condição de referência à temperatura ambiente;
- Um maior tempo de exposição ao incêndio e uma maior taxa de reforço tendem a alterar o modo de falha das vigas para *peeling-off*;

- A estimativa da carga residual de vigas após incêndio pode ser feita considerando que o concreto e o aço recuperam integralmente sua resistência para temperaturas de exposição de 500 e 600 °C, respectivamente;
- O procedimento proposto para dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas à temperatura ambiente apresentou melhor desempenho comparado com outras propostas disponíveis na literatura;
- O procedimento proposto para dimensionamento do reforço em vigas após incêndio teve um ótimo desempenho comparado aos resultados experimentais, e apresenta-se como procedimento promissor.

Os resultados apresentados confirmam que o uso do sistema de reforço pode ser utilizado nas vigas em concreto armado após incêndio. A pequena quantidade de trabalhos sobre o reforço ao cisalhamento após incêndio e sobre o estudo da interface concreto-CFRP limitam o desenvolvimento de uma proposta analítica mais precisa. O desenvolvimento da presente investigação resultou na elaboração de trabalhos que foram publicados, submetidos e estão a submeter (APÊNDICE D).

## 5.2 Trabalhos futuros

A definição do trabalho experimental desenvolvido foi limitada a algumas variáveis devido a disponibilidade financeira, infraestrutura laboratorial e o prazo disponível. Dentre as sugestões para trabalhos futuros, é possível listar:

- Utilizar de diferentes resistências de concreto para confecção das vigas;
- Estudar a aderência na ligação entre concreto-adesivo-CFRP após incêndio;
- Analisar diferentes dimensões de laminados e ranhuras para inserção do reforço;
- Conduzir uma série experimental com amostras a fim de padronizar os ensaios não destrutivos em estruturas de concreto após incêndio;
- Estudo sobre o reforço ao cisalhamento e à flexão simultaneamente a fim de recuperar a rigidez das vigas após incêndio à condição inicial;
- Realizar estudo numérico das vigas reforçadas após incêndio.

As sugestões apresentadas para trabalhos futuros são apenas uma parte da abrangência e necessidade que existe para estudo sobre o uso de sistemas de reforço após incêndio em estruturas de concreto.

## REFERÊNCIAS

- ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2015.
- ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, ACI 440.2R-17. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2017
- ACI Committee 562. Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures, ACI 562-19. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute. 2019.
- ADAMATI, D.S.; LORENZI, A.; CHIES, J. A.; SILVA FILHO, L.C.P. Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes. *IBRACON. Volume 10, N° 2 (abril 2017)* p. 358 – 385. Doi: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000200006>
- AHMED, A.; BALOCH, W. L., KHUSHNOOD, R. A., MUSHTAQ, A. Structural health assessment of fire damaged building using non-destructive testing and micro-graphical forensic analysis: A case study. *Case Studies in Construction Materials 11* (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00258>
- AL RJOUB, Y. S.; ASHTEYAT, A. M., OBAIDAT. Y. T. and BANI-YOUNISS, S. Shear strengthening of RC beams using near-surface mounted carbon fibre-reinforced polymers. *Australian Journal of Structural Engineering* (2019). Doi: <https://doi.org/10.1080/13287982.2019.1565617>
- AL-ROUSAN, R. Z. Impact of elevated temperature and anchored grooves on the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites. *Case Studies in Construction Materials 14* (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00487>
- ALCAÍNO, P.; SANTA-MARÍA, H.; MAGNA-VERDUGO, C.; LÓPEZ, L. Experimental fast-assessment of post-fire residual strength of reinforced concrete frame buildings based on non-destructive tests. *Construction and Building Materials 234* (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117371>
- AL-RJOUB, Y.; OBAIDAT, A.; AHMED, A; and ALSHBOUL, K. Experimental and analytical investigation of using externally bonded, hybrid, fiber-reinforced polymers to repair and strengthen heated, damaged RC beams in flexure. *Journal of Structural Fire Engineering* (2021). Doi: [10.1108/JSFE-09-2021-0059](https://doi.org/10.1108/JSFE-09-2021-0059)
- AL-SAADI, NTK; MOHAMMED A.; AL-MAHAIDI R.; SANJAYAN J. A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials 209* (2019) 748–769. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121>
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 546R-14: Guide to Concrete Repair. Farmington Hills, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Michigan, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Michigan, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318–08: Building code requirements for reinforced concrete, Detroit, Michigan, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-14 - Building Code Requirements for Structural Concrete. August, 2014

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM C1583/C1583M – 13). Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

AMRAN, M.; HUANG, S-S.; ONAIZI, A.M.; MURALI, G. and ABDELGADER, H.S. Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review. *Construction and Building Materials* 341 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127902>

ARAÚJO, R. C. A.; SILVA, W. M.; PIRES, T. A. C. and RÊGO SILVA, J.J. Compressive strength assessment of high strength concrete after fire using ultrasonic test method. *Research, Society and Development*, v. 11 (2022). Doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.32719>

ARRUDA, M.R.T.; FIRMO, J.P.; CORREIA, J.R.; TIAGO, C. Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures. *Engineering Structures* 110 (2015) 233–243. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.036>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

BAI, L. and WANG, Z. “Residual bearing capacity of reinforced concrete member after exposure to high temperature”, *Advanced Materials Research*, Vols 368-373, pp. 577-581, Out. 2011 DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.577](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.577)

BARROS, J.A.O. and DIAS, S.J.E. Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. Univ. of Minho, Azurém, 4810-058 Guimarães, Portugal (2006)

BENSALEM, H.; DJAKNOUN, S.; OUEDRAOGO, E. and AMROUCHE, R. Analysis of thermal-induced spalling tests on high to ultra-high-performance concrete subjected to standard fire. *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00704>

BIANCO V., BARROS J.A.O, MONTI G. New approach for modeling the contribution of NSM FRP strips for shear strengthening of RC beams. *ASCE J Compos Constr* (2010). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000048)

BIANCO V.; BARROS J.A.O.; MONTI G. Bond model of NSM FRP strips in the context of the Shear strengthening of RC beams. *ASCE J Struct Eng.* 2009;135(6). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:6\(619\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:6(619))

BIANCO, V.; MONTI, G. and BARROS, J.A.O. Design formula to evaluate the NSM FRP strips shear strength contribution to a RC beam. *Composites: Part B* 56 (2014) 960–971. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.001>

BUI, L.V.H. and STITMANNAITHUM, B. Prediction of Shear Contribution for the FRP Strengthening Systems in RC Beams: A Simple Bonding-based Approach. *Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 18*, 600-617, October 2020. Doi: [10.3151/jact.18.600](https://doi.org/10.3151/jact.18.600)

BUI, L.V.H.; STITMANNAITHUM. B.; JONGVIVATSAKUL, P. Comprehensive investigation on bond mechanism of embedded through-section fiber-reinforced polymer bars to concrete for structural analysis. *Journal of Building Engineering* 29 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101180>

CAI, B.; XU, L-F; and FU, F. “Shear Resistance Prediction of Post-fire Reinforced Concrete Beams Using Artificial Neural Network”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0358-8>

CAN/CSA-S806-02. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. 2017

CISNEROS, D., ARTEAGA, A., DE DIEGO, A., and ALZATE, A. (2012). “Experimental study on NSM FRP shear retrofitting of RC beams.” *Proc., 6th Int. Conf. on FRP Composite Materials for Civil Engineering*, Univ. of Roma, Rome

CNR-DT 200 R1. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Roma (2013)

COELHO, M.R.F.; SENA-CRUZ, J.M.; NEVES, L.A.C. “Review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 93, 1157-1169, September, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.010>

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP MODEL CODE 90.

CRUZ, J.R. et al. Bond behaviour of NSM CFRP laminate strip systems in concrete using stiff and flexible adhesives. *Composite Structures* 245 0263-8223 (2020). doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112369>

DE LORENZIS, L. and NANNI, A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods. *ACI Structural Journal Technical Paper*. (2001)

De LORENZIS, L., 2000, “Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP Rods,” MSc thesis, Department of Civil Engineering, the University of Missouri Rolla, Rolla, Mo., 175 pp.

De LORENZIS, L.; TENG, J.G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites: Part B* 38 (2007) 119–143. Doi: [10.1016/j.compositesb.2006.08.003](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003)

DIAB, M., “Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams at Elevated Temperatures”, *Master of Engineering Science*, The School of Graduate and Postdoctoral Studies, Western University London, Ontario, Canada, 2014.

DIAS, S. e BARROS, J. Avaliação da eficácia de distintas técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com CFRP. Universidade do Minho, 2004.

DIAS, S.J.E. and BARROS, J.A.O. Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates: Experimental research and analytical formulation. *Composite Structures* 99 (2013) 477–490. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.026>

DIAS, S.J.E. Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica da inserção de laminados de CFRP. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*. Universidade do Minho, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules — Structural fire design. Brussels: CEN, 2004

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules — Structural fire design. British: BST, 2004

FAN, S; ZHANG, Y. and TAN, K. Experimental and analytical studies of reinforced concrete short beams at elevated temperatures. *Engineering Structures* 212 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110445>

FELDMAN, R.F. Non-Destructive Testing of Concrete. Division of Building Research, National Research Council Canada. Originally published May 1977. Doi: <https://doi.org/10.4224/40000715>

FIB. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Technical report (229 pages, ISBN 978-2-88394-131-1, July (2019). Bulletin 90

FIRMO, J.P.; M.R.T. ARRUDA, J.R. CORREIA, I.C. ROSA. Three-dimensional finite element modelling of the fire behaviour of insulated RC beams strengthened with EBR and NSM CFRP strips. *Composite Structures* (2017). Doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.082>

GB 50010: Code for design of concrete structures. GB, China, Beijing, 2010.

HADDAD, R. and AL-RABADI, E. Bond behavior between near-surface mounted fiber reinforced polymer strips and concrete using nonlinear finite element: a parametric study. *Journal of Adhesion Science and Technology* (2020). Doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1852777>

HADDAD, R. H. and HARB, A. N. CFRP ropes for retrofitting heat-damaged concrete beams. *Journal of Building Engineering* 43 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102522>

HADDAD, R. H. and YAGHMOUR, E. M. Retrofitting Heat-Damaged concrete beams using different profiles of side NSM CFRP strips. *Structures* 28 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.027>

HADDAD, R. H.; Y. T. OBAIDAT. A nonlinear finite element model for shear deficient heat-damaged concrete beams repaired using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials* 170 (2018) 314–325. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.084>

HADDAD, R.H. e ALMASAEID, H.H. Recovering shear capacity of heat-damaged beams using NSM-CFRP strips. *Construction and Building Materials* 105 (2016) 448–458. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.152>

HANSON, M. M.; HANOON, A. N.; SALEEM, S. J.; HEJAZI, F. and ZAND, A. W. Characteristics of experimental ductility energy index of hybrid-CFRP reinforced concrete deep beams. *SN Applied Sciences* (2021). Doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04202-6>

HARAJLI, M. and ABOUNIAJ, M. “Bond performance of GFRP bars in tension: Experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines.” *Journal of Composites for Construction*, 14(6), 659-668 (2010). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000139](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000139)

HAYASHIKAWA, T., SAIDO, F. and HIGAI, I. “Strength of RC deep beams with shear reinforcement.” *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 1990. Vol. 12(2), 319-324. (in Japanese)

HSU, J. H.; e LIN, C. S. “Effect of Fire on the Residual Mechanical Properties and Structural Performance of Reinforced Concrete Beams”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 18, Nov. 2008. DOI: [10.1177/1042391507077171](https://doi.org/10.1177/1042391507077171)

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 834:2014 - Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements. International Organization of Standardization, Genève, 2014.

ISLAM, A. K. M. Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders. *Engineering Structures* 31 (2009) 709-714. Doi: [10.1016/j.engstruct.2008.11.016](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.016)

JADOOE, A.; R. AL-MAHAIDI; K. ABDOKA. Behaviour of heat-damaged partially-insulated RC beams using NSM systems. *Construction and Building Materials* 180 (2018a) 211–228. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.279>

JADOOE, A.; R. AL-MAHAIDI; K. ABDOKA. Experimental and numerical study of strengthening of heat-damaged RC beams using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials* 154 (2017c) 899–913. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.202>

JADOOE, A; R. AL-MAHAIDI; K. ABDOKA. Bond Behavior between NSM CFRP Strips and Concrete Exposed to Elevated Temperature Using Cement-Based and Epoxy Adhesives. *Journal of Composites for Construction* (2017a). Doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000812)

JADOOE, A; R. AL-MAHAIDI; K. ABDOKA. Modelling of NSM CFRP strips embedded in concrete after exposure to elevated temperature using epoxy adhesives. *Construction and Building Materials* 148 (2017b) 155–166. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.027>

JADOOE, A; R. AL-MAHAIDI; K. ABDOKA. Performance of heat-damaged partially-insulated RC beams strengthened with NSM CFRP strips and epoxy adhesive. *Construction and Building Materials* 159 (2018b) 617–634. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.020>

JIANG, C-J et al. Experimental study on the residual shear capacity of fire-damaged reinforced concrete frame beams and cantilevers. *Fire Safety Journal* 100 (2018) 140–156. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.004>

JIANGTAO, Y.; YICHAO, W.; KEXU, H.; KEQUAN, Y.; JIANZHANG, X. The performance of near-surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire. *Fire Safety Journal* 90 (2017) 86–94. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.031>

KHALIFA, A. M. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Alexandria Eng. J.* (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.033>

KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. B. and FIKE, R. S., “An approach for evaluating the residual strength of fire-exposed RC beams”, *Magazine of Concrete Research*, 62, No. 7, pp. 479–488, July. 2010. DOI: [10.1680/macr.2010.62.7.479](https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.7.479)

KODUR, V.K.R. and AGRAWAL, A. “An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire”, *Engineering Structures*, 110, pp. 293–306. Nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.047>

KOTYNIA, R. Efficiency of RC T-Section Beams Shear Strengthening with NSM FRP Reinforcement. CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. September 27-29, 2010, Beijing, China

KUMAR, A. and KUMAR, V. “Behaviour of RCC beams after exposure to elevated temperatures”, *Journal of the Institution of Engineers (India)*, Civil Engineering Division, vol. 84, pp. 165–170, 2003.

LESLIE, J.R. and CHESSEMAN, W.J. An Ultrasonic Method of Deterioration and Cracking in Concrete Structures. American Concrete Institute Proceedings, Vol. 46, No. 1, pp. 17–36 (1949).

LIN, Y.; HSIAO, C.; YANG, H. and LIN, Y-F. The effect of post-fire-curing on strength–velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength. *Fire Safety Journal* 46 (2011). Doi: [10.1016/j.firesaf.2011.01.006](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.01.006)

LORENZI, A., CAETANO, L.F.; LORENZI, L.S.; KLEIN, D.L.; SILVA FILHO, L.C.O.S.F.; CAMPAGNOLO, J.L. Avaliação de Estruturas de Concreto Armado após Sinistro através de Ensaios Não Destrutivos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, 2015.

LU, X.Z.; TENG, J.G.; YE, L.P; JIANG, J.J. Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures* 27 (2005) 920–937. doi: [10.1016/j.engstruct.2005.01.014](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014)

MOFIDI, A.; CHAALLAL, O.; CHENG, L.; and SHAO, Y. Investigation of Near Surface–Mounted Method for Shear Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced–Polymer Composites. *Journal Composite Construction* (2015) American Society of Civil Engineers. Doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000612).

MOFIDI, A; CHENG, L.; CHAALLAL, O.; SHAO, Y. Shear Strengthening of RC Beams with NSM FRP — Influencing Parameters and A Theoretical Model. *Journal of the American Concrete Institute* (2018). [ACI SP-327:31.1-31.16](https://doi.org/10.1016/j.jaci.2018.01.016)

MOLKENS, T.; VAN COILE, R.; and GERNAY, T. “Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: Applied reliability-based methodology”. *Engineering Structures*, Vol. 150 969-985 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.078>

NAKAMURA, H., et al. “Shear Resistance Mechanism Evaluation of RC Beams Based on Arch and Beam Actions”, *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 16, 563-576, November 2018. <https://doi.org/10.3151/jact.16.563>

NANNI, A.; DI LUDOVICO, M. and PARRETTI, R. Shear Strengthening of a PC Bridge Girder with NSM CFRP Rectangular Bars. *Advances in Structural Engineering Vol. 7* No. 4 (2004).

NDAGI, A; UMAR, A.A.; HEJAZI, F; JAAFAR, M. S. Non-destructive assessment of concrete deterioration by ultrasonic pulse velocity: A review. *Sustainable Civil and Construction Engineering Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 357 (2019). Doi: [10.1088/1755-1315/357/1/012015](https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012015)

OBAIDAT, Y.T.; BARHAM, W.S.; ABDELRAHMAN, B.N. Effect of elevated temperature on the bond behavior between near Surface Mounted-Carbon Fiber Reinforced Polymers strips and Recycled Aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 251 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118970>

OEHLERS, D.J.; HASKETT, M; WU, C.; and SERACINO, R. Embedding NSM FRP Plates for Improved IC Debonding Resistance. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12, No. 6, December 1, 2008. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:6\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:6(635))

PARRETTI, R. and NANNI, A. Strengthening of RC Members Using Near-Surface Mounted FRP Composites: Design Overview. *Advances in Structural Engineering*. ISSN 1369-4332. Volume 7 Number 6 December 2004.

PEREIRA, R.G.; PIRES, T. A. C., DUARTE, D. C. L., SILVA, J.J.R., “Assess of residual mechanical resistance of reinforced concrete beams after fire”, *Revista ALCONPAT*, Vol. 9 Issue 1, 2018. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.299>

PLASENCIA, G.R., ROCHA, J.D.B, SANTANA, J.J.H., PUDIPEDI, L. “Study of the behavior of reinforced concrete deep beams. Estimate of the ultime shear capacity”. *Revista de la Construcción*. Vol.16 no.1 Santiago, abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.7764/RDLC.16.1.43>

PRADO, D. M. Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP por meio de análise estática e modal. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

RASHID, R.; OEHLERS, D.J.; and SERACINO, R. IC Debonding of FRP NSM and EB Retrofitted Concrete: Plate and Cover Interaction Tests. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12, No. 2, April 1, 2008. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(160))

RIZZO, R. and DE LORENZIS, L. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1555–1567. Doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.08.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.014)

SENA CRUZ, J. and BARROS, J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. *Computers and Structures* 82 (2004) 1513–1521. Doi: [10.1016/j.compstruc.2004.03.047](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.047)

SENA CRUZ, J.M.; BARROS, J.A.O; GETTU, R.; and AZEVEDO, A.F.M. Bond Behavior of Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 4, August 1, 2006. Doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(295))

SERACINO, R.; RAIZAL SAIFULNAZ, M.R.; and OEHLERS, D.J. Generic Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 1, February 1, (2007). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(62))

SHANG, X.; YU, J.; LING-ZHI, L., ZHOU-DAO, L. Shear strengthening of fire damaged RC beams with stirrup reinforced engineered cementitious composites. *Engineering Structures*. Volume 210, 1 May 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110263>

SHOMALI, A.; MOSTOFINEJAD, D.; ESFAHANI, M. R. Effective strain of CFRP in RC beams strengthened in shear with NSM reinforcements. *Structures* 23 (2020) 635–645. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.10.020>

SIA166. Klebebewehrungen. (Externally bonded reinforcement). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Swiss, 2004.

SIDDIKA, A., ABDULLAH AL MAMUN, Md., FERDOUS, W., ALYOUSEF, R., Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-the-art review, *Engineering Failure Analysis* (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>

SONG, Y., *et al.* “Residual Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams after Fire Exposure”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Sep. 2020. doi: [10.1007/s12205-020-1758-7](https://doi.org/10.1007/s12205-020-1758-7).

STRUCTURAL ENGINEERING DOCUMENTS (SED). Case Studies of Rehabilitation, Repair, Retrofitting, and Strengthening of Structures. *The International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 2010.

SULLIVAN, P.J.E. A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature. *Cement and Concrete Composites* 26 (2004). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00088-X)

SUN, R.; XIE, B.; PERERA, R. and PAN, Y. “Modeling of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire by Using a Spectral Approach”, *Hindawi - Advances in Materials Science and Engineering*, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6936371>

THANARAJ, D. P.; ANAND, N.; ARULRAJ, P.; AL-JABRI, K., “Investigation on structural and thermal performance of reinforced concrete beams exposed to standard fire”. *Journal of Building Engineering*, Ago. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101764>

VAN COILE, R; CASPEELE, R., TAERWE, L. “Towards a reliability-based post-fire assessment method for concrete slabs incorporating information from inspection” *Structural Concrete* 15(3), 395-407 (2014). <https://doi.org/10.1002/suco.201300084>

VAYSBURD, A. A. and McDONALD. An Evaluation of Equipment and Procedures for Tensile Bond Testing of Concrete Repairs. Technical Report REMR-CS-61 (1999).

VU, S. N.; LI, B. and BEYER, K. Effective stiffness of reinforced concrete coupling beams. *Engineering Structures* 76 (2014). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.014>

WANG, X and CHENG, L. Bond characteristics and modeling of near-surface mounted CFRP in concrete. *Composite Structures* 255 0263-8223 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113011>

WENDT, S.C. Análise da Mudança de Cor em Concretos Submetidos a Altas Temperaturas como Indicativo de Temperaturas Alcançadas e da Degradação Térmica – Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: PPGE/UFRGS, 2006. 183p.

WIWATROJANAGUL, P; AYUDHYA, B. I. and SAHAMITMONGKOL, R. NSM FRP Shear Strengthening of RC Beams with Internal Stirrups. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, Vol. 17, No. 1 (2012).

WRITEHURST, E. A. Evaluation of concrete properties from sonic tests. Detroit: *American Concrete Institute* (1966)

WRÓBLEWSKA, J., KOWALSKI, R. “Assessing concrete strength in fire-damaged structures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 254 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119122>

XIANG, K.; WANG, G. and LIU, H. “Shear Strength of Reinforced Concrete Beams after Fire”, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 256-259, pp. 742-748, Dez. 2013. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.742](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.742)

XU, Y.; PENG, X.; DONG, Y.; LUO, Y.; LIN, B. “Experimental study on shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheet after fire”. *Journal of Building Structures (China)*, Vol. 36, nº2, Feb. 2015. DOI: [10.14006/j.jzjgxb.2015.02.015](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2015.02.015)

XU, Y.; WU, B.; JIANG, M. and HUANG, X. “Experimental Study on Residual Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams after Exposure to Fire”, *Advanced Materials Research*, Vols 457-458, pp. 183-187, Jan. 2012. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.183](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.183)

XU, Y.; WU, B.; WANG, R.; JIANG, M. e LUO, Y. “Experimental study on residual performance of reinforced concrete beams after fire”, *Journal of Building Structures (China)*, Vol. 34, nº8, Ago. 2013. DOI: [1000-6869\(2013\)08-0020-10](https://doi.org/10.1000-6869(2013)08-0020-10)

YANG, H.; LIN, Y.; HSIAO, C; LIU, J-Y. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Safety Journal* 44 (2009). Doi: [10.1016/j.firesaf.2008.05.003](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.003)

YANG, S.; XU, Z. and BIAN, Z. Prediction on compressive strength concrete using modified pull-off testing method (MPTM). *Construction and Building Materials* 250 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118834>

YU, J.; LIU, K.; LI, L-Z; WANG, Y.; YU, K.; XU, Q. A simplified method to predict the fire resistance of RC Beams Strengthened with Near-Surface Mounted CFRP. *Composite Structures* (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.035>

ZHANG, S.S. Bond strength model for near-surface mounted (NSM) FRP bonded joints: Effect of concrete edge distance. *Composite Structures* 201 (2018) 664–675. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.089>

ZHANG, S.S., TENG, J.G. and YU, T. Bond Strength Model for CFRP Strips Near-surface Mounted to Concrete. *Journal of Composites for Construction*. (2014). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000402](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000402)

ZHANG, S.S., TENG, J.G. and YU, T. Bond–slip model for CFRP strips near-surface mounted to concrete. *Engineering Structures* 56 (2013) 945–953. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.032>

## APÊNDICE A – CAPACIDADE DE CISALHAMENTO RESIDUAL DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO APÓS INCÊNDIO

### A.1. EXEMPLO

Determinar as capacidades residuais de cisalhamento após aquecimento de 60 min da viga RCB<sub>60</sub>. A seção transversal das amostras foi de 160 mm × 300 mm, e detalhamento conforme Figura A.1. As propriedades do concreto e do aço estão na Tabela A.1.

Figura A.1 – Seção transversal das vigas

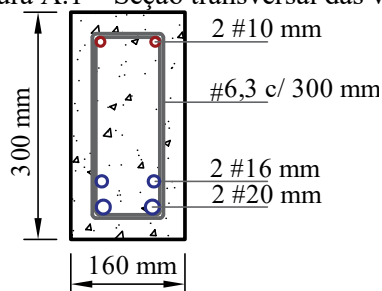


Tabela A.1 – Propriedades mecânicas dos materiais

| Propriedades mecânica          | Concreto | Aço   |
|--------------------------------|----------|-------|
| Resistência à compressão (MPa) | 64,2     | -     |
| Resistência à tração (MPa)     | 4,1      | -     |
| Tensão de escoamento (MPa)     | -        | 563,0 |
| Tensão última (MPa)            | -        | 732,8 |
| Módulo de elasticidade (GPa)   | 36,5     | 205,0 |

### A.2. RESOLUÇÃO

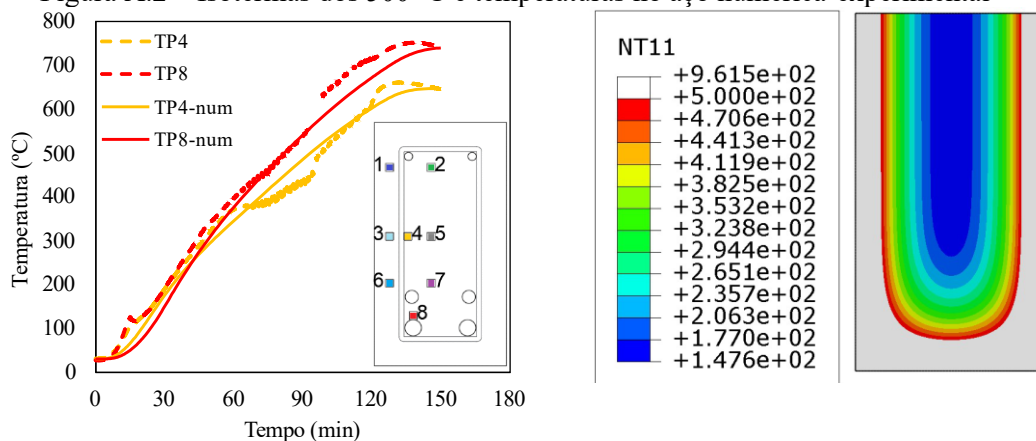
**ETAPA 1.** Determinação das isotermas dos 500 °C e das temperaturas nas barras de aço através do *software* ABAQUS, conforme descrito no subcapítulo 4.1.1.1. As temperaturas nas barras de aço encontradas no modelo numérico foram validadas com base nos dados experimentais, ver Figura A.2. Os dados da seção transversal de concreto e as temperaturas no aço estão resumidos na Tabela A.2 para os tempos de exposição 60, 90 e 120 min.

Tabela A.2 – Seção de concreto reduzida e temperaturas nas barras de aço

| TI (min) | Seção de concreto (mm) |          |           | Temperaturas no aço (°C) |       |       |       |
|----------|------------------------|----------|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|
|          | $b_{fi}$               | $d_{fi}$ | $d_{500}$ | 6,3 mm                   | 10 mm | 16 mm | 20 mm |
| -        |                        |          |           |                          |       |       |       |
| 60       | 115                    | 272,5    | 238,87    | 347                      | 284   | 308   | 379   |
| 90       | 95                     | 252,5    | 238,87    | 496                      | 428   | 475   | 553   |
| 120      | 65                     | 217,5    | 217,5     | 608                      | 539   | 598   | 678   |

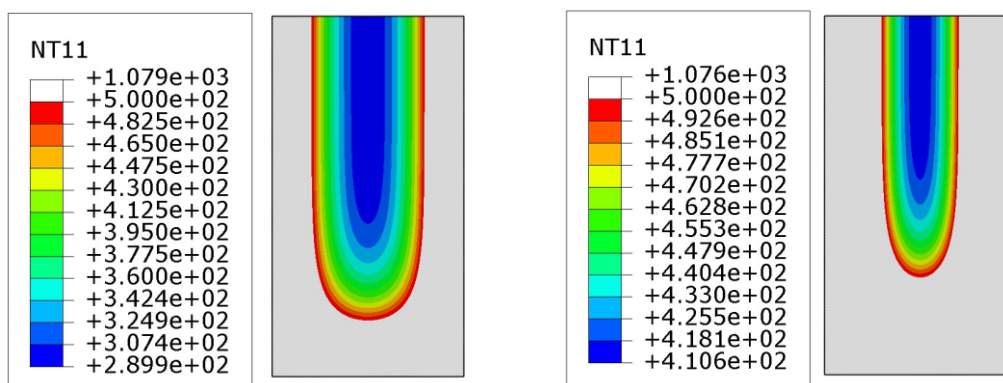
Fonte: O autor (2022)

Figura A.2 – Isotermas dos 500 °C e temperaturas no aço numérica-experimental



(a) Temperaturas no aço (numérico-experimental)

(b) Após 60 min de incêndio



(c) Após 90 min de incêndio

(d) Após 120 min de incêndio

Fonte: O autor (2022)

**ETAPA 2.** Determinação da capacidade de cisalhamento residual da viga

No Modelo de Cálculo I a NBR 6118 (ABNT, 2014) – item 17.4.2.2 – adota a treliça clássica de Ritter-Mörch, ao admitir o ângulo de 45° entre as diagonais comprimidas de concreto (bielas de compressão) e o eixo longitudinal do elemento estrutural, admitindo ainda que a parcela complementar  $V_{c0}$  tem valor constante, independentemente da força cortante solicitante.

Diagonal comprimida do concreto – verificar se ocorre ou não o esmagamento das bielas de compressão

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{64,2}{250} \therefore \alpha_{v2} = 0,7432$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \therefore V_{Rd2} = 353,89 \text{ kN}$$

A parcela ( $V_{c0}$ ) referente à parte da força cortante absorvida pelos mecanismos complementares ao de treliça depende da resistência à tração do concreto ( $f_{ct}$ ).

$$V_{c0} = 0,6 \cdot \frac{f_{ct}}{\gamma_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500}$$

Na ausência de dados sobre a resistência à tração do concreto, pode ser utilizada as expressões da NBR 6118 (ABNT, 2014) para estima-la a partir da resistência a compressão do concreto ( $f_c$ ):

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3 \sqrt[3]{f_c^2}, & f_{ck} < 50 \text{ MPa} \\ 2,12 \cdot \ln(1+0,11 \cdot f_c), & f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases} \therefore f_{ctm} = 4,42 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = \frac{0,7 \cdot f_{ctm}}{\gamma_c} \therefore f_{ct} = 3,1 \text{ MPa}$$

No entanto, a resistência à tração deste exemplo é conhecida e foi determinada experimentalmente por compressão diametral. É sabido que a resistência à tração por compressão diametral é maior do que a resistência à tração direta do concreto (LIBÂNIO; FUSCO, 1976). Este exemplo, portanto, usa a orientação de Libânio para tração direta igual a 90% da resistência determinada por compressão diametral. Então a resistência à tração do concreto, fica:

$$f_{ct} = 3,69 \text{ MPa}$$

Logo, adotando a resistência à tração experimental:  $V_{c0} = 60,82 \text{ kN}$

A parcela referente à contribuição do aço é dada por:

$$V_{s0} = \frac{A_{sw}}{100 \cdot s_{sw}} \cdot k_{sr} \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} \cdot d_{500} = \frac{62,34}{100 \cdot 300} \cdot 1 \cdot \frac{56,3}{1} \cdot 238,87 \therefore V_{s0} = 27,94 \text{ kN}$$

Então, como  $\xi = 2,63$  e  $a/L = 0,5$ :

$$V_{R0} = \frac{V_{c0}}{\xi^{1-a/L}} + V_{s0}, \quad 2 < \xi \leq 3,5$$

Logo, a resistência ao cisalhamento residual é:

$$V_{R0} = 65,39 \text{ kN}$$

A capacidade de cisalhamento residual determinada experimentalmente foi:  $V_{exp} = 88,58 \text{ kN}$

Portanto, a relação  $V_{R0}^{ana}/V_{exp}$  é 0,74. Diante de muitas variáveis que envolve a análise após incêndio, o procedimento simplificado consegue prever com razoável precisão e a favor da segurança.

**Comentário:** Se forem utilizados os valores para resistência à tração a partir das expressões da norma, temos:

$$\text{Usando } f_{ct}: V_{R0}^{ana}/V_{exp} = 0,67$$

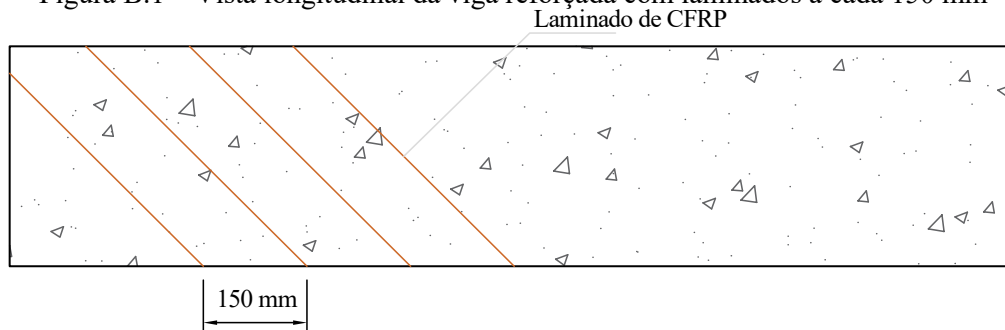
$$\text{Usando } f_{ctm}: V_{R0}^{ana}/V_{exp} = 0,82$$

## APÊNDICE B – CAPACIDADE DE CISLHAMENTO DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO REFORÇADAS

### B.1. EXEMPLO

Determinar a capacidade de cisalhamento da viga RCBS<sub>0-150</sub>. As características da viga são as mesmas da apresentada no APÊNDICE A. No entanto, analisada à temperatura ambiente (sem aquecimento), e reforçada com a inclusão de laminados de 10 mm × 1,2 mm a cada 150 mm, inclinados a 45° com o eixo da viga (Figura B.1). A Tabela B.1 resume as propriedades e características do concreto e do laminado.

Figura B.1 – Vista longitudinal da viga reforçada com laminados a cada 150 mm



Fonte: O autor (2022)

Tabela B.1 – Informações sobre o concreto e laminado

| Concreto            | Laminado de CFRP        |
|---------------------|-------------------------|
| $f_c = 64,2$ MPa    | $a_f = 1,2$ mm          |
| $h_w = 300$ mm      | $b_f = 10$ mm           |
| $b_w = 160$ mm      | $s_{fv} = 150$ mm       |
| $a_g = 3,0$ mm      | $E_f = 165000$ MPa      |
| $b_g = 20$ mm       | $\beta_f = 45^\circ$    |
| $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha_p = 28,5^\circ$ |

Fonte: O autor (2022)

Propriedades geométricas determinadas a partir das informações da Tabela B.1.

$$L_f = \frac{h_w}{\sin(\beta_f)} = 424,26 \text{ mm}$$

$$A_f = a_f \cdot b_f = 12 \text{ mm}$$

$$p_r = 2 \cdot (a_f + b_f) = 22,4 \text{ mm}$$

$$C_{falha} = 2 \cdot (b_f + 1) + (a_f + 1) = 24,2 \text{ mm}$$

$$\gamma = b_g / a_g = 6,67$$

## B.2. RESOLUÇÃO

**ETAPA 1.** Determinação da curva tensão-deslizamento pelo modelo de Zhang et al. (2013). Para o modo de falha de interesse neste trabalho (ou seja, falha no concreto perto da interface bi-material epóxi-concreto), as dimensões da ranhura (ou seja, a altura da ranhura ( $b_g$ ) e a largura da ranhura ( $a_g$ ) são parâmetros que afetam o comportamento do vínculo. Então, as constantes  $A$  e  $B$ , ficam:

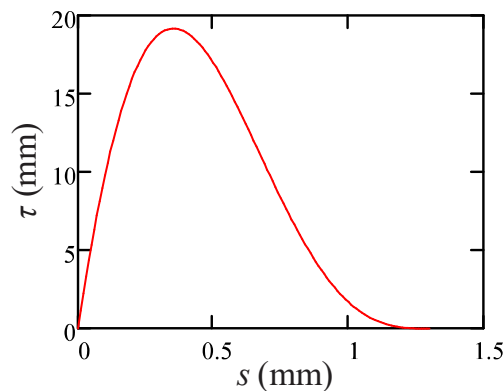
$$A = 0,72 \cdot \gamma^{0,138} \cdot f_c^{0,613} \therefore A = 11,996$$

$$B = 0,37 \cdot \gamma^{0,284} \cdot f_c^{0,006} \therefore B = 0,65$$

A partir da relação  $\tau(s)$  de Zhang et al. (2013) dada pela equação abaixo, é construído o gráfico (Figura B.2) em função do deslizamento ( $s$ ).

$$\tau(s) = A \cdot \left( \frac{2 \cdot B - s}{B} \right)^2 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2 \cdot B - s}{B} \right) \quad \text{para } s \leq 2 \cdot B$$

Figura B.2 – Relação tensão-deslizamento



Determinada a relação  $\tau - s$ , é possível identificar a tensão de aderência média ( $\tau_b$ ), a tensão de aderência máxima ( $\tau_m$ ), o deslizamento no pico de tensão ( $s_m$ ) e o deslizamento na descolagem ( $s_f$ ), conforme descrito no subcapítulo 4.2, e apresentado abaixo:

$$\tau_m = 19,19 \text{ MPa}$$

$$s_m = 0,353 \text{ mm}$$

$$\tau_b = 9,08 \text{ MPa}$$

$$s_f = 0,7154 \text{ mm}$$

O número de laminados ( $N_f$ ) que contribuem para a resistência ao cisalhamento é primeiro definido pelo número de laminados que são cruzados pelo plano de fissura principal de cisalhamento:

$$N_f = \text{round off} \left[ h_w \cdot \frac{(\cot(\beta_f) + \cot(\alpha))}{s_{fv}} \right] \therefore N_f = 4$$

Em seguida, o comprimento de ligação ( $L_{fi}$ ) de cada elemento de é expresso pela equação abaixo, com  $i$  variando até o número de laminados interceptados ( $N_f$ ).

$$L_{fi} = \min \left( i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)}, L_f - i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)} \right)$$

Logo, os comprimentos dos quatro laminados interceptados, foram ( $6 \times 10^{-14}$ ; 106,06; 106,06; 212,13), cujo valor médio  $L_{fim}$  é 106,06 mm.

A energia de fratura interfacial ( $G_f$ ), definida em Bui e Stitmannathum (2020), é função dos parâmetros  $A_b$  e  $B_b$  que dependem de  $L_{fim}$ ,  $p_r$ ,  $\tau_b$ ,  $s_m$  e  $s_f$ .

$$B_b = \frac{\ln(2)}{s_m} \therefore B_b = 1,964 \text{ (1/mm)}$$

$$A_b = \frac{p_r \cdot \tau_b \cdot L_{fim}}{E_f \cdot A_f \cdot (1 - e^{-B_b \cdot s_f})} \therefore A_b = 0,014$$

$$G_f = \frac{E_f \cdot A_f}{p_r} \cdot A_b^2 \cdot \left( \frac{1}{2} e^{-2 \cdot s_f \cdot B_b} - e^{-s_f \cdot B_b} + \frac{1}{2} \right) \therefore G_f = 2,253 \text{ N/mm}$$

O comprimento colado efetivo ( $L_e$ ) é determinado pela Equação (87) dada em Zhang et al. (2014):

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_b^2 \cdot C_{falha}}{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot A_f}} \therefore \eta = 0,0098$$

$$L_e = \frac{1,66}{\eta} \therefore L_e = 169,39 \text{ mm}$$

A determinação da quantidade de laminados interceptados que tenham no mínimo 10% do comprimento colado efetivo ( $L_e$ ), e efetivamente contribuem para a resistência ao cisalhamento é:

$$N_{fe} = 3$$

O fator de redução  $\beta_L$  é determinado por Zhang et al. (2014), utilizando o comprimento colado médio do laminado ( $L_{fim}$ ) encontrado segundo Bui e Stitmannathum (2020):

$$\beta_L = \begin{cases} \frac{L_{fim}}{L_e} (2,08 - 1,08 \cdot \frac{L_{fim}}{L_e}), & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} \geq 1 \end{cases}$$

$$\beta_L = 0,879$$

Para o cálculo do fator de redução referente à proximidade entre laminados adjacentes ( $\beta_e$ ) foi considerada a distância perpendicular livre entre laminados ( $d_{fv}$ ) e a distância limite para um laminado exercer influência no laminado adjacente ( $d_{fe}$ ), dadas pelas equações:

$$d_{fv} = (s_{fv} - a_g) \cdot \sin(\beta_f) \therefore d_{fv} = 103,94 \text{ mm}$$

$$d_{fe} = L_{fim} \cdot \tan(\alpha_b) \therefore d_{fe} = 57,59 \text{ mm}$$

$$\beta_e = \begin{cases} \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}}, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} \geq 1 \end{cases}$$

$$\beta_e = 0,902$$

Portanto, a resistência ao cisalhamento devido ao reforço é dada por:

$$V_f = 2 \cdot N_{fe} \cdot \beta_L \cdot \beta_e \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \frac{p_r}{E_f \cdot A_f}} \therefore V_f = 102,74 \text{ kN}$$

Logo, a resistência nominal ao cisalhamento da peça é a soma das parcelas do concreto, aço e reforço (Quadro B.1). As parcelas do concreto e do aço foram determinadas de acordo com as orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quadro B.1 – Parcelas resistentes ao cisalhamento

| Id.                   | $V_c$<br>(kN) | $V_{sw}$<br>(kN) | $V_f$<br>(kN) | $V_{ana}$<br>(kN) | $V_{exp}$<br>(kN) | $V_{ana}/V_{exp}$ |
|-----------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| RCBS <sub>0-150</sub> | 84,62         | 27,95            | 102,74        | 215,31            | 198,18            | 1,09              |

Portanto, relação  $V_{ana}/V_{exp}$  é 1,09. Levemente contra a segurança, mas dentro da margem de 10%. O resultado foi muito próximo ao encontrado experimentalmente, e satisfatório por se tratar de um procedimento analítico simplificado.

## APÊNDICE C – CAPACIDADE DE CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO REFORÇADAS APÓS INCÊNDIO

### C.1. EXEMPLO

Determinar a capacidade de cisalhamento da viga RCBS<sub>60-150</sub>. As características da viga são as mesmas apresentadas no APÊNDICE A e no APÊNDICE B. A viga foi submetida a um aquecimento de 60 min, resfriada, e reforçada com a inclusão de laminados de 10 mm × 1,2 mm a cada 150 mm, dispostos a 45° com o eixo da viga. A Tabela C.1 resume as propriedades e características do concreto e do laminado.

Tabela C.1 – Informações sobre o concreto e laminado

| Concreto                      | Laminado de CFRP          |
|-------------------------------|---------------------------|
| $f_c = 64,2 \text{ MPa}$      | $a_f = 1,2 \text{ mm}$    |
| $b_{fi} = 115 \text{ mm}$     | $b_f = 10 \text{ mm}$     |
| $d_{500} = 228,87 \text{ mm}$ | $s_{fv} = 150 \text{ mm}$ |

Fonte: O autor (2022)

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento após incêndio nas vigas de concreto armado foi dado pela soma da resistência residual após incêndio da viga, de acordo com o procedimento apresentado no item 4.1.1 (e exemplificado no APÊNDICE A), e da parcela resistente do reforço apresentada no item 4.2.1 (e exemplificado no APÊNDICE B).

Já conhecidos:

$$V_{R\theta}^{\text{ana}} = 65,39 \text{ kN}; V_f = 102,74 \text{ kN e } V_{s\theta} = 27,94 \text{ kN}$$

Tabela C.2 - Resistência residual do concreto (END).

| TI<br>(min) | Ultrassom<br>(MPa) | Arrancamento<br>(MPa) | $f_{c\theta\text{-ND}}$<br>(MPa) |
|-------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 60          | 36,9               | 33,2                  | 33,2                             |
| 90          | 27,7               | 22,0                  | 22,0                             |
| 120         | 18,4               | 21,5                  | 18,4                             |

$f_{c\theta\text{-ND}}$  é menor resistência residual do concreto determinada a partir de END

Fonte: O autor (2022)

### C.2. RESOLUÇÃO

#### C.2.1. Procedimento 1

$$V_{\text{anal}} = V_{R\theta}^{\text{ana}} + \psi_f \cdot V_{f\theta}^{\text{ana}}$$

Baseado no limite recomendado pela ACI 440.2R-17, a soma da resistência proveniente do reforço ao cisalhamento ( $V_f$ ) é limitado à condição:

$$V_{s\theta} + V_{\text{flim}} \leq 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_{fi} \cdot d_{500} \therefore V_{\text{flim}} = 145,27 \text{ kN}$$

$$V_{f\theta}^{\text{ana}} = \text{menor}(V_f; V_{\text{flim}}) \therefore V_{f\theta}^{\text{ana}} = 102,74 \text{ kN}$$

Logo, a parcela do cortante referente ao reforço não sofreu redução devido ao limite normativo.

Então:

$$V_{ana1} = 65,39 + 0,85 \cdot 102,74 \therefore V_{ana1} = 152,73 \text{ kN}$$

Portanto, relação  $V_{ana1}/V_{exp}$  é 1,07. Levemente contra a segurança, mas dentro da margem de 10%.

### C.2.2. Procedimento 2

Conhecido do procedimento anterior:

$$V_{flim} = 145,27 \text{ kN}$$

Dimensionamento do reforço após incêndio a partir de dados de END:

$$V_{ana2} = V_{R0}^{ana} + V_{f0-ND}^{ana}$$

Determinação da curva tensão-deslizamento pelo modelo de Zhang et al. (2013). Para o modo de falha de interesse neste trabalho (ou seja, falha no concreto perto da interface bi-material epóxi-concreto), as dimensões da ranhura (ou seja, a altura da ranhura ( $b_g$ ) e a largura da ranhura ( $a_g$ ) são parâmetros que afetam o comportamento do vínculo. Então, as constantes  $A$  e  $B$ , ficam:

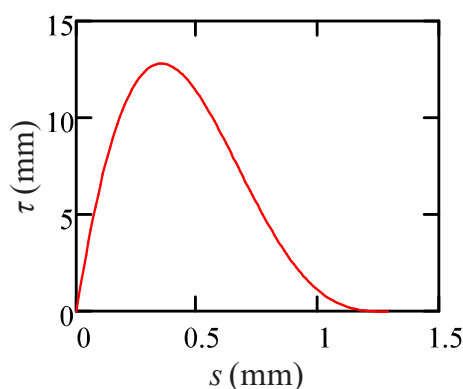
$$A = 0,72 \cdot \gamma^{0,138} \cdot f_c^{0,613} \therefore A = 8,007$$

$$B = 0,37 \cdot \gamma^{0,284} \cdot f_c^{0,006} \therefore B = 0,648$$

A partir da relação  $\tau(s)$  de Zhang et al. (2013) dada pela equação abaixo, é construído o gráfico (Figura B.2) em função do deslizamento ( $s$ ).

$$\tau(s) = A \cdot \left( \frac{2 \cdot B - s}{B} \right)^2 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2 \cdot B - s}{B} \right) \quad \text{para } s \leq 2 \cdot B$$

Figura B.2 – Relação tensão-deslizamento



Determinada a relação  $\tau - s$ , é possível identificar a tensão de aderência média ( $\tau_b$ ), a tensão de aderência máxima ( $\tau_m$ ), o deslizamento no pico de tensão ( $s_m$ ) e o deslizamento na descolagem ( $s_f$ ), conforme descrito no subcapítulo 4.2, e apresentado abaixo:

$$\tau_m = 12,81 \text{ MPa}$$

$$s_m = 0,352 \text{ mm}$$

$$\tau_b = 6,04 \text{ MPa}$$

$$s_f = 0,7125 \text{ mm}$$

O número de laminados ( $N_f$ ) que contribuem para a resistência ao cisalhamento é primeiro definido pelo número de laminados que são cruzados pelo plano de fissura principal de cisalhamento:

$$N_f = \text{round off} \left[ h_w \cdot \frac{(\cot(\beta_f) + \cot(\alpha))}{s_{fv}} \right] \therefore N_f = 4$$

Em seguida, o comprimento de ligação ( $L_{fi}$ ) de cada elemento de é expresso pela equação abaixo, com  $i$  variando até o número de laminados interceptados ( $N_f$ ).

$$L_{fi} = \min \left( i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)}, L_f - i \cdot s_{fv} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta_f)} \right)$$

Logo, os comprimentos dos quatro laminados interceptados, foram ( $6 \times 10^{-14}$ ; 106,06; 106,06; 212,13), cujo valor médio  $L_{fim}$  é 106,06 mm.

A energia de fratura interfacial ( $G_f$ ), definida em Bui e Stitmannathum (2020), é função dos parâmetros  $A_b$  e  $B_b$  que dependem de  $L_{fim}$ ,  $p_r$ ,  $\tau_b$ ,  $s_m$  e  $s_f$ .

$$B_b = \frac{\ln(2)}{s_m} \therefore B_b = 1,972 \text{ (1/mm)}$$

$$A_b = \frac{p_r \cdot \tau_b \cdot L_{fim}}{E_f \cdot A_f \cdot (1 - e^{-B_b \cdot s_f})} \therefore A_b = 0,00961$$

$$G_f = \frac{E_f \cdot A_f}{p_r} \cdot A_b^2 \cdot \left( \frac{1}{2} e^{-2 \cdot s_f B_b} - e^{-s_f B_b} + \frac{1}{2} \right) \therefore G_f = 2,32 \text{ N/mm}$$

O comprimento colado efetivo ( $L_e$ ) é determinado pela Equação (87) dada em Zhang et al. (2014):

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_b^2 \cdot C_{falha}}{2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot A_f}} \therefore \eta = 0,0098$$

$$L_e = \frac{1,66}{\eta} \therefore L_e = 169,39 \text{ mm}$$

A determinação da quantidade de laminados interceptados que tenham no mínimo 10% do comprimento colado efetivo ( $L_e$ ), e efetivamente contribuem para a resistência ao cisalhamento é:

$$N_{fe} = 3$$

O fator de redução  $\beta_L$  é determinado por Zhang et al. (2014), utilizando o comprimento colado médio do laminado ( $L_{fim}$ ) encontrado segundo Bui e Stitmannathum (2020):

$$\beta_L = \begin{cases} \frac{L_{fim}}{L_e} (2,08 - 1,08 \cdot \frac{L_{fim}}{L_e}), & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{L_{fim}}{L_e} \geq 1 \end{cases}$$

$$\beta_L = 0,879$$

Para o cálculo do fator de redução referente à proximidade entre laminados adjacentes ( $\beta_e$ ) foi considerada a distância perpendicular livre entre laminados ( $d_{fv}$ ) e a distância limite para um laminado exercer influência no laminado adjacente ( $d_{fe}$ ), dadas pelas equações:

$$d_{fv} = (s_{fv} - a_g) \cdot \sin(\beta_f) \therefore d_{fv} = 103,94 \text{ mm}$$

$$d_{fe} = L_{fim} \cdot \tan(\alpha_b) \therefore d_{fe} = 57,59 \text{ mm}$$

$$\beta_e = \begin{cases} \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}}, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} < 1 \\ 1, & \text{para } \frac{d_{fv}/2}{d_{fe}} \geq 1 \end{cases}$$

$$\beta_e = 0,902$$

Portanto, a resistência ao cisalhamento devido ao reforço é dada por:

$$V_{f\theta\text{-ND}}^{\text{ana}} = 2 \cdot N_{fe} \cdot \beta_L \cdot \beta_e \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot G_f \cdot \frac{p_r}{E_f \cdot A_f}} \therefore V_{f\theta\text{-ND}}^{\text{ana}} = 68,30 \text{ kN} < V_{flim} \text{ ok!}$$

Logo, a resistência nominal ao cisalhamento da peça é a soma das parcelas do concreto, aço e reforço (Quadro C.1).

Quadro C.1 – Parcelas resistentes ao cisalhamento

| Id.                    | $V_{R\theta}^{\text{ana}}$<br>(kN) | $V_{f\theta\text{-ND}}^{\text{ana}}$<br>(kN) | $V_{\text{ana}2}$<br>(kN) | $V_{\text{exp}}$<br>(kN) | $V_{\text{ana}2}/V_{\text{exp}}$ |
|------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| RCBS <sub>60-150</sub> | 65,39                              | 68,30                                        | 133,70                    | 142,77                   | 0,94                             |

Portanto, relação  $V_{\text{ana}2}/V_{\text{exp}}$  é 0,94. O resultado foi muito próximo ao encontrado experimentalmente, e satisfatório por se tratar de um procedimento analítico simplificado.

## APÊNDICE D – INDICATIVO DE PRODUTIVIDADE

Quadro D.1 – Lista de publicações

| <b>Id.</b> | <b><i>Paper</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b><i>Status</i></b> | <b><i>Qualis</i></b> | <b>Fator de impacto (2021)</b> |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 1          | Applicability of the 500°C isotherm method in determining the strength of reinforced concrete beams after fire. <i>IBRACON Structures and Materials Journal</i> (2021). Doi: <a href="https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200002">https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200002</a> | Publicado            | A3                   | -                              |
| 2          | Procedure for determining the strength to shear of reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP. <i>Materials and Structures</i> (2022). Doi: <a href="https://doi.org/10.1617/s11527-022-01941-9">https://doi.org/10.1617/s11527-022-01941-9</a>                                  | Publicado            | A2                   | 4,285                          |
| 3          | Shear strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams using NSM CFRP laminates. <i>Engineering Structures</i> (2022).                                                                                                                                                              | Submetido            | A1                   | 5,582                          |
| 4          | Analytical procedure to determining shear strengthening with NSM CFRP laminates in fire-damaged RC beams.                                                                                                                                                                                  | A submeter           | A1                   | -                              |

## ANEXO A – CARGA-DESLOCAMENTO DAS VIGAS SEM REFORÇO

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 0.00                 | 0.000        | 0.00                  | 0.00         | 0.000                 | 0.000        | 0.000                  | 0.000        |
| 1.31                 | 0.011        | 1.20                  | 0.01         | 1.490                 | 0.004        | 1.154                  | 0.012        |
| 5.62                 | 0.039        | 10.01                 | 0.12         | 10.015                | 0.114        | 10.010                 | 0.248        |
| 10.48                | 0.080        | 20.33                 | 0.34         | 20.181                | 0.357        | 20.058                 | 0.639        |
| 20.46                | 0.158        | 30.10                 | 0.66         | 30.189                | 0.646        | 35.428                 | 1.190        |
| 30.27                | 0.287        | 40.29                 | 1.00         | 40.284                | 0.966        | 40.168                 | 1.374        |
| 40.67                | 0.441        | 50.14                 | 1.32         | 50.009                | 1.276        | 50.006                 | 1.758        |
| 50.53                | 0.578        | 60.21                 | 1.67         | 60.109                | 1.581        | 60.130                 | 2.152        |
| 60.61                | 0.728        | 70.15                 | 1.95         | 70.029                | 1.909        | 70.134                 | 2.563        |
| 70.23                | 0.883        | 80.15                 | 2.28         | 80.034                | 2.304        | 77.034                 | 2.849        |
| 80.12                | 1.044        | 90.14                 | 2.64         | 90.061                | 2.680        | 96.346                 | 3.703        |
| 90.40                | 1.213        | 100.02                | 2.99         | 100.017               | 3.047        | 100.148                | 3.886        |
| 100.16               | 1.352        | 110.07                | 3.41         | 120.046               | 3.789        | 110.037                | 4.363        |
| 130.30               | 1.831        | 120.02                | 3.89         | 130.172               | 4.169        | 120.042                | 4.855        |
| 140.28               | 1.992        | 130.06                | 4.35         | 140.138               | 4.574        | 120.169                | 4.860        |
| 150.32               | 2.147        | 140.06                | 4.84         | 150.093               | 5.237        | 120.293                | 4.865        |
| 160.19               | 2.338        | 150.03                | 5.35         | 150.207               | 5.243        | 120.410                | 4.871        |
| 160.46               | 2.343        | 150.08                | 5.35         | 150.316               | 5.250        | 120.529                | 4.877        |
| 160.72               | 2.348        | 150.13                | 5.35         | 150.417               | 5.256        | 120.636                | 4.883        |
| 160.98               | 2.352        | 150.19                | 5.35         | 150.504               | 5.262        | 120.735                | 4.888        |
| 161.24               | 2.357        | 150.24                | 5.36         | 150.571               | 5.269        | 120.833                | 4.895        |
| 161.50               | 2.361        | 150.30                | 5.36         | 150.598               | 5.275        | 120.941                | 4.901        |
| 161.76               | 2.366        | 150.36                | 5.36         | 150.555               | 5.281        | 121.052                | 4.906        |
| 162.02               | 2.371        | 150.42                | 5.36         | 150.400               | 5.288        | 121.163                | 4.910        |
| 162.28               | 2.376        | 150.48                | 5.36         | 150.164               | 5.295        | 121.266                | 4.916        |
| 162.55               | 2.380        | 150.53                | 5.37         | 149.894               | 5.302        | 121.368                | 4.923        |
| 162.81               | 2.385        | 150.59                | 5.37         | 149.558               | 5.310        | 121.480                | 4.930        |
| 163.07               | 2.390        | 150.65                | 5.37         | 149.138               | 5.317        | 121.591                | 4.935        |
| 163.33               | 2.394        | 150.71                | 5.37         | 147.821               | 5.327        | 121.695                | 4.940        |
| 163.59               | 2.399        | 150.76                | 5.38         | 144.961               | 5.342        | 121.789                | 4.943        |
| 163.84               | 2.404        | 150.81                | 5.38         | 142.794               | 5.354        | 121.878                | 4.946        |
| 164.08               | 2.409        | 150.87                | 5.38         | 142.034               | 5.362        | 121.966                | 4.951        |
| 164.32               | 2.414        | 150.93                | 5.39         | 141.967               | 5.368        | 122.063                | 4.957        |
| 164.55               | 2.418        | 150.98                | 5.39         | 142.057               | 5.375        | 122.164                | 4.963        |
| 164.77               | 2.423        | 151.04                | 5.39         | 142.177               | 5.381        | 122.260                | 4.969        |
| 164.99               | 2.427        | 151.09                | 5.39         | 142.329               | 5.387        | 122.365                | 4.974        |
| 165.19               | 2.432        | 151.14                | 5.39         | 142.514               | 5.393        | 122.473                | 4.980        |
| 165.38               | 2.437        | 151.20                | 5.40         | 142.721               | 5.400        | 122.581                | 4.985        |
| 165.52               | 2.441        | 151.26                | 5.40         | 142.937               | 5.406        | 122.684                | 4.991        |
| 165.59               | 2.446        | 151.32                | 5.40         | 143.162               | 5.412        | 122.778                | 4.997        |
| 165.52               | 2.451        | 151.38                | 5.41         | 143.390               | 5.418        | 122.880                | 5.002        |
| 165.23               | 2.457        | 151.44                | 5.41         | 143.620               | 5.424        | 122.991                | 5.008        |
| 164.76               | 2.462        | 151.49                | 5.41         | 143.851               | 5.430        | 123.106                | 5.014        |
| 164.33               | 2.469        | 151.55                | 5.41         | 144.080               | 5.436        | 123.215                | 5.021        |
| 164.09               | 2.476        | 151.61                | 5.42         | 144.310               | 5.442        | 123.321                | 5.027        |
| 164.02               | 2.482        | 151.66                | 5.42         | 144.542               | 5.448        | 123.432                | 5.033        |
| 164.04               | 2.488        | 151.71                | 5.42         | 144.776               | 5.454        | 123.535                | 5.039        |
| 164.08               | 2.494        | 151.77                | 5.42         | 145.008               | 5.460        | 123.641                | 5.044        |
| 164.15               | 2.500        | 151.82                | 5.43         | 145.238               | 5.466        | 123.740                | 5.050        |
| 164.23               | 2.506        | 151.88                | 5.43         | 145.468               | 5.472        | 123.844                | 5.055        |
| 164.31               | 2.511        | 151.93                | 5.43         | 145.695               | 5.478        | 123.952                | 5.061        |
| 164.41               | 2.517        | 151.99                | 5.43         | 145.916               | 5.484        | 124.061                | 5.066        |
| 164.52               | 2.523        | 152.04                | 5.44         | 146.131               | 5.490        | 124.168                | 5.072        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
| 164.64              | 2.529        | 152.09               | 5.44         | 146.342              | 5.497        | 124.270               | 5.079        |
| 164.74              | 2.535        | 152.14               | 5.44         | 146.546              | 5.503        | 124.371               | 5.085        |
| 164.85              | 2.541        | 152.19               | 5.44         | 146.745              | 5.509        | 124.470               | 5.092        |
| 164.98              | 2.547        | 152.24               | 5.44         | 146.939              | 5.515        | 124.572               | 5.097        |
| 165.13              | 2.553        | 152.30               | 5.45         | 147.130              | 5.521        | 124.676               | 5.103        |
| 165.27              | 2.558        | 152.35               | 5.45         | 147.323              | 5.527        | 124.779               | 5.108        |
| 165.41              | 2.564        | 152.41               | 5.45         | 147.515              | 5.533        | 124.881               | 5.114        |
| 165.54              | 2.569        | 152.46               | 5.45         | 147.706              | 5.539        | 124.983               | 5.120        |
| 165.69              | 2.575        | 152.52               | 5.46         | 147.894              | 5.545        | 125.079               | 5.126        |
| 165.85              | 2.581        | 152.58               | 5.46         | 148.080              | 5.551        | 125.179               | 5.132        |
| 166.02              | 2.587        | 152.63               | 5.47         | 148.264              | 5.556        | 125.281               | 5.138        |
| 166.18              | 2.593        | 152.68               | 5.47         | 148.446              | 5.562        | 125.371               | 5.145        |
| 166.33              | 2.598        | 152.74               | 5.47         | 148.624              | 5.568        | 125.468               | 5.150        |
| 166.48              | 2.604        | 152.79               | 5.47         | 148.800              | 5.574        | 125.574               | 5.154        |
| 166.62              | 2.609        | 152.85               | 5.47         | 148.977              | 5.580        | 125.672               | 5.160        |
| 166.71              | 2.616        | 152.91               | 5.48         | 149.152              | 5.586        | 125.760               | 5.166        |
| 166.62              | 2.623        | 152.96               | 5.48         | 149.324              | 5.593        | 125.851               | 5.172        |
| 166.22              | 2.632        | 153.02               | 5.48         | 149.488              | 5.600        | 125.938               | 5.180        |
| 165.64              | 2.641        | 153.07               | 5.48         | 149.649              | 5.605        | 126.020               | 5.187        |
| 165.03              | 2.651        | 153.13               | 5.49         | 149.809              | 5.610        | 126.106               | 5.193        |
| 164.35              | 2.662        | 153.18               | 5.49         | 149.968              | 5.616        | 126.204               | 5.199        |
| 163.74              | 2.673        | 153.24               | 5.49         | 150.124              | 5.622        | 126.310               | 5.203        |
| 163.33              | 2.682        | 153.30               | 5.49         | 150.280              | 5.628        | 126.410               | 5.207        |
| 163.06              | 2.691        | 153.36               | 5.49         | 150.436              | 5.634        | 126.487               | 5.212        |
| 162.88              | 2.699        | 153.41               | 5.50         | 150.592              | 5.640        | 126.559               | 5.220        |
| 162.72              | 2.707        | 153.47               | 5.50         | 150.750              | 5.646        | 126.650               | 5.227        |
| 162.57              | 2.716        | 153.52               | 5.50         | 150.905              | 5.652        | 126.745               | 5.233        |
| 162.51              | 2.724        | 153.58               | 5.50         | 151.056              | 5.658        | 126.830               | 5.239        |
| 162.57              | 2.731        | 153.63               | 5.51         | 151.205              | 5.665        | 126.907               | 5.247        |
| 162.72              | 2.738        | 153.68               | 5.51         | 151.356              | 5.673        | 126.987               | 5.255        |
| 162.91              | 2.745        | 153.74               | 5.51         | 151.502              | 5.680        | 127.075               | 5.260        |
| 163.13              | 2.751        | 153.79               | 5.51         | 151.650              | 5.686        | 127.155               | 5.266        |
| 163.37              | 2.758        | 153.84               | 5.52         | 151.798              | 5.690        | 127.231               | 5.272        |
| 163.61              | 2.764        | 153.90               | 5.52         | 151.941              | 5.694        | 127.306               | 5.279        |
| 163.87              | 2.770        | 153.94               | 5.52         | 152.080              | 5.699        | 127.382               | 5.285        |
| 164.13              | 2.776        | 153.99               | 5.52         | 152.213              | 5.704        | 127.460               | 5.290        |
| 164.39              | 2.783        | 154.04               | 5.53         | 152.345              | 5.711        | 127.540               | 5.297        |
| 164.66              | 2.789        | 154.09               | 5.53         | 152.477              | 5.717        | 127.617               | 5.304        |
| 164.93              | 2.795        | 154.14               | 5.53         | 152.610              | 5.723        | 127.685               | 5.312        |
| 165.20              | 2.801        | 154.19               | 5.53         | 152.740              | 5.729        | 127.749               | 5.318        |
| 165.48              | 2.807        | 154.24               | 5.54         | 152.864              | 5.735        | 127.798               | 5.324        |
| 165.75              | 2.813        | 154.30               | 5.54         | 152.987              | 5.740        | 127.834               | 5.331        |
| 166.01              | 2.819        | 154.35               | 5.54         | 153.111              | 5.746        | 127.865               | 5.340        |
| 166.27              | 2.826        | 154.40               | 5.54         | 153.234              | 5.751        | 127.891               | 5.349        |
| 166.53              | 2.832        | 154.45               | 5.55         | 153.354              | 5.757        | 127.904               | 5.356        |
| 166.78              | 2.838        | 154.50               | 5.55         | 153.473              | 5.764        | 127.918               | 5.361        |
| 167.03              | 2.844        | 154.55               | 5.55         | 153.593              | 5.771        | 127.913               | 5.368        |
| 167.28              | 2.850        | 154.61               | 5.55         | 153.708              | 5.777        | 127.884               | 5.376        |
| 167.53              | 2.856        | 154.66               | 5.56         | 153.818              | 5.783        | 127.845               | 5.382        |
| 167.77              | 2.862        | 154.70               | 5.56         | 153.926              | 5.788        | 127.796               | 5.389        |
| 168.01              | 2.868        | 154.76               | 5.56         | 154.034              | 5.794        | 127.733               | 5.395        |
| 168.24              | 2.874        | 154.82               | 5.56         | 154.141              | 5.802        | 127.654               | 5.400        |
| 168.48              | 2.879        | 154.87               | 5.56         | 154.247              | 5.808        | 127.566               | 5.405        |
| 168.72              | 2.884        | 154.92               | 5.57         | 154.351              | 5.814        | 127.493               | 5.411        |
| 168.96              | 2.890        | 154.98               | 5.57         | 154.454              | 5.819        | 127.441               | 5.417        |
| 169.20              | 2.896        | 155.03               | 5.57         | 154.554              | 5.824        | 127.400               | 5.424        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 169.43               | 2.902        | 155.08                | 5.57         | 154.647               | 5.828        | 127.381                | 5.430        |
| 169.67               | 2.908        | 155.13                | 5.58         | 154.740               | 5.832        | 127.379                | 5.435        |
| 169.90               | 2.914        | 155.18                | 5.58         | 154.837               | 5.837        | 127.377                | 5.442        |
| 170.13               | 2.919        | 155.23                | 5.58         | 154.932               | 5.843        | 127.379                | 5.449        |
| 180.06               | 3.173        | 155.28                | 5.58         | 155.025               | 5.849        | 127.396                | 5.456        |
| 190.06               | 3.445        | 155.33                | 5.59         | 155.120               | 5.854        | 127.415                | 5.462        |
| 197.00               | 3.639        | 155.39                | 5.59         | 155.215               | 5.860        | 127.437                | 5.468        |
| 197.16               | 3.642        | 155.43                | 5.59         | 155.311               | 5.867        | 127.467                | 5.473        |
| 197.32               | 3.645        | 155.48                | 5.59         | 155.405               | 5.874        | 127.504                | 5.480        |
| 197.47               | 3.649        | 155.53                | 5.59         | 155.491               | 5.878        | 127.542                | 5.487        |
| 197.62               | 3.652        | 155.58                | 5.60         | 155.574               | 5.882        | 127.577                | 5.494        |
| 197.77               | 3.656        | 155.63                | 5.60         | 155.661               | 5.887        | 127.612                | 5.501        |
| 197.91               | 3.660        | 155.68                | 5.60         | 155.753               | 5.894        | 127.651                | 5.508        |
| 198.06               | 3.664        | 155.72                | 5.60         | 155.848               | 5.900        | 127.696                | 5.514        |
| 198.21               | 3.669        | 155.77                | 5.61         | 155.943               | 5.905        | 127.735                | 5.520        |
| 198.36               | 3.673        | 155.83                | 5.61         | 156.038               | 5.911        | 127.766                | 5.527        |
| 198.53               | 3.676        | 155.88                | 5.61         | 156.134               | 5.917        | 127.793                | 5.533        |
| 198.69               | 3.680        | 155.92                | 5.61         | 156.231               | 5.924        | 127.817                | 5.539        |
| 198.85               | 3.684        | 155.97                | 5.62         | 156.324               | 5.930        | 127.828                | 5.546        |
| 199.01               | 3.689        | 156.02                | 5.62         | 156.412               | 5.936        | 127.834                | 5.553        |
| 199.17               | 3.693        | 156.07                | 5.62         | 156.499               | 5.942        | 127.834                | 5.559        |
| 199.33               | 3.697        | 156.12                | 5.62         | 156.583               | 5.946        | 127.826                | 5.566        |
| 199.49               | 3.701        | 156.18                | 5.62         | 156.665               | 5.951        | 127.811                | 5.572        |
| 199.64               | 3.705        | 156.23                | 5.63         | 156.749               | 5.956        | 127.779                | 5.579        |
| 199.79               | 3.709        | 156.27                | 5.63         | 156.834               | 5.962        | 127.729                | 5.586        |
| 199.94               | 3.713        | 156.32                | 5.63         | 156.919               | 5.968        | 127.660                | 5.594        |
| 200.10               | 3.717        | 156.36                | 5.63         | 157.003               | 5.973        | 127.562                | 5.601        |
| 200.25               | 3.721        | 156.42                | 5.63         | 157.087               | 5.980        | 127.441                | 5.608        |
| 200.39               | 3.725        | 156.47                | 5.63         | 157.172               | 5.986        | 127.304                | 5.614        |
| 200.54               | 3.729        | 156.52                | 5.64         | 157.253               | 5.992        | 127.172                | 5.621        |
| 200.69               | 3.733        | 156.56                | 5.64         | 157.332               | 5.999        | 127.060                | 5.627        |
| 200.84               | 3.737        | 156.62                | 5.64         | 157.408               | 6.006        | 126.974                | 5.630        |
| 200.98               | 3.742        | 156.68                | 5.64         | 157.482               | 6.012        | 126.918                | 5.635        |
| 201.11               | 3.746        | 156.73                | 5.64         | 157.558               | 6.018        | 126.882                | 5.641        |
| 201.25               | 3.749        | 156.78                | 5.65         | 157.631               | 6.024        | 126.858                | 5.648        |
| 201.39               | 3.753        | 156.82                | 5.65         | 157.695               | 6.029        | 126.846                | 5.655        |
| 201.53               | 3.757        | 156.87                | 5.65         | 157.759               | 6.034        | 126.836                | 5.661        |
| 201.67               | 3.761        | 156.92                | 5.66         | 157.826               | 6.037        | 126.829                | 5.669        |
| 201.81               | 3.766        | 156.96                | 5.66         | 157.895               | 6.041        | 126.835                | 5.676        |
| 201.95               | 3.769        | 156.98                | 5.66         | 157.966               | 6.048        | 126.845                | 5.683        |
| 202.09               | 3.773        | 157.00                | 5.66         | 158.036               | 6.055        | 126.854                | 5.689        |
| 202.23               | 3.777        | 157.04                | 5.66         | 158.109               | 6.063        | 126.868                | 5.695        |
| 202.36               | 3.781        | 157.08                | 5.67         | 158.176               | 6.069        | 126.887                | 5.701        |
| 202.50               | 3.784        | 157.11                | 5.67         | 158.233               | 6.074        | 126.910                | 5.708        |
| 202.64               | 3.788        | 157.16                | 5.67         | 158.271               | 6.079        | 126.935                | 5.715        |
| 202.78               | 3.792        | 157.21                | 5.67         | 158.297               | 6.083        | 126.959                | 5.722        |
| 202.91               | 3.795        | 157.26                | 5.67         | 158.321               | 6.088        | 126.982                | 5.729        |
| 203.05               | 3.799        | 157.32                | 5.68         | 158.346               | 6.094        | 127.008                | 5.735        |
| 203.19               | 3.803        | 157.37                | 5.68         | 158.374               | 6.101        | 127.029                | 5.741        |
| 203.33               | 3.807        | 157.41                | 5.68         | 158.407               | 6.107        | 127.038                | 5.746        |
| 203.48               | 3.810        | 157.44                | 5.68         | 158.440               | 6.112        | 127.039                | 5.753        |
| 203.63               | 3.814        | 157.48                | 5.69         | 158.470               | 6.119        | 127.030                | 5.759        |
| 203.79               | 3.817        | 157.52                | 5.69         | 158.503               | 6.126        | 127.012                | 5.765        |
| 203.93               | 3.821        | 157.57                | 5.69         | 158.539               | 6.133        | 126.984                | 5.771        |
| 204.08               | 3.825        | 157.61                | 5.69         | 158.574               | 6.137        | 126.950                | 5.778        |
| 204.22               | 3.829        | 157.66                | 5.69         | 158.605               | 6.142        | 126.912                | 5.785        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 204.37               | 3.833        | 157.70                | 5.70         | 158.628               | 6.147        | 126.866                | 5.791        |
| 204.52               | 3.837        | 157.74                | 5.70         | 158.644               | 6.153        | 126.808                | 5.798        |
| 204.66               | 3.841        | 157.80                | 5.70         | 158.655               | 6.160        | 126.734                | 5.804        |
| 204.81               | 3.845        | 157.84                | 5.70         | 158.659               | 6.165        | 126.639                | 5.812        |
| 204.96               | 3.849        | 157.89                | 5.71         | 158.659               | 6.171        | 126.534                | 5.819        |
| 205.10               | 3.853        | 157.93                | 5.71         | 158.652               | 6.176        | 126.439                | 5.827        |
| 205.25               | 3.857        | 157.99                | 5.71         | 158.644               | 6.182        | 126.360                | 5.832        |
| 205.39               | 3.860        | 158.05                | 5.71         | 158.636               | 6.188        | 126.293                | 5.839        |
| 205.53               | 3.864        | 158.10                | 5.71         | 158.626               | 6.195        | 126.235                | 5.847        |
| 205.67               | 3.869        | 158.14                | 5.72         | 158.612               | 6.201        | 126.187                | 5.855        |
| 205.81               | 3.873        | 158.18                | 5.72         | 158.593               | 6.207        | 126.145                | 5.863        |
| 205.95               | 3.877        | 158.23                | 5.72         | 158.572               | 6.213        | 126.103                | 5.871        |
| 206.09               | 3.881        | 158.28                | 5.72         | 158.554               | 6.220        | 126.069                | 5.876        |
| 206.23               | 3.884        | 158.32                | 5.73         | 158.537               | 6.228        | 126.052                | 5.880        |
| 206.37               | 3.888        | 158.36                | 5.73         | 158.515               | 6.234        | 126.037                | 5.884        |
| 206.50               | 3.891        | 158.41                | 5.73         | 158.496               | 6.239        | 126.024                | 5.891        |
| 206.63               | 3.895        | 158.45                | 5.73         | 158.480               | 6.244        | 126.023                | 5.901        |
| 206.76               | 3.898        | 158.49                | 5.74         | 158.466               | 6.249        | 126.010                | 5.909        |
| 206.88               | 3.902        | 158.54                | 5.74         | 158.452               | 6.256        | 126.004                | 5.917        |
| 207.01               | 3.906        | 158.58                | 5.74         | 158.436               | 6.262        | 126.015                | 5.921        |
| 207.14               | 3.910        | 158.63                | 5.74         | 158.421               | 6.270        | 126.028                | 5.925        |
| 207.27               | 3.914        | 158.67                | 5.74         | 158.409               | 6.278        | 126.039                | 5.931        |
| 207.40               | 3.918        | 158.72                | 5.75         | 158.395               | 6.283        | 126.043                | 5.938        |
| 207.52               | 3.921        | 158.77                | 5.75         | 158.378               | 6.287        | 126.050                | 5.944        |
| 207.65               | 3.925        | 158.82                | 5.75         | 158.358               | 6.292        | 126.069                | 5.950        |
| 207.77               | 3.928        | 158.86                | 5.75         | 158.333               | 6.298        | 126.096                | 5.955        |
| 207.89               | 3.933        | 158.91                | 5.75         | 158.305               | 6.306        | 126.115                | 5.960        |
| 208.00               | 3.937        | 158.96                | 5.76         | 158.273               | 6.314        | 126.122                | 5.968        |
| 208.11               | 3.940        | 159.00                | 5.76         | 158.225               | 6.320        | 126.129                | 5.980        |
| 208.22               | 3.943        | 159.05                | 5.76         | 158.138               | 6.326        | 126.140                | 5.989        |
| 208.33               | 3.947        | 159.09                | 5.76         | 158.025               | 6.332        | 126.156                | 5.995        |
| 208.44               | 3.951        | 159.14                | 5.77         | 157.903               | 6.337        | 126.159                | 6.001        |
| 208.55               | 3.955        | 159.18                | 5.77         | 157.783               | 6.342        | 126.159                | 6.009        |
| 208.65               | 3.959        | 159.23                | 5.77         | 157.673               | 6.349        | 126.173                | 6.015        |
| 208.76               | 3.962        | 159.28                | 5.77         | 157.575               | 6.358        | 126.181                | 6.021        |
| 208.87               | 3.966        | 159.33                | 5.77         | 157.488               | 6.365        | 126.177                | 6.031        |
| 208.97               | 3.970        | 159.38                | 5.78         | 157.414               | 6.372        | 126.176                | 6.039        |
| 209.07               | 3.974        | 159.43                | 5.78         | 157.347               | 6.379        | 126.165                | 6.046        |
| 209.18               | 3.978        | 159.48                | 5.78         | 157.289               | 6.385        | 126.150                | 6.053        |
| 209.28               | 3.981        | 159.53                | 5.78         | 157.238               | 6.391        | 126.131                | 6.058        |
| 209.38               | 3.985        | 159.58                | 5.78         | 157.193               | 6.397        | 126.083                | 6.065        |
| 209.48               | 3.989        | 159.63                | 5.79         | 157.149               | 6.402        | 125.997                | 6.071        |
| 209.57               | 3.992        | 159.68                | 5.79         | 157.105               | 6.408        | 125.843                | 6.078        |
| 209.66               | 3.996        | 159.73                | 5.79         | 157.059               | 6.413        | 125.632                | 6.085        |
| 209.73               | 4.000        | 159.77                | 5.79         | 157.019               | 6.418        | 125.401                | 6.093        |
| 209.81               | 4.004        | 159.81                | 5.80         | 156.982               | 6.423        | 125.201                | 6.100        |
| 209.89               | 4.008        | 159.85                | 5.80         | 156.940               | 6.429        | 125.034                | 6.108        |
| 209.96               | 4.011        | 159.89                | 5.80         | 156.895               | 6.435        | 124.904                | 6.113        |
| 210.03               | 4.015        | 159.94                | 5.80         | 156.850               | 6.442        | 124.796                | 6.118        |
| 210.10               | 4.020        | 159.98                | 5.80         | 156.810               | 6.450        | 124.709                | 6.125        |
| 210.16               | 4.025        | 160.03                | 5.81         | 156.773               | 6.457        | 124.637                | 6.133        |
| 210.21               | 4.029        | 160.07                | 5.81         | 156.737               | 6.464        | 124.580                | 6.140        |
| 210.26               | 4.033        | 160.12                | 5.81         | 156.700               | 6.469        | 124.526                | 6.147        |
| 210.30               | 4.036        | 160.16                | 5.81         | 156.668               | 6.474        | 124.491                | 6.154        |
| 210.34               | 4.039        | 160.20                | 5.81         | 156.641               | 6.480        | 124.469                | 6.159        |
| 210.38               | 4.044        | 160.24                | 5.82         | 156.620               | 6.488        | 124.430                | 6.167        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 210.41               | 4.049        | 160.28                | 5.82         | 156.604               | 6.496        | 124.384                | 6.182        |
| 210.44               | 4.053        | 160.33                | 5.82         | 156.590               | 6.502        | 124.338                | 6.189        |
| 210.46               | 4.057        | 160.39                | 5.82         | 156.569               | 6.507        | 124.295                | 6.194        |
| 210.47               | 4.061        | 160.44                | 5.82         | 156.544               | 6.513        | 124.248                | 6.202        |
| 210.47               | 4.065        | 160.50                | 5.82         | 156.516               | 6.518        | 124.196                | 6.210        |
| 210.44               | 4.069        | 160.55                | 5.82         | 156.491               | 6.523        | 124.137                | 6.217        |
| 210.40               | 4.073        | 160.59                | 5.83         | 156.470               | 6.528        | 124.066                | 6.224        |
| 210.36               | 4.077        | 160.63                | 5.83         | 156.453               | 6.534        | 123.989                | 6.232        |
| 210.31               | 4.081        | 160.66                | 5.83         | 156.439               | 6.540        | 123.920                | 6.238        |
| 210.25               | 4.087        | 160.69                | 5.83         | 156.425               | 6.547        | 123.852                | 6.239        |
| 210.19               | 4.092        | 160.72                | 5.84         | 156.409               | 6.555        | 123.769                | 6.240        |
| 210.14               | 4.096        | 160.76                | 5.84         | 156.391               | 6.561        | 123.699                | 6.248        |
| 210.08               | 4.100        | 160.80                | 5.84         | 156.369               | 6.565        | 123.634                | 6.258        |
| 210.01               | 4.105        | 160.84                | 5.84         | 156.349               | 6.570        | 123.551                | 6.267        |
| 209.89               | 4.110        | 160.88                | 5.84         | 156.332               | 6.577        | 123.461                | 6.270        |
| 209.57               | 4.115        | 160.92                | 5.85         | 156.319               | 6.593        | 123.368                | 6.271        |
| 208.86               | 4.122        | 160.96                | 5.85         | 156.308               | 6.612        | 123.274                | 6.277        |
| 203.65               | 4.141        | 161.00                | 5.85         | 156.297               | 6.623        | 123.173                | 6.285        |
| 192.08               | 4.178        | 161.04                | 5.85         | 156.291               | 6.629        | 123.066                | 6.293        |
| 182.99               | 4.210        | 161.08                | 5.85         | 156.285               | 6.635        | 122.959                | 6.301        |
| 178.99               | 4.230        | 161.13                | 5.86         | 156.274               | 6.643        | 122.832                | 6.308        |
| 177.50               | 4.241        | 161.17                | 5.86         | 156.256               | 6.648        | 122.659                | 6.320        |
| 176.62               | 4.250        | 161.21                | 5.86         | 156.234               | 6.652        | 122.486                | 6.335        |
| 175.76               | 4.258        | 161.25                | 5.86         | 156.211               | 6.657        | 122.329                | 6.343        |
| 174.97               | 4.267        | 161.30                | 5.86         | 156.188               | 6.666        | 122.187                | 6.349        |
| 174.33               | 4.275        | 161.35                | 5.87         | 156.167               | 6.674        | 122.054                | 6.365        |
| 173.80               | 4.282        | 161.39                | 5.87         | 156.143               | 6.679        | 121.908                | 6.379        |
| 173.31               | 4.289        | 161.42                | 5.87         | 156.117               | 6.684        | 121.746                | 6.389        |
| 172.85               | 4.297        | 161.46                | 5.87         | 156.095               | 6.688        | 121.586                | 6.398        |
| 172.42               | 4.304        | 161.50                | 5.87         | 156.075               | 6.696        | 121.445                | 6.407        |
| 172.03               | 4.311        | 161.54                | 5.88         | 156.052               | 6.704        | 121.307                | 6.414        |
| 171.67               | 4.318        | 161.58                | 5.88         | 156.030               | 6.710        | 121.170                | 6.420        |
| 171.33               | 4.325        | 161.62                | 5.88         | 156.007               | 6.716        | 120.980                | 6.429        |
| 171.04               | 4.332        | 161.66                | 5.88         | 155.977               | 6.723        | 120.744                | 6.438        |
| 170.74               | 4.339        | 161.70                | 5.88         | 155.945               | 6.729        | 120.533                | 6.443        |
| 170.49               | 4.345        | 161.73                | 5.89         | 155.910               | 6.736        | 120.365                | 6.445        |
| 170.30               | 4.351        | 161.76                | 5.89         | 155.873               | 6.742        | 120.225                | 6.455        |
| 170.17               | 4.358        | 161.81                | 5.90         | 155.831               | 6.748        | 120.091                | 6.467        |
| 170.07               | 4.364        | 161.86                | 5.90         | 155.782               | 6.754        | 119.959                | 6.478        |
| 170.01               | 4.371        | 161.91                | 5.90         | 155.706               | 6.761        | 119.833                | 6.489        |
| 169.97               | 4.378        | 161.95                | 5.90         | 155.609               | 6.768        | 119.721                | 6.498        |
| 169.95               | 4.384        | 161.99                | 5.90         | 155.530               | 6.773        | 119.612                | 6.502        |
| 169.95               | 4.391        | 162.03                | 5.91         | 155.474               | 6.777        | 119.506                | 6.509        |
| 169.95               | 4.398        | 162.07                | 5.91         | 155.432               | 6.781        | 119.409                | 6.520        |
| 169.96               | 4.405        | 162.11                | 5.91         | 155.392               | 6.786        | 119.323                | 6.531        |
| 169.97               | 4.412        | 162.14                | 5.91         | 155.350               | 6.793        | 119.247                | 6.540        |
| 169.98               | 4.417        | 162.17                | 5.91         | 155.307               | 6.799        | 119.181                | 6.547        |
| 169.97               | 4.423        | 162.20                | 5.92         | 155.266               | 6.805        | 119.111                | 6.553        |
| 169.96               | 4.429        | 162.25                | 5.92         | 155.226               | 6.812        | 119.037                | 6.560        |
| 169.94               | 4.436        | 162.29                | 5.92         | 155.186               | 6.818        | 118.972                | 6.566        |
| 169.91               | 4.441        | 162.34                | 5.92         | 155.147               | 6.825        | 118.911                | 6.572        |
| 169.88               | 4.448        | 162.38                | 5.92         | 155.104               | 6.831        | 118.858                | 6.575        |
| 169.85               | 4.454        | 162.41                | 5.92         | 155.059               | 6.837        | 118.818                | 6.582        |
| 169.82               | 4.460        | 162.44                | 5.93         | 155.017               | 6.843        | 118.782                | 6.591        |
| 169.79               | 4.466        | 162.47                | 5.93         | 154.980               | 6.849        | 118.749                | 6.599        |
| 169.77               | 4.472        | 162.50                | 5.93         | 154.947               | 6.855        | 118.719                | 6.606        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 169.74               | 4.478        | 162.53                | 5.93         | 154.912               | 6.860        | 118.693                | 6.608        |
| 169.71               | 4.485        | 162.56                | 5.93         | 154.873               | 6.866        | 118.663                | 6.612        |
| 169.66               | 4.491        | 162.59                | 5.93         | 154.832               | 6.871        | 118.630                | 6.620        |
| 169.59               | 4.497        | 162.61                | 5.94         | 154.785               | 6.879        | 118.591                | 6.632        |
| 169.50               | 4.504        | 162.64                | 5.94         | 154.717               | 6.889        | 118.548                | 6.644        |
| 169.39               | 4.510        | 162.67                | 5.94         | 154.630               | 6.895        | 118.508                | 6.656        |
| 169.29               | 4.516        | 162.70                | 5.94         | 154.534               | 6.899        | 118.481                | 6.663        |
| 169.22               | 4.522        | 162.73                | 5.94         | 154.436               | 6.903        | 118.461                | 6.670        |
| 169.16               | 4.528        | 162.75                | 5.95         | 154.329               | 6.910        | 118.467                | 6.675        |
| 169.10               | 4.535        | 162.78                | 5.95         | 154.212               | 6.916        | 118.489                | 6.680        |
| 169.04               | 4.543        | 162.80                | 5.95         | 154.102               | 6.924        | 118.500                | 6.689        |
| 168.97               | 4.549        | 162.83                | 5.95         | 154.010               | 6.931        | 118.524                | 6.697        |
| 168.91               | 4.555        | 162.86                | 5.95         | 153.935               | 6.940        | 118.553                | 6.704        |
| 168.85               | 4.561        | 162.88                | 5.96         | 153.873               | 6.948        | 118.576                | 6.711        |
| 168.79               | 4.568        | 162.91                | 5.96         | 153.815               | 6.953        | 118.602                | 6.717        |
| 168.72               | 4.574        | 162.94                | 5.96         | 153.762               | 6.957        | 118.610                | 6.725        |
| 168.65               | 4.580        | 162.96                | 5.96         | 153.713               | 6.961        | 118.628                | 6.723        |
| 168.56               | 4.587        | 162.99                | 5.96         | 153.673               | 6.966        | 118.643                | 6.720        |
| 168.47               | 4.594        | 163.02                | 5.97         | 153.640               | 6.974        | 118.637                | 6.733        |
| 168.38               | 4.600        | 163.06                | 5.97         | 153.604               | 6.984        | 118.628                | 6.752        |
| 168.30               | 4.606        | 163.09                | 5.97         | 153.563               | 6.992        | 118.624                | 6.760        |
| 168.24               | 4.613        | 163.12                | 5.97         | 153.516               | 6.998        | 118.630                | 6.765        |
| 168.20               | 4.619        | 163.15                | 5.97         | 153.458               | 7.004        | 118.643                | 6.773        |
| 168.17               | 4.626        | 163.18                | 5.97         | 153.385               | 7.010        | 118.664                | 6.783        |
| 168.15               | 4.633        | 163.21                | 5.97         | 153.300               | 7.017        | 118.691                | 6.789        |
| 168.14               | 4.639        | 163.23                | 5.98         | 153.210               | 7.022        | 118.722                | 6.794        |
| 168.13               | 4.645        | 163.24                | 5.98         | 153.120               | 7.027        | 118.744                | 6.800        |
| 168.09               | 4.652        | 163.26                | 5.98         | 153.034               | 7.033        | 118.745                | 6.808        |
| 168.04               | 4.659        | 163.29                | 5.98         | 152.946               | 7.041        | 118.744                | 6.818        |
| 167.98               | 4.665        | 163.32                | 5.98         | 152.856               | 7.048        | 118.772                | 6.825        |
| 167.91               | 4.672        | 163.35                | 5.98         | 152.763               | 7.055        | 118.812                | 6.829        |
| 167.85               | 4.678        | 163.38                | 5.98         | 152.669               | 7.062        | 118.831                | 6.837        |
| 167.79               | 4.685        | 163.42                | 5.99         | 152.574               | 7.068        | 118.842                | 6.847        |
| 167.73               | 4.691        | 163.45                | 5.99         | 152.483               | 7.072        | 118.875                | 6.852        |
| 167.67               | 4.698        | 163.48                | 5.99         | 152.389               | 7.067        | 118.914                | 6.856        |
| 167.60               | 4.705        | 163.51                | 5.99         | 152.290               | 7.062        | 118.930                | 6.862        |
| 167.53               | 4.711        | 163.54                | 6.01         | 152.187               | 7.063        | 118.939                | 6.870        |
| 167.47               | 4.717        | 163.55                | 6.16         | 152.075               | 7.069        | 118.950                | 6.879        |
| 167.39               | 4.724        | 163.57                | 6.34         | 151.942               | 7.078        | 118.959                | 6.889        |
| 167.30               | 4.730        | 163.60                | 6.34         | 151.749               | 7.097        | 118.960                | 6.900        |
| 167.15               | 4.737        | 163.63                | 6.25         | 151.520               | 7.115        | 118.955                | 6.909        |
| 166.93               | 4.744        | 163.67                | 6.20         | 151.294               | 7.125        | 118.965                | 6.913        |
| 166.72               | 4.751        | 163.69                | 6.19         | 151.063               | 7.132        | 118.986                | 6.915        |
| 166.56               | 4.758        | 163.71                | 6.20         | 150.792               | 7.140        | 119.003                | 6.918        |
| 166.44               | 4.764        | 163.73                | 6.23         | 150.526               | 7.147        | 119.007                | 6.922        |
| 166.34               | 4.771        | 163.75                | 6.30         | 150.315               | 7.151        | 118.988                | 6.932        |
| 166.26               | 4.778        | 163.77                | 6.35         | 150.156               | 7.157        | 118.971                | 6.943        |
| 166.18               | 4.785        | 163.79                | 6.34         | 150.029               | 7.166        | 118.967                | 6.952        |
| 166.08               | 4.792        | 163.82                | 6.31         | 149.922               | 7.174        | 118.957                | 6.961        |
| 165.96               | 4.798        | 163.84                | 6.28         | 149.830               | 7.181        | 118.953                | 6.968        |
| 165.83               | 4.805        | 163.86                | 6.26         | 149.745               | 7.186        | 118.946                | 6.967        |
| 165.70               | 4.812        | 163.88                | 6.24         | 149.664               | 7.183        | 118.940                | 6.969        |
| 165.53               | 4.818        | 163.91                | 6.25         | 149.600               | 7.185        | 118.943                | 6.981        |
| 165.33               | 4.825        | 163.95                | 6.28         | 149.538               | 7.192        | 118.953                | 6.994        |
| 165.17               | 4.832        | 163.98                | 6.31         | 149.464               | 7.203        | 118.959                | 7.001        |
| 165.08               | 4.839        | 164.01                | 6.34         | 149.379               | 7.212        | 118.961                | 7.003        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0</sub> -NS |              | RCB <sub>60</sub> -NS |              | RCB <sub>90</sub> -NS |              | RCB <sub>120</sub> -NS |              |
|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 165.04               | 4.845        | 164.03                | 6.36         | 149.287               | 7.220        | 118.961                | 7.007        |
| 165.03               | 4.851        | 164.05                | 6.39         | 149.189               | 7.228        | 118.959                | 7.017        |
| 165.01               | 4.858        | 164.08                | 6.39         | 149.086               | 7.233        | 118.953                | 7.029        |
| 164.99               | 4.865        | 164.10                | 6.38         | 148.982               | 7.241        | 118.947                | 7.040        |
| 164.98               | 4.871        | 164.12                | 6.35         | 148.870               | 7.249        | 118.927                | 7.049        |
| 164.96               | 4.877        | 164.16                | 6.32         | 148.746               | 7.251        | 118.893                | 7.056        |
| 164.94               | 4.884        | 164.19                | 6.30         | 148.612               | 7.261        | 118.859                | 7.062        |
| 164.93               | 4.891        | 164.22                | 6.29         | 148.448               | 7.274        | 118.819                | 7.068        |
| 164.91               | 4.897        | 164.25                | 6.28         | 148.249               | 7.284        | 118.775                | 7.073        |
| 164.88               | 4.903        | 164.28                | 6.27         | 148.025               | 7.292        | 118.729                | 7.081        |
| 164.86               | 4.910        | 164.31                | 6.27         | 147.770               | 7.299        | 118.672                | 7.091        |
| 164.83               | 4.916        | 164.35                | 6.28         | 147.463               | 7.305        | 118.601                | 7.099        |
| 164.80               | 4.923        | 164.38                | 6.31         | 147.092               | 7.311        | 118.532                | 7.106        |
| 164.76               | 4.930        | 164.42                | 6.32         | 146.699               | 7.319        | 118.469                | 7.113        |
| 164.72               | 4.936        | 164.45                | 6.29         | 146.319               | 7.327        | 118.403                | 7.119        |
| 164.67               | 4.943        | 164.47                | 6.28         | 145.897               | 7.337        | 118.331                | 7.124        |
| 164.60               | 4.949        | 164.50                | 6.28         | 145.403               | 7.346        | 118.257                | 7.129        |
| 164.52               | 4.956        | 164.52                | 6.30         | 144.924               | 7.346        | 118.174                | 7.134        |
| 164.44               | 4.962        | 164.55                | 6.33         | 144.509               | 7.340        | 118.085                | 7.139        |
| 164.36               | 4.969        | 164.57                | 6.36         | 144.149               | 7.341        | 117.993                | 7.145        |
| 164.29               | 4.976        | 164.58                | 6.37         | 143.813               | 7.357        | 117.900                | 7.151        |
| 164.21               | 4.983        | 164.60                | 6.35         | 143.472               | 7.367        | 117.796                | 7.157        |
| 164.15               | 4.990        | 164.62                | 6.34         | 143.138               | 7.377        | 117.672                | 7.164        |
| 164.10               | 4.996        | 164.64                | 6.33         | 142.823               | 7.391        | 117.541                | 7.171        |
| 164.05               | 5.003        | 164.66                | 6.33         | 142.511               | 7.401        | 117.412                | 7.178        |
| 164.00               | 5.010        | 164.68                | 6.33         | 142.185               | 7.411        | 117.279                | 7.187        |
| 163.94               | 5.017        | 164.70                | 6.33         | 141.830               | 7.412        | 117.138                | 7.197        |
| 163.88               | 5.023        | 164.72                | 6.37         | 141.463               | 7.412        | 116.993                | 7.204        |
| 163.81               | 5.029        | 164.75                | 6.42         | 141.103               | 7.416        | 116.847                | 7.212        |
| 163.74               | 5.035        | 164.77                | 6.47         | 140.757               | 7.430        | 116.702                | 7.222        |
| 163.66               | 5.042        | 164.79                | 6.48         | 140.415               | 7.448        | 116.560                | 7.231        |
| 163.60               | 5.049        | 164.81                | 6.49         | 140.063               | 7.462        | 116.420                | 7.238        |
| 163.55               | 5.056        | 164.83                | 6.49         |                       |              | 116.278                | 7.245        |
| 163.51               | 5.062        | 164.85                | 6.49         |                       |              | 116.123                | 7.253        |
| 163.48               | 5.068        | 164.87                | 6.49         |                       |              | 115.960                | 7.261        |
| 163.45               | 5.075        | 164.90                | 6.47         |                       |              | 115.798                | 7.269        |
| 163.42               | 5.081        | 164.93                | 6.38         |                       |              | 115.629                | 7.278        |
| 163.38               | 5.088        | 164.96                | 6.27         |                       |              | 115.455                | 7.286        |
| 163.35               | 5.096        | 164.99                | 6.22         |                       |              | 115.277                | 7.292        |
| 163.31               | 5.103        | 165.02                | 6.21         |                       |              | 115.098                | 7.298        |
| 163.27               | 5.109        | 165.04                | 6.21         |                       |              | 114.917                | 7.306        |
| 163.22               | 5.115        | 165.07                | 6.21         |                       |              | 114.733                | 7.314        |
| 163.14               | 5.122        | 165.10                | 6.22         |                       |              | 114.533                | 7.324        |
| 163.03               | 5.128        | 165.18                | 6.22         |                       |              | 114.324                | 7.334        |
| 162.88               | 5.135        | 165.33                | 6.22         |                       |              | 114.109                | 7.344        |
| 162.71               | 5.142        | 165.49                | 6.23         |                       |              | 113.888                | 7.353        |
|                      |              | 165.65                | 6.23         |                       |              | 113.670                | 7.360        |
|                      |              | 165.80                | 6.23         |                       |              | 113.457                | 7.365        |
|                      |              | 165.97                | 6.23         |                       |              | 113.257                | 7.373        |
|                      |              | 166.12                | 6.24         |                       |              | 113.085                | 7.379        |
|                      |              | 166.26                | 6.25         |                       |              | 112.938                | 7.384        |
|                      |              | 166.39                | 6.25         |                       |              | 112.776                | 7.392        |
|                      |              | 166.52                | 6.25         |                       |              | 112.607                | 7.401        |
|                      |              | 166.64                | 6.26         |                       |              | 112.436                | 7.408        |
|                      |              | 166.76                | 6.26         |                       |              | 112.255                | 7.415        |
|                      |              | 166.87                | 6.27         |                       |              | 112.050                | 7.424        |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 166.98               | 6.27         |                      |              | 111.788               | 7.434        |
|                     |              | 167.08               | 6.27         |                      |              | 111.459               | 7.445        |
|                     |              | 167.18               | 6.28         |                      |              | 111.039               | 7.457        |
|                     |              | 167.28               | 6.31         |                      |              | 110.420               | 7.467        |
|                     |              | 167.39               | 6.32         |                      |              | 109.299               | 7.477        |
|                     |              | 167.48               | 6.32         |                      |              | 108.288               | 7.487        |
|                     |              | 167.58               | 6.32         |                      |              | 107.764               | 7.498        |
|                     |              | 167.68               | 6.33         |                      |              | 107.496               | 7.508        |
|                     |              | 167.77               | 6.32         |                      |              | 107.266               | 7.516        |
|                     |              | 167.85               | 6.31         |                      |              | 106.988               | 7.524        |
|                     |              | 167.93               | 6.31         |                      |              | 106.518               | 7.530        |
|                     |              | 168.01               | 6.31         |                      |              | 105.817               | 7.539        |
|                     |              | 168.09               | 6.31         |                      |              | 105.050               | 7.553        |
|                     |              | 168.17               | 6.32         |                      |              | 104.368               | 7.565        |
|                     |              | 168.24               | 6.33         |                      |              | 103.793               | 7.576        |
|                     |              | 168.30               | 6.37         |                      |              | 103.306               | 7.585        |
|                     |              | 168.37               | 6.40         |                      |              | 102.885               | 7.595        |
|                     |              | 168.44               | 6.37         |                      |              | 102.504               | 7.604        |
|                     |              | 168.50               | 6.34         |                      |              | 102.161               | 7.611        |
|                     |              | 168.56               | 6.34         |                      |              | 101.837               | 7.620        |
|                     |              | 168.63               | 6.34         |                      |              | 101.516               | 7.630        |
|                     |              | 168.70               | 6.35         |                      |              | 101.186               | 7.639        |
|                     |              | 168.77               | 6.35         |                      |              | 100.839               | 7.651        |
|                     |              | 168.83               | 6.37         |                      |              | 100.492               | 7.664        |
|                     |              | 168.90               | 6.42         |                      |              | 100.143               | 7.675        |
|                     |              | 168.96               | 6.46         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.03               | 6.47         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.09               | 6.45         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.15               | 6.43         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.22               | 6.42         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.28               | 6.44         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.34               | 6.48         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.39               | 6.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.45               | 6.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.50               | 6.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.55               | 6.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.60               | 6.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.65               | 6.50         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.70               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.75               | 6.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.80               | 6.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.84               | 6.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.89               | 6.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.94               | 6.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.00               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.05               | 6.50         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.11               | 6.50         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.16               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.21               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.25               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.29               | 6.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.33               | 6.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.38               | 6.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.43               | 6.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.48               | 6.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.54               | 6.54         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 170.59               | 6.54         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.64               | 6.55         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.69               | 6.55         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.75               | 6.56         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.80               | 6.56         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.84               | 6.56         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.89               | 6.57         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.93               | 6.57         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.99               | 6.57         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.04               | 6.58         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.09               | 6.58         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.14               | 6.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.18               | 6.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.22               | 6.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.26               | 6.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.31               | 6.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.34               | 6.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.38               | 6.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.40               | 6.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.44               | 6.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.50               | 6.61         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.54               | 6.62         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.58               | 6.63         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.61               | 6.63         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.64               | 6.63         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.66               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.67               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.68               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.69               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.70               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.70               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.70               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.70               | 6.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.71               | 6.65         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.72               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.74               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.74               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.74               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.75               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.77               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.78               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.79               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.79               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.80               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.81               | 6.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.81               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.81               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.81               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.82               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.83               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.83               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.84               | 6.65         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.85               | 6.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.87               | 6.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.90               | 6.69         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.92               | 6.70         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 171.94               | 6.70         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.97               | 6.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 171.99               | 6.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.00               | 6.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.01               | 6.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.04               | 6.72         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.06               | 6.75         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.08               | 6.79         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.09               | 6.79         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.10               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.13               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.16               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.22               | 6.76         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.29               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.37               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.41               | 6.75         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.47               | 6.75         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.56               | 6.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.65               | 6.79         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.73               | 6.80         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.80               | 6.81         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.86               | 6.82         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.93               | 6.82         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.99               | 6.83         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.05               | 6.83         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.12               | 6.84         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.17               | 6.84         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.23               | 6.84         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.28               | 6.85         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.33               | 6.85         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.37               | 6.86         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.41               | 6.86         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.45               | 6.87         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.49               | 6.87         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.53               | 6.88         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.57               | 6.88         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.62               | 6.88         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.66               | 6.89         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.70               | 6.89         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.74               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.78               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.82               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.85               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.88               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.93               | 6.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.99               | 6.91         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.05               | 6.92         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.09               | 6.92         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.13               | 6.92         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.17               | 6.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.21               | 6.96         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.25               | 6.96         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.28               | 6.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.32               | 6.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.36               | 6.93         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.40               | 6.92         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 174.44               | 6.92         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.48               | 6.93         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.52               | 6.93         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.55               | 6.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.59               | 6.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.62               | 6.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.66               | 6.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.70               | 6.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.73               | 6.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.76               | 6.96         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.80               | 6.96         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.83               | 6.97         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.86               | 6.98         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.89               | 6.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.92               | 6.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.94               | 6.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.96               | 6.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.98               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.00               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.02               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.04               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.05               | 7.01         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.07               | 7.01         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.06               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.05               | 6.98         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.11               | 6.97         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.28               | 6.97         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.51               | 6.98         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.74               | 6.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.95               | 7.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.17               | 7.03         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.37               | 7.07         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.52               | 7.09         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.65               | 7.10         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.75               | 7.11         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.83               | 7.11         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.91               | 7.10         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.98               | 7.08         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.04               | 7.08         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.09               | 7.09         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.13               | 7.10         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.16               | 7.11         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.15               | 7.11         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.11               | 7.12         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.06               | 7.13         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.02               | 7.14         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.98               | 7.15         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.94               | 7.16         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.92               | 7.17         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.90               | 7.18         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.90               | 7.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.89               | 7.21         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.90               | 7.21         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.91               | 7.22         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.92               | 7.23         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.93               | 7.24         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 176.93               | 7.25         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.92               | 7.26         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.91               | 7.26         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.89               | 7.27         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.87               | 7.28         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.85               | 7.29         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.82               | 7.30         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.79               | 7.31         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.76               | 7.32         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.74               | 7.33         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.73               | 7.34         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.72               | 7.35         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.72               | 7.35         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.73               | 7.36         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.74               | 7.37         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.76               | 7.38         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.78               | 7.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.80               | 7.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.81               | 7.41         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.82               | 7.41         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.84               | 7.42         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.87               | 7.43         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.90               | 7.44         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.93               | 7.45         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.95               | 7.46         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.98               | 7.46         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.00               | 7.47         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.02               | 7.48         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.03               | 7.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.05               | 7.50         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.06               | 7.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.07               | 7.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.07               | 7.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.07               | 7.53         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.06               | 7.54         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.06               | 7.55         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 177.04               | 7.56         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.99               | 7.57         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.89               | 7.58         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.74               | 7.58         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.57               | 7.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.40               | 7.60         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.23               | 7.61         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 176.06               | 7.62         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.91               | 7.63         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.75               | 7.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.61               | 7.65         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.48               | 7.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.36               | 7.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.24               | 7.68         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.13               | 7.69         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 175.01               | 7.70         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.89               | 7.70         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.76               | 7.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.59               | 7.72         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 174.37               | 7.73         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 174.10               | 7.74         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 173.63               | 7.75         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 172.57               | 7.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 170.97               | 7.79         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 169.43               | 7.80         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 168.33               | 7.80         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 167.56               | 7.80         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 166.85               | 7.81         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 166.11               | 7.83         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 165.28               | 7.84         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 164.41               | 7.85         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 163.61               | 7.86         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 162.92               | 7.87         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 162.34               | 7.88         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 161.83               | 7.89         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 161.42               | 7.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 161.07               | 7.91         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 160.76               | 7.92         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 160.49               | 7.93         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 160.27               | 7.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 160.06               | 7.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.87               | 7.96         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.69               | 7.97         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.52               | 7.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.36               | 8.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.20               | 8.01         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 159.04               | 8.02         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.88               | 8.03         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.71               | 8.04         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.53               | 8.04         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.35               | 8.04         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.18               | 8.04         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 158.03               | 8.06         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 157.87               | 8.07         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 157.69               | 8.08         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 157.51               | 8.08         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 157.33               | 8.09         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 157.15               | 8.10         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 156.83               | 8.12         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 156.37               | 8.13         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 155.90               | 8.13         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 155.49               | 8.12         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 155.18               | 8.15         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 154.91               | 8.17         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 154.64               | 8.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 154.38               | 8.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 154.10               | 8.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 153.82               | 8.20         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 153.51               | 8.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 153.21               | 8.21         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 152.91               | 8.23         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 152.52               | 8.25         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 152.04               | 8.28         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 151.55               | 8.31         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 151.04               | 8.32         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 150.55               | 8.33         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 150.07               | 8.35         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 149.60               | 8.36         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 149.14               | 8.38         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 148.69               | 8.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 148.25               | 8.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 147.84               | 8.41         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 147.45               | 8.42         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 147.06               | 8.43         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 146.68               | 8.44         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 146.29               | 8.46         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 145.89               | 8.47         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 145.48               | 8.48         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 145.07               | 8.49         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 144.68               | 8.50         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 144.32               | 8.51         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 143.96               | 8.52         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 143.59               | 8.54         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 143.19               | 8.55         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 142.76               | 8.56         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 142.21               | 8.58         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 141.49               | 8.59         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 140.61               | 8.61         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 139.52               | 8.62         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 138.07               | 8.64         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 136.20               | 8.66         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 134.29               | 8.67         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 132.72               | 8.69         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 131.48               | 8.71         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 130.37               | 8.72         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 128.97               | 8.74         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 127.28               | 8.76         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 125.91               | 8.77         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 125.06               | 8.78         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 124.56               | 8.80         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 124.22               | 8.82         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.99               | 8.84         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.84               | 8.86         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.75               | 8.87         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.70               | 8.88         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.67               | 8.89         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.64               | 8.90         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.59               | 8.91         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.51               | 8.93         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.46               | 8.94         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.42               | 8.95         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.39               | 8.97         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.35               | 8.98         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.31               | 8.99         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.25               | 9.00         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.20               | 9.02         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.14               | 9.02         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 123.05               | 9.03         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.95               | 9.04         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.84               | 9.06         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.75               | 9.07         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.67               | 9.09         |                      |              |                       |              |

Tabela A.1 – Dados carga-deslocamento das vigas

| RCB <sub>0-NS</sub> |              | RCB <sub>60-NS</sub> |              | RCB <sub>90-NS</sub> |              | RCB <sub>120-NS</sub> |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)       | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)        | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) |
|                     |              | 122.60               | 9.10         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.53               | 9.12         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.47               | 9.13         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.41               | 9.14         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.34               | 9.16         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.25               | 9.17         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.16               | 9.17         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 122.06               | 9.18         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.94               | 9.19         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.78               | 9.20         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.63               | 9.22         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.49               | 9.22         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.36               | 9.23         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.22               | 9.25         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 121.09               | 9.26         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 120.95               | 9.29         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 120.79               | 9.30         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 120.62               | 9.31         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 120.40               | 9.33         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 120.09               | 9.34         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 119.62               | 9.35         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 118.94               | 9.36         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 118.21               | 9.36         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 117.58               | 9.36         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 116.93               | 9.37         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 116.05               | 9.38         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 115.10               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 114.25               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 113.52               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 112.90               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 112.41               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 112.00               | 9.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 111.66               | 9.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 111.35               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 111.09               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 110.84               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 110.63               | 9.39         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 110.44               | 9.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 110.22               | 9.40         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 109.81               | 9.41         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 109.22               | 9.42         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 108.56               | 9.42         |                      |              |                       |              |
|                     |              | 107.91               | 9.41         |                      |              |                       |              |

## ANEXO B – CARGA-DESLOCAMENTO DAS VIGAS COM REFORÇO

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 0.00                   | 0.00         | 0.00                   | 0.00         | 0.00                  | 0.00         | 0.00                   | 0.00         | 0.00                   | 0.00         | 0.00                  | 0.00         | 0.00                    | 0.00         | 0.00                    | 0.03         | 0.00                   | 0.00         |
| 1.71                   | 0.02         | 1.41                   | 0.01         | 1.72                  | 0.00         | 1.15                   | 0.00         | 10.02                  | 0.14         | 10.20                 | 0.14         | 10.09                   | 0.24         | 10.00                   | 0.11         | 10.32                  | 0.09         |
| 10.28                  | 0.15         | 10.09                  | 0.09         | 10.35                 | 0.10         | 10.10                  | 0.11         | 100.06                 | 2.05         | 100.05                | 1.71         | 100.02                  | 3.98         | 20.17                   | 0.23         | 100.17                 | 1.85         |
| 20.36                  | 0.38         | 100.13                 | 2.20         | 100.01                | 1.89         | 100.05                 | 2.42         | 110.01                 | 2.28         | 110.01                | 1.89         | 110.03                  | 4.42         | 30.26                   | 0.41         | 110.06                 | 2.06         |
| 30.17                  | 0.60         | 110.05                 | 2.45         | 110.14                | 2.10         | 110.11                 | 2.67         | 120.02                 | 2.51         | 120.03                | 2.06         | 120.03                  | 4.83         | 40.13                   | 0.62         | 120.03                 | 2.27         |
| 40.16                  | 0.89         | 120.10                 | 2.67         | 120.10                | 2.30         | 120.13                 | 2.92         | 130.07                 | 2.74         | 130.01                | 2.23         | 130.01                  | 5.32         | 50.00                   | 0.85         | 130.01                 | 2.51         |
| 50.03                  | 1.16         | 130.05                 | 2.90         | 130.04                | 2.52         | 130.08                 | 3.18         | 140.01                 | 2.97         | 140.00                | 2.42         | 140.01                  | 5.85         | 60.25                   | 1.09         | 140.04                 | 2.73         |
| 60.14                  | 1.41         | 140.05                 | 3.14         | 140.06                | 2.73         | 140.08                 | 3.45         | 150.00                 | 3.21         | 150.00                | 2.56         | 150.02                  | 6.44         | 70.12                   | 1.32         | 150.04                 | 2.96         |
| 70.12                  | 1.69         | 150.02                 | 3.41         | 150.03                | 2.94         | 150.03                 | 3.74         | 160.07                 | 3.45         | 160.06                | 2.72         | 160.01                  | 7.37         | 80.02                   | 1.54         | 160.02                 | 3.21         |
| 80.03                  | 1.94         | 160.15                 | 3.61         | 160.05                | 3.16         | 160.00                 | 4.02         | 170.01                 | 3.77         | 170.04                | 2.90         | 160.06                  | 7.37         | 90.14                   | 1.76         | 170.03                 | 3.45         |
| 90.17                  | 2.20         | 170.25                 | 3.82         | 170.00                | 3.38         | 170.03                 | 4.40         | 180.01                 | 4.06         | 180.02                | 3.08         | 160.11                  | 7.38         | 100.08                  | 1.99         | 180.01                 | 3.69         |
| 99.92                  | 2.44         | 180.15                 | 4.06         | 180.05                | 3.60         | 180.04                 | 4.70         | 190.05                 | 4.34         | 190.06                | 3.35         | 160.16                  | 7.38         | 110.15                  | 2.21         | 190.01                 | 3.95         |
| 100.11                 | 2.44         | 190.06                 | 4.32         | 190.01                | 3.83         | 190.04                 | 5.04         | 200.00                 | 4.62         | 200.02                | 3.53         | 160.21                  | 7.39         | 120.16                  | 2.42         | 200.03                 | 4.20         |
| 110.16                 | 2.70         | 200.14                 | 4.55         | 200.07                | 4.03         | 200.17                 | 5.32         | 210.00                 | 4.92         | 210.02                | 3.70         | 160.26                  | 7.39         | 130.00                  | 2.65         | 210.00                 | 4.37         |
| 120.05                 | 2.93         | 210.06                 | 4.82         | 210.18                | 4.23         | 210.09                 | 5.63         | 220.00                 | 5.23         | 220.07                | 3.90         | 160.31                  | 7.40         | 140.12                  | 2.88         | 220.08                 | 4.64         |
| 130.04                 | 3.18         | 220.19                 | 5.14         | 220.03                | 4.45         | 220.03                 | 6.07         | 230.02                 | 5.62         | 230.06                | 4.10         | 160.36                  | 7.40         | 150.06                  | 3.11         | 230.01                 | 4.95         |
| 140.00                 | 3.44         | 230.04                 | 5.46         | 230.13                | 4.70         | 230.06                 | 6.52         | 240.02                 | 6.08         | 240.08                | 4.31         | 160.41                  | 7.40         | 160.01                  | 3.35         | 240.00                 | 5.30         |
| 150.08                 | 3.71         | 240.19                 | 5.80         | 240.03                | 4.94         | 240.00                 | 7.14         | 250.01                 | 6.51         | 250.09                | 4.51         | 160.46                  | 7.41         | 170.00                  | 3.60         | 250.00                 | 5.81         |
| 160.03                 | 4.03         | 250.00                 | 6.17         | 250.10                | 5.21         | 239.80                 | 7.15         | 258.43                 | 8.08         | 260.07                | 4.74         | 160.51                  | 7.41         | 180.03                  | 3.86         | 260.01                 | 6.32         |
| 170.04                 | 4.34         | 260.06                 | 6.64         | 260.09                | 5.49         | 239.52                 | 7.15         | 250.86                 | 8.35         | 270.05                | 5.00         | 160.55                  | 7.42         | 190.02                  | 4.13         | 259.93                 | 6.32         |
| 180.06                 | 4.62         | 270.11                 | 7.10         | 270.05                | 5.78         | 239.32                 | 7.16         | 240.27                 | 8.46         | 280.05                | 5.24         | 160.60                  | 7.43         | 200.01                  | 4.44         | 259.56                 | 6.33         |
| 190.03                 | 4.95         | 280.10                 | 7.93         | 280.14                | 6.04         | 239.21                 | 7.16         | 230.75                 | 8.59         | 290.03                | 5.49         | 160.65                  | 7.43         | 210.01                  | 4.77         | 259.07                 | 6.33         |
| 200.05                 | 5.28         | 285.03                 | 8.37         | 290.03                | 6.36         | 239.13                 | 7.17         | 230.18                 | 8.60         | 300.03                | 5.76         | 160.70                  | 7.46         | 220.08                  | 5.13         | 258.73                 | 6.34         |
| 210.04                 | 5.65         | 285.13                 | 8.39         | 300.10                | 6.69         | 239.07                 | 7.17         | 229.60                 | 8.61         | 310.02                | 6.05         | 160.76                  | 7.47         | 230.00                  | 5.43         | 258.55                 | 6.34         |
| 214.10                 | 5.81         | 285.23                 | 8.40         | 310.07                | 7.06         | 239.01                 | 7.17         | 229.02                 | 8.61         | 320.06                | 6.23         | 160.83                  | 7.48         | 240.08                  | 5.96         | 258.45                 | 6.34         |
| 173.69                 | 6.32         | 285.31                 | 8.41         | 320.08                | 7.46         | 238.96                 | 7.18         | 228.46                 | 8.62         | 330.04                | 6.63         | 160.89                  | 7.48         | 250.00                  | 6.50         | 258.38                 | 6.35         |
| 220.28                 | 7.37         | 285.38                 | 8.43         | 330.01                | 8.04         | 238.92                 | 7.18         | 227.94                 | 8.63         | 340.05                | 7.53         | 160.96                  | 7.49         | 250.06                  | 6.50         | 258.33                 | 6.35         |
| 230.16                 | 7.81         | 285.45                 | 8.44         | 330.03                | 8.05         | 238.90                 | 7.19         | 227.41                 | 8.64         | 330.98                | 8.07         | 161.01                  | 7.49         | 250.11                  | 6.51         | 258.29                 | 6.35         |
| 230.36                 | 7.82         | 285.50                 | 8.46         | 330.05                | 8.05         | 238.89                 | 7.19         | 226.86                 | 8.65         | 322.00                | 8.20         | 161.06                  | 7.50         | 250.15                  | 6.52         | 258.27                 | 6.35         |
| 230.55                 | 7.83         | 285.53                 | 8.47         | 330.08                | 8.06         | 238.88                 | 7.20         | 226.27                 | 8.66         | 317.38                | 8.22         | 161.12                  | 7.50         | 253.39                  | 7.02         | 258.26                 | 6.36         |
| 230.74                 | 7.84         | 285.53                 | 8.49         | 330.11                | 8.06         | 238.88                 | 7.20         | 225.62                 | 8.67         | 313.18                | 8.24         | 161.18                  | 7.51         | 250.28                  | 8.88         | 258.25                 | 6.36         |
| 230.90                 | 7.85         | 285.49                 | 8.50         | 330.13                | 8.06         | 238.89                 | 7.21         | 224.50                 | 8.68         | 310.00                | 8.25         | 161.23                  | 7.51         | 240.83                  | 9.64         | 258.24                 | 6.36         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 231.05                 | 7.86         | 285.42                 | 8.51         | 330.16                | 8.07         | 238.89                 | 7.21         | 222.33                 | 8.69         | 307.28                | 8.26         | 161.29                  | 7.52         | 230.99                  | 9.82         | 258.25                 | 6.37         |
| 231.18                 | 7.87         | 285.32                 | 8.53         | 330.18                | 8.07         | 238.91                 | 7.22         | 219.68                 | 8.71         | 304.72                | 8.27         | 161.35                  | 7.52         | 220.67                  | 10.07        | 258.25                 | 6.37         |
| 231.31                 | 7.88         | 285.19                 | 8.54         | 330.20                | 8.07         | 238.92                 | 7.22         | 217.23                 | 8.72         | 302.34                | 8.28         | 161.40                  | 7.52         | 210.35                  | 10.23        | 258.26                 | 6.37         |
| 231.44                 | 7.89         | 285.03                 | 8.55         | 330.22                | 8.08         | 238.92                 | 7.23         | 215.01                 | 8.73         | 300.25                | 8.29         | 161.46                  | 7.53         | 209.66                  | 10.24        | 258.27                 | 6.37         |
| 231.55                 | 7.90         | 284.84                 | 8.57         | 330.24                | 8.08         | 238.94                 | 7.23         | 212.78                 | 8.75         | 298.26                | 8.30         | 161.51                  | 7.53         | 209.01                  | 10.24        | 258.29                 | 6.38         |
| 231.66                 | 7.91         | 284.66                 | 8.58         | 330.27                | 8.09         | 238.95                 | 7.23         | 210.47                 | 8.76         | 296.14                | 8.30         | 161.56                  | 7.54         | 208.38                  | 10.25        | 258.31                 | 6.38         |
| 231.77                 | 7.92         | 284.52                 | 8.59         | 330.29                | 8.09         | 238.97                 | 7.24         | 208.16                 | 8.78         | 293.83                | 8.31         | 161.61                  | 7.54         | 207.75                  | 10.26        | 258.33                 | 6.38         |
| 231.87                 | 7.93         | 284.40                 | 8.61         | 330.32                | 8.09         | 238.99                 | 7.24         | 205.86                 | 8.79         | 290.63                | 8.32         | 161.65                  | 7.55         | 207.11                  | 10.27        | 258.35                 | 6.38         |
| 231.98                 | 7.94         | 284.29                 | 8.62         | 330.34                | 8.10         | 239.02                 | 7.25         | 203.42                 | 8.81         | 281.02                | 8.36         | 161.70                  | 7.55         | 206.48                  | 10.28        | 258.37                 | 6.39         |
| 232.10                 | 7.95         | 284.15                 | 8.63         | 330.37                | 8.10         | 239.05                 | 7.25         | 200.79                 | 8.82         | 260.87                | 8.42         | 161.74                  | 7.56         | 205.82                  | 10.29        | 258.40                 | 6.39         |
| 232.23                 | 7.96         | 283.98                 | 8.65         | 330.40                | 8.10         | 239.08                 | 7.26         | 198.19                 | 8.84         | 236.31                | 8.50         | 161.78                  | 7.56         | 205.10                  | 10.29        | 258.42                 | 6.39         |
| 232.36                 | 7.97         | 283.80                 | 8.66         | 330.42                | 8.11         | 239.11                 | 7.26         | 195.75                 | 8.86         | 214.98                | 8.57         | 161.82                  | 7.57         | 204.33                  | 10.30        | 258.45                 | 6.40         |
| 232.50                 | 7.98         | 283.65                 | 8.67         | 330.45                | 8.11         | 239.15                 | 7.27         | 193.49                 | 8.87         | 200.70                | 8.62         | 161.86                  | 7.57         | 203.57                  | 10.31        | 258.48                 | 6.40         |
| 232.65                 | 7.99         | 283.55                 | 8.68         | 330.47                | 8.11         | 239.18                 | 7.27         | 191.34                 | 8.89         | 193.09                | 8.64         | 161.90                  | 7.58         | 202.82                  | 10.32        | 258.52                 | 6.40         |
| 232.79                 | 8.00         | 283.50                 | 8.69         | 330.48                | 8.12         | 239.22                 | 7.28         | 189.19                 | 8.90         | 189.24                | 8.66         | 161.95                  | 7.58         | 202.06                  | 10.33        | 258.55                 | 6.40         |
| 232.94                 | 8.01         | 283.47                 | 8.71         | 330.50                | 8.12         | 239.26                 | 7.28         | 186.96                 | 8.92         | 186.88                | 8.66         | 161.99                  | 7.58         | 201.34                  | 10.34        | 258.58                 | 6.41         |
| 233.06                 | 8.02         | 283.46                 | 8.72         | 330.52                | 8.13         | 239.30                 | 7.28         | 184.58                 | 8.94         | 185.12                | 8.67         | 162.03                  | 7.59         | 200.61                  | 10.35        | 258.61                 | 6.41         |
| 233.17                 | 8.03         | 283.48                 | 8.73         | 330.54                | 8.13         | 239.34                 | 7.29         | 181.99                 | 8.95         | 183.70                | 8.67         | 162.07                  | 7.59         | 199.58                  | 10.36        | 258.64                 | 6.41         |
| 233.24                 | 8.04         | 283.51                 | 8.74         | 330.55                | 8.13         | 239.38                 | 7.29         | 179.26                 | 8.97         | 182.52                | 8.68         | 162.11                  | 7.60         | 198.45                  | 10.37        | 258.67                 | 6.41         |
| 233.24                 | 8.05         | 283.56                 | 8.75         | 330.57                | 8.14         | 239.42                 | 7.30         | 176.40                 | 8.99         | 181.48                | 8.68         | 162.15                  | 7.60         | 197.49                  | 10.37        | 258.70                 | 6.42         |
| 233.08                 | 8.06         | 283.60                 | 8.77         | 330.59                | 8.14         | 239.47                 | 7.30         | 173.21                 | 9.01         | 180.50                | 8.69         | 162.19                  | 7.61         | 196.71                  | 10.38        | 258.74                 | 6.42         |
| 232.64                 | 8.07         | 283.64                 | 8.78         | 330.62                | 8.14         | 239.51                 | 7.31         | 169.58                 | 9.03         | 179.55                | 8.69         | 162.22                  | 7.61         | 196.01                  | 10.39        | 258.77                 | 6.42         |
| 231.56                 | 8.08         | 283.68                 | 8.79         | 330.65                | 8.15         | 239.55                 | 7.31         | 165.99                 | 9.05         | 178.61                | 8.69         | 162.26                  | 7.62         | 195.36                  | 10.39        | 258.80                 | 6.43         |
| 228.89                 | 8.10         | 283.72                 | 8.81         | 330.68                | 8.15         | 239.58                 | 7.32         | 162.98                 | 9.08         | 177.69                | 8.70         | 162.30                  | 7.62         | 194.73                  | 10.40        | 258.84                 | 6.43         |
| 224.81                 | 8.12         | 283.74                 | 8.82         | 330.72                | 8.15         | 239.62                 | 7.32         | 160.62                 | 9.09         | 176.85                | 8.70         | 162.34                  | 7.63         | 194.12                  | 10.41        | 258.88                 | 6.43         |
| 220.63                 | 8.14         | 283.73                 | 8.84         | 330.76                | 8.16         | 239.65                 | 7.33         | 158.65                 | 9.11         | 176.11                | 8.70         | 162.37                  | 7.63         | 193.50                  | 10.42        | 258.91                 | 6.43         |
| 217.39                 | 8.15         | 283.71                 | 8.85         | 330.79                | 8.16         | 239.69                 | 7.33         | 156.92                 | 9.13         | 175.46                | 8.71         | 162.41                  | 7.64         | 192.84                  | 10.43        | 258.95                 | 6.44         |
| 215.37                 | 8.17         | 283.68                 | 8.86         | 330.82                | 8.17         | 239.72                 | 7.33         | 155.38                 | 9.15         | 174.88                | 8.71         | 162.45                  | 7.64         | 192.19                  | 10.45        | 258.99                 | 6.44         |
| 214.14                 | 8.18         | 283.63                 | 8.87         | 330.85                | 8.17         | 239.74                 | 7.34         | 153.97                 | 9.16         | 174.37                | 8.71         | 162.49                  | 7.65         | 191.59                  | 10.46        | 259.03                 | 6.44         |
| 213.28                 | 8.19         | 283.60                 | 8.89         | 330.88                | 8.17         | 239.77                 | 7.34         | 152.68                 | 9.18         | 173.92                | 8.71         | 162.53                  | 7.65         | 191.02                  | 10.47        | 259.06                 | 6.44         |
| 212.52                 | 8.20         | 283.57                 | 8.90         | 330.91                | 8.18         | 239.80                 | 7.35         | 151.40                 | 9.19         | 173.53                | 8.71         | 162.56                  | 7.66         | 190.49                  | 10.48        | 259.10                 | 6.45         |
| 211.74                 | 8.22         | 283.53                 | 8.91         | 330.94                | 8.18         | 239.83                 | 7.35         | 150.00                 | 9.20         | 173.17                | 8.71         | 162.60                  | 7.66         | 190.02                  | 10.49        | 259.13                 | 6.45         |
| 210.89                 | 8.23         | 283.48                 | 8.93         | 330.97                | 8.19         | 239.87                 | 7.36         |                        |              | 172.86                | 8.71         | 162.63                  | 7.67         | 189.59                  | 10.50        | 259.17                 | 6.45         |
| 210.00                 | 8.24         | 283.42                 | 8.94         | 331.01                | 8.19         | 239.90                 | 7.36         |                        |              | 172.56                | 8.71         | 162.67                  | 7.67         | 189.00                  | 10.51        | 259.21                 | 6.46         |
| 209.15                 | 8.25         | 283.34                 | 8.95         | 331.01                | 8.22         | 239.94                 | 7.37         |                        |              | 172.29                | 8.72         | 162.71                  | 7.68         | 188.23                  | 10.52        | 259.24                 | 6.46         |
| 208.37                 | 8.26         | 283.22                 | 8.96         | 330.93                | 8.27         | 239.97                 | 7.37         |                        |              | 172.03                | 8.72         | 162.75                  | 7.68         | 187.46                  | 10.52        | 259.28                 | 6.46         |
| 207.62                 | 8.27         | 283.02                 | 8.98         | 330.86                | 8.30         | 240.00                 | 7.37         |                        |              | 171.79                | 8.72         | 162.79                  | 7.69         | 186.77                  | 10.52        | 259.30                 | 6.47         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
| 206.73                 | 8.29         | 282.75                 | 8.99         | 330.84                | 8.32         | 240.04                 | 7.38         |                        |              | 171.57                | 8.72         | 162.82                  | 7.69         | 186.14                  | 10.52        | 259.33                 | 6.47         |
| 204.40                 | 8.30         | 282.49                 | 9.01         | 330.85                | 8.32         | 240.07                 | 7.38         |                        |              | 171.36                | 8.72         | 162.85                  | 7.70         | 185.56                  | 10.52        | 259.36                 | 6.47         |
| 192.77                 | 8.33         | 282.26                 | 9.03         | 330.87                | 8.33         | 240.10                 | 7.39         |                        |              | 171.15                | 8.72         | 162.88                  | 7.70         | 184.86                  | 10.53        | 259.38                 | 6.47         |
| 176.93                 | 8.37         | 282.07                 | 9.05         | 330.87                | 8.33         | 240.13                 | 7.39         |                        |              |                       |              | 162.92                  | 7.71         | 184.03                  | 10.53        | 259.41                 | 6.48         |
| 166.05                 | 8.40         | 281.88                 | 9.06         | 330.88                | 8.33         | 240.16                 | 7.40         |                        |              |                       |              | 162.96                  | 7.71         | 183.27                  | 10.53        | 259.44                 | 6.48         |
| 159.93                 | 8.42         | 281.69                 | 9.08         | 330.89                | 8.34         | 240.20                 | 7.40         |                        |              |                       |              | 162.99                  | 7.71         | 182.66                  | 10.53        | 259.46                 | 6.48         |
| 155.82                 | 8.44         | 281.47                 | 9.09         | 330.92                | 8.34         | 240.23                 | 7.41         |                        |              |                       |              | 163.02                  | 7.72         | 182.15                  | 10.53        | 259.49                 | 6.48         |
| 152.67                 | 8.44         | 281.21                 | 9.10         | 330.95                | 8.34         | 240.26                 | 7.41         |                        |              |                       |              | 163.05                  | 7.73         | 181.70                  | 10.53        | 259.52                 | 6.49         |
| 150.31                 | 8.45         | 280.88                 | 9.12         | 330.98                | 8.35         | 240.29                 | 7.41         |                        |              |                       |              | 163.09                  | 7.73         | 181.29                  | 10.53        | 259.55                 | 6.49         |
| 146.92                 | 8.46         | 280.47                 | 9.13         | 331.02                | 8.35         | 240.33                 | 7.42         |                        |              |                       |              | 163.13                  | 7.73         | 180.91                  | 10.53        | 259.58                 | 6.49         |
| 130.73                 | 8.54         | 279.99                 | 9.14         | 331.05                | 8.36         | 240.37                 | 7.42         |                        |              |                       |              | 163.17                  | 7.74         | 180.56                  | 10.54        | 259.60                 | 6.49         |
| 111.75                 | 8.63         | 279.49                 | 9.16         | 331.08                | 8.36         | 240.40                 | 7.43         |                        |              |                       |              | 163.21                  | 7.74         | 180.24                  | 10.54        | 259.63                 | 6.50         |
| 102.65                 | 8.66         | 279.01                 | 9.18         | 331.12                | 8.36         | 240.45                 | 7.43         |                        |              |                       |              | 163.25                  | 7.75         | 179.94                  | 10.54        | 259.65                 | 6.50         |
| 100.26                 | 8.67         | 278.57                 | 9.20         | 331.16                | 8.37         | 240.49                 | 7.44         |                        |              |                       |              | 163.28                  | 7.75         | 179.66                  | 10.54        | 259.68                 | 6.50         |
|                        |              | 278.15                 | 9.21         | 331.21                | 8.37         | 240.53                 | 7.44         |                        |              |                       |              | 163.31                  | 7.76         | 179.39                  | 10.54        | 259.70                 | 6.50         |
|                        |              | 277.76                 | 9.23         | 331.25                | 8.37         | 240.57                 | 7.45         |                        |              |                       |              | 163.35                  | 7.76         | 179.15                  | 10.54        | 259.72                 | 6.51         |
|                        |              | 277.37                 | 9.24         | 331.29                | 8.38         | 240.61                 | 7.46         |                        |              |                       |              | 163.40                  | 7.77         | 178.91                  | 10.54        | 259.75                 | 6.51         |
|                        |              | 276.99                 | 9.25         | 331.33                | 8.38         | 240.64                 | 7.46         |                        |              |                       |              | 163.44                  | 7.77         | 178.68                  | 10.54        | 259.78                 | 6.51         |
|                        |              | 276.60                 | 9.26         | 331.37                | 8.39         | 240.66                 | 7.47         |                        |              |                       |              | 163.47                  | 7.78         |                         |              | 259.81                 | 6.52         |
|                        |              | 276.20                 | 9.28         | 331.40                | 8.39         | 240.68                 | 7.47         |                        |              |                       |              | 163.50                  | 7.78         |                         |              | 259.84                 | 6.52         |
|                        |              | 275.78                 | 9.29         | 331.43                | 8.40         | 240.70                 | 7.48         |                        |              |                       |              | 163.53                  | 7.79         |                         |              | 259.87                 | 6.52         |
|                        |              | 275.37                 | 9.30         | 331.46                | 8.40         | 240.71                 | 7.48         |                        |              |                       |              | 163.57                  | 7.79         |                         |              | 259.89                 | 6.52         |
|                        |              | 274.97                 | 9.31         | 331.50                | 8.41         | 240.72                 | 7.49         |                        |              |                       |              | 163.60                  | 7.80         |                         |              | 259.92                 | 6.53         |
|                        |              | 274.56                 | 9.32         | 331.54                | 8.41         | 240.72                 | 7.49         |                        |              |                       |              | 163.64                  | 7.80         |                         |              | 259.95                 | 6.53         |
|                        |              | 274.15                 | 9.34         | 331.58                | 8.41         | 240.72                 | 7.49         |                        |              |                       |              | 163.66                  | 7.81         |                         |              | 259.98                 | 6.53         |
|                        |              | 273.76                 | 9.35         | 331.62                | 8.42         | 240.70                 | 7.50         |                        |              |                       |              | 163.68                  | 7.81         |                         |              | 260.01                 | 6.53         |
|                        |              | 273.41                 | 9.36         | 331.65                | 8.42         | 240.68                 | 7.50         |                        |              |                       |              | 163.70                  | 7.82         |                         |              | 260.04                 | 6.54         |
|                        |              | 273.03                 | 9.38         | 331.69                | 8.42         | 240.65                 | 7.51         |                        |              |                       |              | 163.72                  | 7.82         |                         |              | 260.07                 | 6.54         |
|                        |              | 272.56                 | 9.39         | 331.72                | 8.42         | 240.61                 | 7.51         |                        |              |                       |              | 163.75                  | 7.83         |                         |              | 260.10                 | 6.54         |
|                        |              | 272.09                 | 9.40         | 331.76                | 8.43         | 240.57                 | 7.52         |                        |              |                       |              | 163.78                  | 7.83         |                         |              | 260.13                 | 6.54         |
|                        |              | 271.65                 | 9.42         | 331.80                | 8.43         | 240.53                 | 7.52         |                        |              |                       |              | 163.81                  | 7.83         |                         |              | 260.15                 | 6.55         |
|                        |              | 271.23                 | 9.43         | 331.83                | 8.44         | 240.49                 | 7.53         |                        |              |                       |              | 163.83                  | 7.84         |                         |              | 260.18                 | 6.55         |
|                        |              | 270.81                 | 9.44         | 331.87                | 8.44         | 240.45                 | 7.53         |                        |              |                       |              | 163.86                  | 7.84         |                         |              | 260.20                 | 6.55         |
|                        |              | 270.39                 | 9.46         | 331.90                | 8.45         | 240.40                 | 7.54         |                        |              |                       |              | 163.89                  | 7.85         |                         |              | 260.23                 | 6.55         |
|                        |              | 269.96                 | 9.47         | 331.94                | 8.45         | 240.36                 | 7.54         |                        |              |                       |              | 163.93                  | 7.85         |                         |              | 260.25                 | 6.56         |
|                        |              | 269.54                 | 9.48         | 331.98                | 8.46         | 240.32                 | 7.54         |                        |              |                       |              | 163.96                  | 7.86         |                         |              | 260.27                 | 6.56         |
|                        |              | 269.13                 | 9.50         | 332.02                | 8.46         | 240.29                 | 7.55         |                        |              |                       |              | 163.98                  | 7.86         |                         |              | 260.29                 | 6.56         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              | 268.75                 | 9.51         | 332.04                | 8.46         | 240.25                 | 7.55         |                        |              |                       |              | 164.00                  | 7.87         |                         |              | 260.32                 | 6.57         |
|                        |              | 268.39                 | 9.52         | 332.07                | 8.47         | 240.20                 | 7.56         |                        |              |                       |              | 164.02                  | 7.87         |                         |              | 260.34                 | 6.57         |
|                        |              | 268.08                 | 9.53         | 332.10                | 8.47         | 240.13                 | 7.56         |                        |              |                       |              | 164.05                  | 7.88         |                         |              | 260.36                 | 6.57         |
|                        |              | 267.80                 | 9.55         | 332.14                | 8.48         | 240.07                 | 7.57         |                        |              |                       |              | 164.08                  | 7.88         |                         |              | 260.39                 | 6.57         |
|                        |              | 267.53                 | 9.56         | 332.18                | 8.48         | 240.03                 | 7.57         |                        |              |                       |              | 164.11                  | 7.88         |                         |              | 260.42                 | 6.58         |
|                        |              | 267.27                 | 9.57         | 332.23                | 8.49         | 240.00                 | 7.58         |                        |              |                       |              | 164.14                  | 7.89         |                         |              | 260.44                 | 6.58         |
|                        |              | 267.01                 | 9.59         | 332.27                | 8.49         | 239.98                 | 7.58         |                        |              |                       |              | 164.16                  | 7.89         |                         |              | 260.47                 | 6.58         |
|                        |              | 266.75                 | 9.60         | 332.30                | 8.49         | 239.97                 | 7.59         |                        |              |                       |              | 164.18                  | 7.90         |                         |              | 260.49                 | 6.58         |
|                        |              | 266.50                 | 9.62         | 332.33                | 8.50         | 239.96                 | 7.59         |                        |              |                       |              | 164.20                  | 7.91         |                         |              | 260.52                 | 6.59         |
|                        |              | 266.23                 | 9.63         | 332.35                | 8.50         | 239.97                 | 7.60         |                        |              |                       |              | 164.23                  | 7.91         |                         |              | 260.54                 | 6.59         |
|                        |              | 265.94                 | 9.64         | 332.39                | 8.50         | 239.97                 | 7.60         |                        |              |                       |              | 164.25                  | 7.92         |                         |              | 260.56                 | 6.59         |
|                        |              | 265.65                 | 9.65         | 332.43                | 8.51         | 239.96                 | 7.60         |                        |              |                       |              | 164.28                  | 7.92         |                         |              | 260.57                 | 6.60         |
|                        |              | 265.34                 | 9.67         | 332.46                | 8.51         | 239.96                 | 7.61         |                        |              |                       |              | 164.30                  | 7.93         |                         |              | 260.58                 | 6.60         |
|                        |              | 265.01                 | 9.68         | 332.50                | 8.52         | 239.97                 | 7.61         |                        |              |                       |              | 164.32                  | 7.93         |                         |              | 260.59                 | 6.60         |
|                        |              | 264.66                 | 9.69         | 332.55                | 8.52         | 239.97                 | 7.62         |                        |              |                       |              | 164.35                  | 7.94         |                         |              | 260.61                 | 6.60         |
|                        |              | 264.25                 | 9.71         | 332.59                | 8.53         | 239.97                 | 7.62         |                        |              |                       |              | 164.38                  | 7.94         |                         |              | 260.62                 | 6.61         |
|                        |              | 263.82                 | 9.72         | 332.63                | 8.53         | 239.98                 | 7.63         |                        |              |                       |              | 164.41                  | 7.94         |                         |              | 260.64                 | 6.61         |
|                        |              | 263.35                 | 9.73         | 332.67                | 8.53         | 239.99                 | 7.63         |                        |              |                       |              | 164.44                  | 7.95         |                         |              | 260.65                 | 6.61         |
|                        |              | 262.83                 | 9.75         | 332.71                | 8.54         | 240.00                 | 7.64         |                        |              |                       |              | 164.46                  | 7.95         |                         |              | 260.66                 | 6.61         |
|                        |              | 262.27                 | 9.76         | 332.75                | 8.54         | 240.02                 | 7.64         |                        |              |                       |              | 164.48                  | 7.96         |                         |              | 260.68                 | 6.62         |
|                        |              | 261.68                 | 9.77         | 332.79                | 8.55         | 240.04                 | 7.65         |                        |              |                       |              | 164.51                  | 7.96         |                         |              | 260.69                 | 6.62         |
|                        |              | 261.06                 | 9.79         | 332.83                | 8.55         | 240.06                 | 7.65         |                        |              |                       |              | 164.53                  | 7.97         |                         |              | 260.69                 | 6.62         |
|                        |              | 260.38                 | 9.80         | 332.86                | 8.55         | 240.09                 | 7.65         |                        |              |                       |              | 164.55                  | 7.97         |                         |              | 260.70                 | 6.62         |
|                        |              | 259.60                 | 9.81         | 332.89                | 8.56         | 240.12                 | 7.66         |                        |              |                       |              | 164.56                  | 7.98         |                         |              | 260.71                 | 6.63         |
|                        |              | 258.78                 | 9.83         | 332.92                | 8.56         | 240.16                 | 7.66         |                        |              |                       |              | 164.58                  | 7.98         |                         |              | 260.72                 | 6.63         |
|                        |              | 257.97                 | 9.84         | 332.96                | 8.57         | 240.19                 | 7.67         |                        |              |                       |              | 164.60                  | 7.99         |                         |              | 260.73                 | 6.63         |
|                        |              | 257.17                 | 9.85         | 333.00                | 8.57         | 240.23                 | 7.67         |                        |              |                       |              | 164.63                  | 7.99         |                         |              | 260.74                 | 6.63         |
|                        |              | 256.36                 | 9.87         | 333.03                | 8.57         | 240.27                 | 7.68         |                        |              |                       |              | 164.64                  | 8.00         |                         |              | 260.76                 | 6.64         |
|                        |              | 255.51                 | 9.88         | 333.07                | 8.58         | 240.30                 | 7.68         |                        |              |                       |              | 164.65                  | 8.00         |                         |              | 260.78                 | 6.64         |
|                        |              | 254.60                 | 9.90         | 333.10                | 8.58         | 240.34                 | 7.68         |                        |              |                       |              | 164.67                  | 8.01         |                         |              | 260.80                 | 6.64         |
|                        |              | 253.66                 | 9.91         | 333.14                | 8.59         | 240.37                 | 7.69         |                        |              |                       |              | 164.68                  | 8.01         |                         |              | 260.81                 | 6.65         |
|                        |              | 252.69                 | 9.93         | 333.18                | 8.59         | 240.41                 | 7.69         |                        |              |                       |              | 164.70                  | 8.02         |                         |              | 260.82                 | 6.65         |
|                        |              | 251.65                 | 9.94         | 333.22                | 8.60         | 240.44                 | 7.70         |                        |              |                       |              | 164.71                  | 8.02         |                         |              | 260.84                 | 6.65         |
|                        |              | 250.51                 | 9.96         | 333.26                | 8.60         | 240.48                 | 7.70         |                        |              |                       |              | 164.73                  | 8.03         |                         |              | 260.84                 | 6.65         |
|                        |              | 249.32                 | 9.97         | 333.29                | 8.60         | 240.51                 | 7.71         |                        |              |                       |              | 164.74                  | 8.03         |                         |              | 260.86                 | 6.66         |
|                        |              | 248.16                 | 9.99         | 333.32                | 8.61         | 240.56                 | 7.71         |                        |              |                       |              | 164.76                  | 8.04         |                         |              | 260.87                 | 6.66         |
|                        |              | 247.08                 | 10.00        | 333.35                | 8.61         | 240.60                 | 7.72         |                        |              |                       |              | 164.76                  | 8.04         |                         |              | 260.89                 | 6.66         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              | 245.99                 | 10.02        | 333.38                | 8.62         | 240.64                 | 7.72         |                        |              |                       |              | 164.77                  | 8.05         |                         |              | 260.91                 | 6.67         |
|                        |              | 244.79                 | 10.04        | 333.42                | 8.62         | 240.68                 | 7.72         |                        |              |                       |              | 164.78                  | 8.06         |                         |              | 260.93                 | 6.67         |
|                        |              | 243.25                 | 10.06        | 333.45                | 8.63         | 240.73                 | 7.73         |                        |              |                       |              | 164.79                  | 8.06         |                         |              | 260.94                 | 6.67         |
|                        |              | 238.27                 | 10.09        | 333.47                | 8.63         | 240.77                 | 7.73         |                        |              |                       |              | 164.80                  | 8.07         |                         |              | 260.95                 | 6.67         |
|                        |              | 219.78                 | 10.15        | 333.51                | 8.64         | 240.82                 | 7.74         |                        |              |                       |              | 164.81                  | 8.07         |                         |              | 260.97                 | 6.68         |
|                        |              | 195.63                 | 10.24        | 333.54                | 8.64         | 240.87                 | 7.74         |                        |              |                       |              | 164.81                  | 8.08         |                         |              | 260.98                 | 6.68         |
|                        |              | 182.19                 | 10.29        | 333.57                | 8.64         | 240.92                 | 7.75         |                        |              |                       |              | 164.82                  | 8.08         |                         |              | 261.00                 | 6.68         |
|                        |              | 177.99                 | 10.31        | 333.59                | 8.65         | 240.96                 | 7.75         |                        |              |                       |              | 164.83                  | 8.09         |                         |              | 261.02                 | 6.68         |
|                        |              | 176.74                 | 10.33        | 333.65                | 8.65         | 241.01                 | 7.76         |                        |              |                       |              | 164.84                  | 8.10         |                         |              | 261.05                 | 6.69         |
|                        |              | 175.82                 | 10.34        | 333.75                | 8.66         | 241.05                 | 7.76         |                        |              |                       |              | 164.85                  | 8.10         |                         |              | 261.07                 | 6.69         |
|                        |              | 174.73                 | 10.35        | 333.88                | 8.67         | 241.09                 | 7.77         |                        |              |                       |              | 164.86                  | 8.11         |                         |              | 261.10                 | 6.69         |
|                        |              | 173.69                 | 10.41        | 334.02                | 8.67         | 241.12                 | 7.77         |                        |              |                       |              | 164.87                  | 8.11         |                         |              | 261.13                 | 6.70         |
|                        |              | 172.85                 | 10.61        | 334.15                | 8.68         | 241.14                 | 7.77         |                        |              |                       |              | 164.88                  | 8.12         |                         |              | 261.16                 | 6.70         |
|                        |              | 172.16                 | 9.44         | 334.27                | 8.69         | 241.15                 | 7.78         |                        |              |                       |              | 164.90                  | 8.12         |                         |              | 261.19                 | 6.70         |
|                        |              | 171.60                 | 7.82         | 334.38                | 8.69         | 241.14                 | 7.78         |                        |              |                       |              | 164.92                  | 8.13         |                         |              | 261.22                 | 6.70         |
|                        |              | 171.14                 | 7.08         | 334.48                | 8.70         | 241.12                 | 7.79         |                        |              |                       |              | 164.93                  | 8.13         |                         |              | 261.24                 | 6.71         |
|                        |              | 170.74                 | 6.98         | 334.57                | 8.71         | 241.11                 | 7.79         |                        |              |                       |              | 164.94                  | 8.14         |                         |              | 261.26                 | 6.71         |
|                        |              | 170.39                 | 7.00         | 334.65                | 8.72         | 241.10                 | 7.80         |                        |              |                       |              | 164.94                  | 8.14         |                         |              | 261.28                 | 6.71         |
|                        |              |                        |              | 334.73                | 8.73         | 241.10                 | 7.80         |                        |              |                       |              | 164.95                  | 8.15         |                         |              | 261.29                 | 6.71         |
|                        |              |                        |              | 334.80                | 8.74         | 241.10                 | 7.81         |                        |              |                       |              | 164.95                  | 8.16         |                         |              | 261.31                 | 6.72         |
|                        |              |                        |              | 334.85                | 8.74         | 241.10                 | 7.81         |                        |              |                       |              | 164.96                  | 8.16         |                         |              | 261.32                 | 6.72         |
|                        |              |                        |              | 334.91                | 8.75         | 241.11                 | 7.81         |                        |              |                       |              | 164.97                  | 8.17         |                         |              | 261.34                 | 6.72         |
|                        |              |                        |              | 334.95                | 8.76         | 241.12                 | 7.82         |                        |              |                       |              | 164.97                  | 8.17         |                         |              | 261.36                 | 6.72         |
|                        |              |                        |              | 334.98                | 8.77         | 241.13                 | 7.82         |                        |              |                       |              | 164.97                  | 8.18         |                         |              | 261.37                 | 6.73         |
|                        |              |                        |              | 335.01                | 8.77         | 241.15                 | 7.83         |                        |              |                       |              | 164.98                  | 8.18         |                         |              | 261.38                 | 6.73         |
|                        |              |                        |              | 335.02                | 8.78         | 241.16                 | 7.83         |                        |              |                       |              | 164.98                  | 8.19         |                         |              | 261.40                 | 6.73         |
|                        |              |                        |              | 335.03                | 8.79         | 241.19                 | 7.84         |                        |              |                       |              | 164.98                  | 8.20         |                         |              | 261.41                 | 6.74         |
|                        |              |                        |              | 335.02                | 8.79         | 241.21                 | 7.84         |                        |              |                       |              | 164.98                  | 8.20         |                         |              | 261.42                 | 6.74         |
|                        |              |                        |              | 334.99                | 8.80         | 241.23                 | 7.85         |                        |              |                       |              | 164.99                  | 8.21         |                         |              | 261.44                 | 6.74         |
|                        |              |                        |              | 334.95                | 8.81         | 241.25                 | 7.85         |                        |              |                       |              | 164.99                  | 8.21         |                         |              | 261.45                 | 6.74         |
|                        |              |                        |              | 334.87                | 8.81         | 241.27                 | 7.85         |                        |              |                       |              | 164.99                  | 8.22         |                         |              | 261.45                 | 6.75         |
|                        |              |                        |              | 334.78                | 8.82         | 241.29                 | 7.86         |                        |              |                       |              | 165.00                  | 8.22         |                         |              | 261.46                 | 6.75         |
|                        |              |                        |              | 334.68                | 8.82         | 241.30                 | 7.86         |                        |              |                       |              | 165.01                  | 8.23         |                         |              | 261.46                 | 6.75         |
|                        |              |                        |              | 334.58                | 8.83         | 241.31                 | 7.87         |                        |              |                       |              | 165.01                  | 8.23         |                         |              | 261.47                 | 6.75         |
|                        |              |                        |              | 334.49                | 8.84         | 241.30                 | 7.87         |                        |              |                       |              | 165.01                  | 8.24         |                         |              | 261.48                 | 6.76         |
|                        |              |                        |              | 334.39                | 8.84         | 241.28                 | 7.88         |                        |              |                       |              | 165.02                  | 8.24         |                         |              | 261.48                 | 6.76         |
|                        |              |                        |              | 334.28                | 8.85         | 241.26                 | 7.88         |                        |              |                       |              | 165.03                  | 8.25         |                         |              | 261.49                 | 6.76         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 334.17                | 8.86         | 241.24                 | 7.89         |                        |              |                       |              | 165.04                  | 8.25         |                         |              | 261.51                 | 6.76         |
|                        |              |                        |              | 334.05                | 8.87         | 241.22                 | 7.89         |                        |              |                       |              | 165.05                  | 8.26         |                         |              | 261.52                 | 6.77         |
|                        |              |                        |              | 333.91                | 8.88         | 241.21                 | 7.90         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.26         |                         |              | 261.52                 | 6.77         |
|                        |              |                        |              | 333.78                | 8.89         | 241.21                 | 7.90         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.27         |                         |              | 261.54                 | 6.77         |
|                        |              |                        |              | 333.66                | 8.89         | 241.20                 | 7.91         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.27         |                         |              | 261.55                 | 6.77         |
|                        |              |                        |              | 333.55                | 8.90         | 241.20                 | 7.91         |                        |              |                       |              | 165.10                  | 8.28         |                         |              | 261.56                 | 6.78         |
|                        |              |                        |              | 333.44                | 8.91         | 241.21                 | 7.91         |                        |              |                       |              | 165.11                  | 8.28         |                         |              | 261.57                 | 6.78         |
|                        |              |                        |              | 333.34                | 8.91         | 241.21                 | 7.92         |                        |              |                       |              | 165.12                  | 8.29         |                         |              | 261.59                 | 6.78         |
|                        |              |                        |              | 333.25                | 8.92         | 241.22                 | 7.92         |                        |              |                       |              | 165.13                  | 8.29         |                         |              | 261.61                 | 6.79         |
|                        |              |                        |              | 333.15                | 8.94         | 241.22                 | 7.93         |                        |              |                       |              | 165.13                  | 8.30         |                         |              | 261.63                 | 6.79         |
|                        |              |                        |              | 333.04                | 8.94         | 241.23                 | 7.93         |                        |              |                       |              | 165.13                  | 8.31         |                         |              | 261.65                 | 6.79         |
|                        |              |                        |              | 332.85                | 8.95         | 241.23                 | 7.94         |                        |              |                       |              | 165.13                  | 8.31         |                         |              | 261.67                 | 6.79         |
|                        |              |                        |              | 332.66                | 8.95         | 241.24                 | 7.95         |                        |              |                       |              | 165.13                  | 8.32         |                         |              | 261.68                 | 6.80         |
|                        |              |                        |              | 332.49                | 8.95         | 241.23                 | 7.95         |                        |              |                       |              | 165.12                  | 8.33         |                         |              | 261.69                 | 6.80         |
|                        |              |                        |              | 332.35                | 8.96         | 241.23                 | 7.96         |                        |              |                       |              | 165.12                  | 8.33         |                         |              | 261.70                 | 6.80         |
|                        |              |                        |              | 332.23                | 8.97         | 241.22                 | 7.96         |                        |              |                       |              | 165.11                  | 8.33         |                         |              | 261.71                 | 6.81         |
|                        |              |                        |              | 332.11                | 8.97         | 241.20                 | 7.97         |                        |              |                       |              | 165.11                  | 8.34         |                         |              | 261.73                 | 6.81         |
|                        |              |                        |              | 331.99                | 8.97         | 241.19                 | 7.97         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.35         |                         |              | 261.74                 | 6.81         |
|                        |              |                        |              | 331.89                | 8.98         | 241.17                 | 7.97         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.35         |                         |              | 261.75                 | 6.81         |
|                        |              |                        |              | 331.80                | 8.99         | 241.15                 | 7.98         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.36         |                         |              | 261.76                 | 6.82         |
|                        |              |                        |              | 331.71                | 9.00         | 241.12                 | 7.98         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.36         |                         |              | 261.76                 | 6.82         |
|                        |              |                        |              | 331.62                | 9.00         | 241.10                 | 7.99         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.37         |                         |              | 261.77                 | 6.82         |
|                        |              |                        |              | 331.52                | 9.01         | 241.07                 | 7.99         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.37         |                         |              | 261.77                 | 6.83         |
|                        |              |                        |              | 331.40                | 9.01         | 241.04                 | 8.00         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.38         |                         |              | 261.77                 | 6.83         |
|                        |              |                        |              | 331.30                | 9.02         | 241.00                 | 8.00         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.38         |                         |              | 261.77                 | 6.83         |
|                        |              |                        |              | 331.21                | 9.02         | 240.95                 | 8.01         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.39         |                         |              | 261.77                 | 6.83         |
|                        |              |                        |              | 331.13                | 9.03         | 240.90                 | 8.01         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.39         |                         |              | 261.78                 | 6.84         |
|                        |              |                        |              | 331.05                | 9.04         | 240.83                 | 8.02         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.40         |                         |              | 261.79                 | 6.84         |
|                        |              |                        |              | 330.96                | 9.04         | 240.76                 | 8.02         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.40         |                         |              | 261.79                 | 6.84         |
|                        |              |                        |              | 330.88                | 9.06         | 240.68                 | 8.03         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.41         |                         |              | 261.79                 | 6.85         |
|                        |              |                        |              | 330.80                | 9.07         | 240.58                 | 8.03         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.41         |                         |              | 261.79                 | 6.85         |
|                        |              |                        |              | 330.71                | 9.07         | 240.47                 | 8.03         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.42         |                         |              | 261.78                 | 6.85         |
|                        |              |                        |              | 330.61                | 9.08         | 240.36                 | 8.04         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.42         |                         |              | 261.77                 | 6.85         |
|                        |              |                        |              | 330.52                | 9.08         | 240.24                 | 8.04         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.43         |                         |              | 261.76                 | 6.86         |
|                        |              |                        |              | 330.44                | 9.09         | 240.11                 | 8.05         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.43         |                         |              | 261.75                 | 6.86         |
|                        |              |                        |              | 330.37                | 9.09         | 239.99                 | 8.05         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.44         |                         |              | 261.73                 | 6.86         |
|                        |              |                        |              | 330.31                | 9.10         | 239.86                 | 8.06         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.44         |                         |              | 261.70                 | 6.86         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 330.25                | 9.10         | 239.73                 | 8.06         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.45         |                         |              | 261.68                 | 6.87         |
|                        |              |                        |              | 330.17                | 9.11         | 239.60                 | 8.07         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.46         |                         |              | 261.66                 | 6.87         |
|                        |              |                        |              | 330.07                | 9.11         | 239.45                 | 8.07         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.46         |                         |              | 261.63                 | 6.87         |
|                        |              |                        |              | 329.99                | 9.12         | 239.30                 | 8.08         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.47         |                         |              | 261.60                 | 6.88         |
|                        |              |                        |              | 329.92                | 9.12         | 239.16                 | 8.08         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.47         |                         |              | 261.57                 | 6.88         |
|                        |              |                        |              | 329.88                | 9.13         | 239.02                 | 8.09         |                        |              |                       |              | 165.09                  | 8.48         |                         |              | 261.54                 | 6.88         |
|                        |              |                        |              | 329.84                | 9.13         | 238.90                 | 8.09         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.48         |                         |              | 261.50                 | 6.88         |
|                        |              |                        |              | 329.82                | 9.14         | 238.78                 | 8.10         |                        |              |                       |              | 165.08                  | 8.49         |                         |              | 261.46                 | 6.89         |
|                        |              |                        |              | 329.80                | 9.14         | 238.67                 | 8.10         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.49         |                         |              | 261.42                 | 6.89         |
|                        |              |                        |              | 329.78                | 9.15         | 238.57                 | 8.11         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.50         |                         |              | 261.38                 | 6.89         |
|                        |              |                        |              | 329.77                | 9.15         | 238.47                 | 8.11         |                        |              |                       |              | 165.07                  | 8.50         |                         |              | 261.35                 | 6.90         |
|                        |              |                        |              | 329.76                | 9.16         | 238.37                 | 8.12         |                        |              |                       |              | 165.06                  | 8.51         |                         |              | 261.31                 | 6.90         |
|                        |              |                        |              | 329.75                | 9.17         | 238.27                 | 8.12         |                        |              |                       |              | 165.05                  | 8.51         |                         |              | 261.27                 | 6.90         |
|                        |              |                        |              | 329.76                | 9.17         | 238.16                 | 8.13         |                        |              |                       |              | 165.04                  | 8.52         |                         |              | 261.23                 | 6.91         |
|                        |              |                        |              | 329.76                | 9.18         | 238.06                 | 8.13         |                        |              |                       |              | 165.04                  | 8.52         |                         |              | 261.20                 | 6.91         |
|                        |              |                        |              | 329.77                | 9.18         | 237.95                 | 8.14         |                        |              |                       |              | 165.03                  | 8.53         |                         |              | 261.16                 | 6.91         |
|                        |              |                        |              | 329.79                | 9.19         | 237.84                 | 8.14         |                        |              |                       |              | 165.01                  | 8.53         |                         |              | 261.12                 | 6.91         |
|                        |              |                        |              | 329.82                | 9.19         | 237.73                 | 8.15         |                        |              |                       |              | 164.99                  | 8.54         |                         |              | 261.08                 | 6.92         |
|                        |              |                        |              | 329.85                | 9.20         | 237.61                 | 8.15         |                        |              |                       |              | 164.97                  | 8.55         |                         |              | 261.04                 | 6.92         |
|                        |              |                        |              | 329.87                | 9.21         | 237.49                 | 8.15         |                        |              |                       |              | 164.95                  | 8.55         |                         |              | 261.00                 | 6.92         |
|                        |              |                        |              | 329.90                | 9.21         | 237.37                 | 8.16         |                        |              |                       |              | 164.94                  | 8.56         |                         |              | 260.95                 | 6.92         |
|                        |              |                        |              | 329.93                | 9.22         | 237.27                 | 8.16         |                        |              |                       |              | 164.92                  | 8.56         |                         |              | 260.89                 | 6.93         |
|                        |              |                        |              | 329.95                | 9.22         | 237.18                 | 8.17         |                        |              |                       |              | 164.91                  | 8.57         |                         |              | 260.84                 | 6.93         |
|                        |              |                        |              | 329.98                | 9.23         | 237.10                 | 8.17         |                        |              |                       |              | 164.91                  | 8.57         |                         |              | 260.78                 | 6.93         |
|                        |              |                        |              | 330.01                | 9.23         | 237.04                 | 8.18         |                        |              |                       |              | 164.90                  | 8.58         |                         |              | 260.73                 | 6.94         |
|                        |              |                        |              | 330.05                | 9.24         | 236.98                 | 8.18         |                        |              |                       |              | 164.90                  | 8.58         |                         |              | 260.69                 | 6.94         |
|                        |              |                        |              | 330.08                | 9.25         | 236.94                 | 8.19         |                        |              |                       |              | 164.88                  | 8.59         |                         |              | 260.61                 | 6.95         |
|                        |              |                        |              | 330.11                | 9.25         | 236.90                 | 8.19         |                        |              |                       |              | 164.87                  | 8.60         |                         |              | 263.29                 | 7.31         |
|                        |              |                        |              | 330.13                | 9.26         | 236.88                 | 8.20         |                        |              |                       |              | 164.85                  | 8.61         |                         |              | 264.01                 | 7.60         |
|                        |              |                        |              | 330.16                | 9.26         | 236.86                 | 8.20         |                        |              |                       |              | 164.85                  | 8.62         |                         |              | 250.66                 | 8.08         |
|                        |              |                        |              | 330.19                | 9.27         | 236.85                 | 8.21         |                        |              |                       |              | 164.84                  | 8.62         |                         |              | 250.21                 | 8.09         |
|                        |              |                        |              | 330.22                | 9.27         | 236.84                 | 8.21         |                        |              |                       |              | 164.83                  | 8.63         |                         |              | 249.73                 | 8.10         |
|                        |              |                        |              | 330.25                | 9.28         | 236.83                 | 8.22         |                        |              |                       |              | 164.82                  | 8.64         |                         |              | 249.24                 | 8.11         |
|                        |              |                        |              | 330.28                | 9.29         | 236.83                 | 8.22         |                        |              |                       |              | 164.81                  | 8.64         |                         |              | 248.64                 | 8.13         |
|                        |              |                        |              | 330.29                | 9.29         | 236.83                 | 8.23         |                        |              |                       |              | 164.80                  | 8.65         |                         |              | 247.84                 | 8.14         |
|                        |              |                        |              | 330.30                | 9.30         | 236.83                 | 8.23         |                        |              |                       |              | 164.80                  | 8.65         |                         |              | 246.92                 | 8.15         |
|                        |              |                        |              | 330.32                | 9.30         | 236.83                 | 8.24         |                        |              |                       |              | 164.78                  | 8.66         |                         |              | 245.94                 | 8.16         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 330.34                | 9.31         | 236.83                 | 8.24         |                        |              |                       |              | 164.77                  | 8.66         |                         |              | 244.90                 | 8.18         |
|                        |              |                        |              | 330.36                | 9.31         | 236.83                 | 8.24         |                        |              |                       |              | 164.75                  | 8.67         |                         |              | 243.70                 | 8.19         |
|                        |              |                        |              | 330.38                | 9.32         | 236.82                 | 8.25         |                        |              |                       |              | 164.72                  | 8.67         |                         |              | 242.31                 | 8.21         |
|                        |              |                        |              | 330.41                | 9.33         | 236.82                 | 8.25         |                        |              |                       |              | 164.70                  | 8.68         |                         |              | 240.78                 | 8.22         |
|                        |              |                        |              | 330.44                | 9.33         | 236.82                 | 8.26         |                        |              |                       |              | 164.68                  | 8.68         |                         |              | 239.08                 | 8.23         |
|                        |              |                        |              | 330.46                | 9.34         | 236.82                 | 8.26         |                        |              |                       |              | 164.66                  | 8.69         |                         |              | 237.09                 | 8.25         |
|                        |              |                        |              | 330.48                | 9.34         | 236.81                 | 8.27         |                        |              |                       |              | 164.63                  | 8.70         |                         |              | 234.46                 | 8.27         |
|                        |              |                        |              | 330.49                | 9.35         | 236.80                 | 8.27         |                        |              |                       |              | 164.61                  | 8.70         |                         |              | 230.27                 | 8.29         |
|                        |              |                        |              | 330.51                | 9.36         | 236.78                 | 8.28         |                        |              |                       |              | 164.59                  | 8.71         |                         |              | 223.95                 | 8.31         |
|                        |              |                        |              | 330.53                | 9.36         | 236.76                 | 8.28         |                        |              |                       |              | 164.58                  | 8.71         |                         |              | 217.11                 | 8.34         |
|                        |              |                        |              | 330.55                | 9.37         | 236.74                 | 8.29         |                        |              |                       |              | 164.56                  | 8.72         |                         |              | 211.48                 | 8.37         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.37         | 236.71                 | 8.29         |                        |              |                       |              | 164.55                  | 8.72         |                         |              | 207.36                 | 8.40         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.38         | 236.69                 | 8.30         |                        |              |                       |              | 164.54                  | 8.73         |                         |              | 204.26                 | 8.42         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.39         | 236.67                 | 8.30         |                        |              |                       |              | 164.53                  | 8.74         |                         |              | 201.73                 | 8.44         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.39         | 236.64                 | 8.30         |                        |              |                       |              | 164.52                  | 8.74         |                         |              | 199.50                 | 8.47         |
|                        |              |                        |              | 330.62                | 9.40         | 236.62                 | 8.31         |                        |              |                       |              | 164.51                  | 8.75         |                         |              | 197.42                 | 8.48         |
|                        |              |                        |              | 330.65                | 9.40         | 236.58                 | 8.31         |                        |              |                       |              | 164.49                  | 8.75         |                         |              | 195.40                 | 8.50         |
|                        |              |                        |              | 330.67                | 9.41         | 236.54                 | 8.32         |                        |              |                       |              | 164.48                  | 8.76         |                         |              | 193.37                 | 8.52         |
|                        |              |                        |              | 330.68                | 9.42         | 236.49                 | 8.32         |                        |              |                       |              | 164.47                  | 8.77         |                         |              | 191.31                 | 8.54         |
|                        |              |                        |              | 330.70                | 9.42         | 236.44                 | 8.33         |                        |              |                       |              | 164.46                  | 8.77         |                         |              | 189.23                 | 8.57         |
|                        |              |                        |              | 330.72                | 9.43         | 236.39                 | 8.33         |                        |              |                       |              | 164.44                  | 8.78         |                         |              | 187.17                 | 8.59         |
|                        |              |                        |              | 330.72                | 9.43         | 236.34                 | 8.34         |                        |              |                       |              | 164.43                  | 8.79         |                         |              | 185.21                 | 8.61         |
|                        |              |                        |              | 330.71                | 9.44         | 236.29                 | 8.34         |                        |              |                       |              | 164.42                  | 8.79         |                         |              | 183.40                 | 8.63         |
|                        |              |                        |              | 330.68                | 9.45         | 236.22                 | 8.35         |                        |              |                       |              | 164.40                  | 8.80         |                         |              | 181.78                 | 8.65         |
|                        |              |                        |              | 330.65                | 9.45         | 235.99                 | 8.35         |                        |              |                       |              | 164.38                  | 8.80         |                         |              | 180.37                 | 8.67         |
|                        |              |                        |              | 330.63                | 9.46         | 235.61                 | 8.36         |                        |              |                       |              | 164.36                  | 8.81         |                         |              | 179.14                 | 8.69         |
|                        |              |                        |              | 330.61                | 9.46         | 235.23                 | 8.36         |                        |              |                       |              | 164.34                  | 8.82         |                         |              | 178.01                 | 8.71         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.47         | 234.92                 | 8.37         |                        |              |                       |              | 164.32                  | 8.82         |                         |              | 176.93                 | 8.73         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.48         | 234.69                 | 8.38         |                        |              |                       |              | 164.30                  | 8.83         |                         |              | 175.89                 | 8.74         |
|                        |              |                        |              | 330.58                | 9.48         | 234.48                 | 8.39         |                        |              |                       |              | 164.27                  | 8.83         |                         |              | 174.86                 | 8.76         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.49         | 234.30                 | 8.40         |                        |              |                       |              | 164.24                  | 8.84         |                         |              | 173.82                 | 8.78         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.49         | 234.14                 | 8.40         |                        |              |                       |              | 164.21                  | 8.85         |                         |              | 172.77                 | 8.80         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.50         | 233.99                 | 8.40         |                        |              |                       |              | 164.18                  | 8.85         |                         |              | 171.74                 | 8.82         |
|                        |              |                        |              | 330.58                | 9.50         | 233.84                 | 8.41         |                        |              |                       |              | 164.15                  | 8.86         |                         |              | 170.73                 | 8.84         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.51         | 233.69                 | 8.41         |                        |              |                       |              | 164.12                  | 8.86         |                         |              | 169.65                 | 8.86         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.52         | 233.54                 | 8.42         |                        |              |                       |              | 164.09                  | 8.87         |                         |              | 168.44                 | 8.88         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.52         | 233.39                 | 8.42         |                        |              |                       |              | 164.05                  | 8.88         |                         |              | 167.07                 | 8.90         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.53         | 233.24                 | 8.43         |                        |              |                       |              | 164.01                  | 8.88         |                         |              | 165.57                 | 8.91         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.54         | 233.09                 | 8.43         |                        |              |                       |              | 163.96                  | 8.89         |                         |              | 163.95                 | 8.93         |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.54         | 232.94                 | 8.44         |                        |              |                       |              | 163.92                  | 8.89         |                         |              | 162.12                 | 8.96         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.55         | 232.78                 | 8.44         |                        |              |                       |              | 163.87                  | 8.90         |                         |              | 159.90                 | 8.98         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.55         | 232.60                 | 8.45         |                        |              |                       |              | 163.82                  | 8.91         |                         |              | 157.33                 | 9.01         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.56         | 232.44                 | 8.45         |                        |              |                       |              | 163.78                  | 8.91         |                         |              | 154.72                 | 9.04         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.56         | 232.28                 | 8.46         |                        |              |                       |              | 163.74                  | 8.92         |                         |              | 152.39                 | 9.07         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.57         | 232.14                 | 8.46         |                        |              |                       |              | 163.69                  | 8.92         |                         |              | 150.47                 | 9.09         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.58         | 232.00                 | 8.47         |                        |              |                       |              | 163.64                  | 8.93         |                         |              | 148.89                 | 9.11         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.58         | 231.87                 | 8.47         |                        |              |                       |              | 163.60                  | 8.94         |                         |              | 147.51                 | 9.14         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.59         | 231.74                 | 8.48         |                        |              |                       |              | 163.55                  | 8.94         |                         |              | 146.26                 | 9.16         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.60         | 231.63                 | 8.48         |                        |              |                       |              | 163.50                  | 8.95         |                         |              | 145.04                 | 9.18         |
|                        |              |                        |              | 330.55                | 9.60         | 231.54                 | 8.49         |                        |              |                       |              | 163.45                  | 8.95         |                         |              | 143.81                 | 9.20         |
|                        |              |                        |              | 330.54                | 9.61         | 231.46                 | 8.49         |                        |              |                       |              | 163.41                  | 8.96         |                         |              | 142.53                 | 9.22         |
|                        |              |                        |              | 330.54                | 9.61         | 231.39                 | 8.50         |                        |              |                       |              | 163.36                  | 8.97         |                         |              | 141.14                 | 9.25         |
|                        |              |                        |              | 330.54                | 9.62         | 231.33                 | 8.50         |                        |              |                       |              | 163.31                  | 8.97         |                         |              | 139.71                 | 9.29         |
|                        |              |                        |              | 330.53                | 9.63         | 231.28                 | 8.51         |                        |              |                       |              | 163.26                  | 8.98         |                         |              | 137.90                 | 9.32         |
|                        |              |                        |              | 330.53                | 9.63         | 231.24                 | 8.51         |                        |              |                       |              | 163.21                  | 8.98         |                         |              | 134.49                 | 9.36         |
|                        |              |                        |              | 330.52                | 9.64         | 231.20                 | 8.52         |                        |              |                       |              | 163.15                  | 8.99         |                         |              | 130.53                 | 9.41         |
|                        |              |                        |              | 330.50                | 9.65         | 231.17                 | 8.52         |                        |              |                       |              | 163.09                  | 9.00         |                         |              | 127.53                 | 9.45         |
|                        |              |                        |              | 330.48                | 9.65         | 231.14                 | 8.53         |                        |              |                       |              | 163.03                  | 9.00         |                         |              | 125.30                 | 9.48         |
|                        |              |                        |              | 330.47                | 9.66         | 231.12                 | 8.53         |                        |              |                       |              | 162.97                  | 9.01         |                         |              | 123.34                 | 9.51         |
|                        |              |                        |              | 330.47                | 9.66         | 231.10                 | 8.54         |                        |              |                       |              | 162.90                  | 9.01         |                         |              | 121.07                 | 9.55         |
|                        |              |                        |              | 330.46                | 9.67         | 231.08                 | 8.54         |                        |              |                       |              | 162.82                  | 9.02         |                         |              | 118.72                 | 9.59         |
|                        |              |                        |              | 330.47                | 9.67         | 231.06                 | 8.55         |                        |              |                       |              | 162.74                  | 9.03         |                         |              | 116.91                 | 9.62         |
|                        |              |                        |              | 330.47                | 9.68         | 231.04                 | 8.55         |                        |              |                       |              | 162.66                  | 9.03         |                         |              | 115.46                 | 9.65         |
|                        |              |                        |              | 330.49                | 9.69         | 231.01                 | 8.56         |                        |              |                       |              | 162.57                  | 9.04         |                         |              | 113.97                 | 9.69         |
|                        |              |                        |              | 330.49                | 9.69         | 230.99                 | 8.56         |                        |              |                       |              | 162.47                  | 9.04         |                         |              | 112.64                 | 9.72         |
|                        |              |                        |              | 330.50                | 9.70         | 230.97                 | 8.57         |                        |              |                       |              | 162.36                  | 9.06         |                         |              | 111.74                 | 9.75         |
|                        |              |                        |              | 330.50                | 9.71         | 230.95                 | 8.57         |                        |              |                       |              | 162.24                  | 9.09         |                         |              | 111.17                 | 9.77         |
|                        |              |                        |              | 330.52                | 9.71         | 230.94                 | 8.58         |                        |              |                       |              | 162.12                  | 9.11         |                         |              | 110.74                 | 9.80         |
|                        |              |                        |              | 330.53                | 9.72         | 230.92                 | 8.58         |                        |              |                       |              | 161.98                  | 9.12         |                         |              | 110.34                 | 9.82         |
|                        |              |                        |              | 330.54                | 9.72         | 230.90                 | 8.59         |                        |              |                       |              | 161.82                  | 9.12         |                         |              | 109.92                 | 9.84         |
|                        |              |                        |              | 330.55                | 9.73         | 230.88                 | 8.59         |                        |              |                       |              | 161.65                  | 9.13         |                         |              | 109.51                 | 9.87         |
|                        |              |                        |              | 330.56                | 9.74         | 230.86                 | 8.60         |                        |              |                       |              | 161.46                  | 9.13         |                         |              | 109.11                 | 9.89         |
|                        |              |                        |              | 330.57                | 9.75         | 230.83                 | 8.60         |                        |              |                       |              | 161.24                  | 9.14         |                         |              | 108.70                 | 9.91         |
|                        |              |                        |              | 330.59                | 9.76         | 230.81                 | 8.61         |                        |              |                       |              | 161.02                  | 9.15         |                         |              | 108.29                 | 9.94         |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 330.60                | 9.76         | 230.78                 | 8.61         |                        |              |                       |              | 160.79                  | 9.15         |                         |              | 107.88                 | 9.96         |
|                        |              |                        |              | 330.63                | 9.77         | 230.74                 | 8.62         |                        |              |                       |              | 160.56                  | 9.16         |                         |              | 107.50                 | 9.98         |
|                        |              |                        |              | 330.65                | 9.77         | 230.71                 | 8.62         |                        |              |                       |              | 160.34                  | 9.16         |                         |              | 107.14                 | 10.01        |
|                        |              |                        |              | 330.66                | 9.78         | 230.68                 | 8.63         |                        |              |                       |              | 160.12                  | 9.17         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.68                | 9.78         | 220.36                 | 9.05         |                        |              |                       |              | 159.91                  | 9.18         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.69                | 9.79         | 210.03                 | 9.20         |                        |              |                       |              | 159.72                  | 9.18         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.70                | 9.80         | 209.61                 | 9.21         |                        |              |                       |              | 159.54                  | 9.19         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.72                | 9.80         | 209.18                 | 9.21         |                        |              |                       |              | 159.36                  | 9.19         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.74                | 9.81         | 208.77                 | 9.22         |                        |              |                       |              | 159.20                  | 9.20         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.74                | 9.81         | 208.35                 | 9.22         |                        |              |                       |              | 159.06                  | 9.21         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.73                | 9.82         | 207.95                 | 9.23         |                        |              |                       |              | 158.91                  | 9.21         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 330.55                | 9.83         | 207.56                 | 9.24         |                        |              |                       |              | 158.77                  | 9.22         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 329.94                | 9.87         | 207.18                 | 9.24         |                        |              |                       |              | 158.63                  | 9.22         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 329.32                | 9.89         | 206.80                 | 9.25         |                        |              |                       |              | 158.51                  | 9.23         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.92                | 9.90         | 206.43                 | 9.26         |                        |              |                       |              | 158.39                  | 9.24         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.69                | 9.91         | 206.06                 | 9.27         |                        |              |                       |              | 158.27                  | 9.24         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.51                | 9.92         | 205.70                 | 9.27         |                        |              |                       |              | 158.16                  | 9.25         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.36                | 9.92         | 205.34                 | 9.28         |                        |              |                       |              | 158.04                  | 9.25         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.21                | 9.93         | 204.96                 | 9.29         |                        |              |                       |              | 157.94                  | 9.26         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 328.07                | 9.94         | 204.55                 | 9.29         |                        |              |                       |              | 157.84                  | 9.27         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.93                | 9.94         | 204.09                 | 9.30         |                        |              |                       |              | 157.74                  | 9.27         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.82                | 9.95         | 203.62                 | 9.31         |                        |              |                       |              | 157.65                  | 9.28         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.72                | 9.95         | 203.14                 | 9.31         |                        |              |                       |              | 157.57                  | 9.28         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.62                | 9.96         | 202.65                 | 9.32         |                        |              |                       |              | 157.49                  | 9.29         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.55                | 9.97         | 202.13                 | 9.33         |                        |              |                       |              | 157.41                  | 9.30         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.49                | 9.97         | 201.58                 | 9.33         |                        |              |                       |              | 157.35                  | 9.30         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.45                | 9.98         | 201.03                 | 9.34         |                        |              |                       |              | 157.30                  | 9.31         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.42                | 9.98         | 200.51                 | 9.35         |                        |              |                       |              | 157.24                  | 9.31         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.37                | 9.99         | 200.03                 | 9.35         |                        |              |                       |              | 157.20                  | 9.32         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.34                | 10.00        | 199.56                 | 9.36         |                        |              |                       |              | 157.15                  | 9.32         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.32                | 10.00        | 199.11                 | 9.37         |                        |              |                       |              | 157.11                  | 9.33         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.30                | 10.01        | 198.66                 | 9.38         |                        |              |                       |              | 157.08                  | 9.33         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.28                | 10.02        | 198.22                 | 9.38         |                        |              |                       |              | 157.04                  | 9.34         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.27                | 10.02        | 197.74                 | 9.39         |                        |              |                       |              | 157.01                  | 9.35         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.26                | 10.03        | 197.23                 | 9.40         |                        |              |                       |              | 156.99                  | 9.35         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.23                | 10.04        | 196.69                 | 9.41         |                        |              |                       |              | 156.96                  | 9.36         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.21                | 10.04        | 196.10                 | 9.42         |                        |              |                       |              | 156.93                  | 9.37         |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 327.19                | 10.05        | 195.50                 | 9.43         |                        |              |                       |              | 156.92                  | 9.37         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.18                | 10.05        | 194.91                 | 9.43         |                        |              |                       |              | 156.91                  | 9.38         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.17                | 10.06        | 194.33                 | 9.44         |                        |              |                       |              | 156.91                  | 9.38         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.17                | 10.07        | 193.74                 | 9.45         |                        |              |                       |              | 156.90                  | 9.38         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.17                | 10.07        | 193.13                 | 9.45         |                        |              |                       |              | 156.89                  | 9.39         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.17                | 10.08        | 192.47                 | 9.46         |                        |              |                       |              | 156.88                  | 9.40         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.16                | 10.08        | 191.74                 | 9.47         |                        |              |                       |              | 156.87                  | 9.40         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.15                | 10.09        | 190.93                 | 9.48         |                        |              |                       |              | 156.85                  | 9.41         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.15                | 10.10        | 190.06                 | 9.49         |                        |              |                       |              | 156.84                  | 9.42         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.15                | 10.10        | 189.10                 | 9.50         |                        |              |                       |              | 156.82                  | 9.42         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.13                | 10.11        | 188.00                 | 9.51         |                        |              |                       |              | 156.80                  | 9.43         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.11                | 10.12        | 186.81                 | 9.51         |                        |              |                       |              | 156.79                  | 9.43         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.08                | 10.12        | 185.71                 | 9.52         |                        |              |                       |              | 156.77                  | 9.44         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.05                | 10.13        | 184.79                 | 9.53         |                        |              |                       |              | 156.76                  | 9.44         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 327.02                | 10.13        | 184.06                 | 9.54         |                        |              |                       |              | 156.74                  | 9.45         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.99                | 10.14        | 183.42                 | 9.55         |                        |              |                       |              | 156.73                  | 9.45         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.97                | 10.15        | 182.83                 | 9.56         |                        |              |                       |              | 156.71                  | 9.46         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.94                | 10.16        | 182.28                 | 9.57         |                        |              |                       |              | 156.69                  | 9.46         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.92                | 10.16        | 181.76                 | 9.58         |                        |              |                       |              | 156.67                  | 9.47         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.91                | 10.17        | 181.24                 | 9.58         |                        |              |                       |              | 156.65                  | 9.48         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.89                | 10.17        | 180.72                 | 9.59         |                        |              |                       |              | 156.64                  | 9.48         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.88                | 10.18        | 180.24                 | 9.60         |                        |              |                       |              | 156.63                  | 9.49         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.85                | 10.19        | 179.78                 | 9.61         |                        |              |                       |              | 156.61                  | 9.49         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.82                | 10.19        | 179.36                 | 9.61         |                        |              |                       |              | 156.60                  | 9.50         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.79                | 10.20        | 178.94                 | 9.62         |                        |              |                       |              | 156.59                  | 9.51         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.76                | 10.21        | 178.53                 | 9.63         |                        |              |                       |              | 156.58                  | 9.51         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.73                | 10.21        | 178.11                 | 9.64         |                        |              |                       |              | 156.57                  | 9.51         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.70                | 10.22        | 177.69                 | 9.64         |                        |              |                       |              | 156.55                  | 9.52         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.66                | 10.23        | 177.26                 | 9.65         |                        |              |                       |              | 156.53                  | 9.53         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.62                | 10.23        | 176.81                 | 9.66         |                        |              |                       |              | 156.53                  | 9.53         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.57                | 10.24        | 176.32                 | 9.67         |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.54         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.53                | 10.25        | 175.76                 | 9.68         |                        |              |                       |              | 156.51                  | 9.54         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.48                | 10.25        | 175.14                 | 9.69         |                        |              |                       |              | 156.51                  | 9.55         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.42                | 10.26        | 174.50                 | 9.70         |                        |              |                       |              | 156.51                  | 9.56         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.36                | 10.26        | 173.86                 | 9.71         |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.56         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.29                | 10.27        | 173.18                 | 9.71         |                        |              |                       |              | 156.53                  | 9.56         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.22                | 10.28        | 172.42                 | 9.72         |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.57         |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 326.14                | 10.28        | 171.64                 | 9.72         |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.58         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 326.05                | 10.29        | 170.89                 | 9.72         |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.58         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.96                | 10.30        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.59         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.87                | 10.30        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.51                  | 9.59         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.78                | 10.31        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.50                  | 9.60         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.69                | 10.32        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.50                  | 9.60         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.59                | 10.32        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.49                  | 9.61         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.48                | 10.33        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.48                  | 9.61         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.37                | 10.34        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.47                  | 9.62         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.25                | 10.34        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 9.63         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.14                | 10.35        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.45                  | 9.63         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 325.03                | 10.35        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.44                  | 9.64         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.92                | 10.36        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.44                  | 9.64         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.79                | 10.37        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.43                  | 9.65         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.66                | 10.37        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.42                  | 9.65         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.52                | 10.38        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.41                  | 9.66         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.38                | 10.39        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.40                  | 9.66         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.24                | 10.40        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.40                  | 9.67         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 324.08                | 10.40        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.40                  | 9.67         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.92                | 10.41        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.40                  | 9.68         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.75                | 10.42        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.41                  | 9.68         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.56                | 10.43        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.41                  | 9.69         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.38                | 10.44        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.42                  | 9.70         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.19                | 10.45        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.42                  | 9.70         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 323.00                | 10.45        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.43                  | 9.70         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 322.81                | 10.45        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.44                  | 9.71         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 322.61                | 10.46        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.44                  | 9.72         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 322.42                | 10.46        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.45                  | 9.72         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 322.23                | 10.47        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.45                  | 9.73         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 322.03                | 10.48        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.45                  | 9.73         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 321.83                | 10.49        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.45                  | 9.74         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 321.63                | 10.49        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 9.74         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 321.42                | 10.50        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 9.75         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 321.20                | 10.51        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 9.75         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 320.97                | 10.51        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 9.76         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 320.72                | 10.52        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.47                  | 9.76         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 320.46                | 10.53        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.49                  | 9.77         |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              | 320.18                | 10.54        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.49                  | 9.78         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 319.90                | 10.54        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.50                  | 9.78         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 319.62                | 10.55        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.50                  | 9.79         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 319.33                | 10.56        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.51                  | 9.79         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 319.03                | 10.56        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.80         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 318.71                | 10.57        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.52                  | 9.80         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 318.36                | 10.58        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.53                  | 9.81         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 317.96                | 10.59        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.53                  | 9.81         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 317.49                | 10.59        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.54                  | 9.82         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 316.92                | 10.60        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.54                  | 9.82         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 316.27                | 10.61        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.54                  | 9.83         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 315.54                | 10.62        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.55                  | 9.83         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 314.71                | 10.63        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.55                  | 9.84         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 313.76                | 10.64        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.56                  | 9.84         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 312.72                | 10.65        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.56                  | 9.85         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 311.61                | 10.66        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.56                  | 9.85         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 310.45                | 10.66        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.57                  | 9.86         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 309.16                | 10.67        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.57                  | 9.87         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 307.61                | 10.69        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.57                  | 9.87         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 305.87                | 10.70        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.58                  | 9.88         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 304.07                | 10.71        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.59                  | 9.88         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 302.08                | 10.72        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.60                  | 9.89         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 299.07                | 10.74        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.61                  | 9.89         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 294.25                | 10.76        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.62                  | 9.90         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 287.82                | 10.78        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.63                  | 9.90         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 280.64                | 10.81        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.64                  | 9.91         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 273.35                | 10.84        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.65                  | 9.91         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 266.36                | 10.87        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.66                  | 9.92         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              | 259.85                | 10.90        |                        |              |                        |              |                       |              | 156.67                  | 9.92         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.68                  | 9.93         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.69                  | 9.93         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.70                  | 9.94         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.72                  | 9.94         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.73                  | 9.95         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.74                  | 9.96         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.74                  | 9.96         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.75                  | 9.97         |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.76                  | 9.97         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.77                  | 9.97         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.79                  | 9.98         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.80                  | 9.99         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.82                  | 9.99         |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.83                  | 10.00        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.85                  | 10.00        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.87                  | 10.01        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.88                  | 10.01        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.90                  | 10.02        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.91                  | 10.02        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.93                  | 10.03        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.95                  | 10.04        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.96                  | 10.04        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.97                  | 10.05        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.97                  | 10.05        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.97                  | 10.06        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.98                  | 10.06        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.99                  | 10.07        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.00                  | 10.07        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.00                  | 10.08        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.01                  | 10.08        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.01                  | 10.09        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.01                  | 10.09        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.02                  | 10.10        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.10        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.11        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.11        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.12        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.13        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.13        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.14        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.03                  | 10.14        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.02                  | 10.15        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.02                  | 10.16        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.01                  | 10.16        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.01                  | 10.17        |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 157.00                  | 10.18        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.99                  | 10.18        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.98                  | 10.19        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.98                  | 10.19        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.98                  | 10.20        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.97                  | 10.20        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.96                  | 10.21        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.94                  | 10.21        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.93                  | 10.22        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.92                  | 10.22        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.91                  | 10.23        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.89                  | 10.23        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.88                  | 10.24        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.86                  | 10.25        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.84                  | 10.25        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.82                  | 10.26        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.80                  | 10.26        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.78                  | 10.27        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.75                  | 10.27        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.73                  | 10.28        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.70                  | 10.28        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.67                  | 10.29        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.64                  | 10.30        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.60                  | 10.30        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.57                  | 10.31        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.53                  | 10.32        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.50                  | 10.32        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.46                  | 10.33        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.42                  | 10.34        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.38                  | 10.34        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.33                  | 10.35        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.29                  | 10.35        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.25                  | 10.36        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.20                  | 10.36        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.15                  | 10.37        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.10                  | 10.38        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 156.05                  | 10.38        |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.99                  | 10.39        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.93                  | 10.39        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.86                  | 10.40        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.79                  | 10.41        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.72                  | 10.41        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.64                  | 10.42        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.57                  | 10.43        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.49                  | 10.43        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.42                  | 10.44        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.35                  | 10.44        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.27                  | 10.45        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.20                  | 10.45        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.13                  | 10.46        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 155.06                  | 10.47        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.98                  | 10.47        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.90                  | 10.48        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.83                  | 10.48        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.75                  | 10.49        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.67                  | 10.50        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.57                  | 10.50        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.41                  | 10.51        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.23                  | 10.52        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 154.06                  | 10.52        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.90                  | 10.53        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.76                  | 10.53        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.62                  | 10.54        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.50                  | 10.55        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.38                  | 10.55        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.27                  | 10.56        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.16                  | 10.56        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 153.04                  | 10.57        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 152.92                  | 10.57        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 152.79                  | 10.58        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 152.63                  | 10.59        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 152.31                  | 10.59        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 151.82                  | 10.60        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 151.32                  | 10.60        |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 150.89                  | 10.61        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 150.52                  | 10.61        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 150.19                  | 10.62        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 149.90                  | 10.63        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 149.62                  | 10.64        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 149.37                  | 10.64        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 149.13                  | 10.65        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 148.91                  | 10.66        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 148.71                  | 10.67        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 148.51                  | 10.67        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 148.31                  | 10.68        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 148.12                  | 10.68        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.94                  | 10.69        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.76                  | 10.70        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.58                  | 10.70        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.40                  | 10.71        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.23                  | 10.72        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 147.06                  | 10.72        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.90                  | 10.73        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.74                  | 10.73        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.59                  | 10.74        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.44                  | 10.75        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.29                  | 10.76        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 146.13                  | 10.77        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.98                  | 10.77        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.82                  | 10.78        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.65                  | 10.79        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.48                  | 10.80        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.31                  | 10.80        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 145.13                  | 10.81        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.95                  | 10.82        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.77                  | 10.83        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.59                  | 10.83        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.40                  | 10.84        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.22                  | 10.85        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 144.04                  | 10.85        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 143.86                  | 10.86        |                         |              |                        |              |

Tabela B.1 – Dados carga-deslocamento das vigas reforçadas ambiente e após incêndio

| RCBS <sub>60-200</sub> |              | RCBS <sub>60-150</sub> |              | RCBS <sub>60-75</sub> |              | RCBS <sub>90-200</sub> |              | RCBS <sub>90-150</sub> |              | RCBS <sub>90-75</sub> |              | RCBS <sub>120-200</sub> |              | RCBS <sub>120-150</sub> |              | RCBS <sub>120-75</sub> |              |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)         | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)           | LVDT<br>(mm) | Carga<br>(kN)          | LVDT<br>(mm) |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 143.68                  | 10.87        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 143.50                  | 10.87        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 143.29                  | 10.88        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 143.05                  | 10.89        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 142.79                  | 10.89        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 142.49                  | 10.90        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 142.15                  | 10.91        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 141.78                  | 10.91        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 141.38                  | 10.92        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 140.92                  | 10.93        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 140.39                  | 10.93        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 139.75                  | 10.93        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 139.00                  | 10.94        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 135.73                  | 10.94        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 123.20                  | 10.96        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 109.40                  | 11.00        |                         |              |                        |              |
|                        |              |                        |              |                       |              |                        |              |                        |              |                       |              | 101.60                  | 11.03        |                         |              |                        |              |