Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

PAULO RODRIGO LOPES DE SOUZA

REFORÇO PARCIAL DE ABERTURA TRANSVERSAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS À MASSA DO CONCRETO

Caruaru
2015

PAULO RODRIGO LOPES DE SOUZA

REFORÇO PARCIAL DE ABERTURA TRANSVERSAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS À MASSA DO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.
Área de concentração: Estruturas e Materiais
Linha de pesquisa: Análise Estrutural

Orientador: Prof. Dr. Humberto Correia de Lima Júnior

Caruaru

2015

Catalogação na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

S729r Souza, Paulo Rodrigo Lopes de.
Reforço parcial de abertura transversal em vigas de concreto armado por meio de adição de fibras metálicas à massa do concreto. / Paulo Rodrigo Lopes de Souza. - Caruaru: O Autor, 2015.
82f. il. ; 30 cm.

Orientador: Humberto Correia de Lima Júnior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental, 2015.
Inclui referências bibliográficas

1. Projetos. 2. Vigas. 3. Fibras de aço. 4. Concreto armado. I. Lima Júnior, Humberto Correia de. (Orientador). II. Título

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2015-151)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

REFORÇO PARCIAL DE ABERTURA TRANSVERSAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS À MASSA DO CONCRETO

defendida por

PAULO RODRIGO LOPES DE SOUZA

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 09 de outubro de 2015

_____

Prof. Humberto Correia de Lima Júnior, Dr. (UFPE)
(Orientador)

_____

Prof. Gustavo Bono, Dr. (UFPE)
(examinador interno)

_____

Prof. Flávio Eduardo Gomes Diniz, Dr. (UFPE)
(examinador externo)

DEDICATÓRIA

A Deus por ter me dado forças novamente para que eu cumprisse mais essa etapa na minha vida, a minha amada mãe que passou por tantos momentos difíceis na sua vida e hoje pode dividir comigo mais esta alegria e ao meu pai que nunca deixou que eu saísse do bom caminho e sempre me ajudou nessa longa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Pernambuco, Campus do Agreste, por possibilitar o ingresso no seu programa de pós graduação e permitir junto a Capes que eu conseguisse uma bolsa de estudos o que facilitou que eu conseguisse desenvolver minha pesquisa.

A empresa Maccaferri do Brasil Ltda. Pela doação das fibras de aço contribuindo para a pesquisa científica, o que faz essa empresa cada vez mais forte.

Ao meu orientador Professor Dr. Humberto Correia de Lima Júnior além do grande conhecimento que conseguiu me passar durante essa caminhada me presentou com uma excelente orientação e com o convívio com a pessoa de excelente caráter que ele é dentro e fora da sala de aula.

A minha professora da graduação Msc. Gleicilene Bione pela importância que teve nessa minha trajetória dentro e fora da sala de aula não só com conhecimento transmitido para mim, mas também com conselhos que ajudaram a formar a pessoa que sou hoje.

Aos professores, que eu tive a oportunidade e o prazer de pagar suas disciplinas e adquirir um grande volume de conhecimento, Professor Dr. Gustavo Bono, Professor Dr. Antônio Acácio, Professora Dr. Giuliana Bono, Professora Dr. Sylvana.

A minha irmã Gabriella pelo incentivo e apoio durante essa pesquisa.

A toda a minha família que sempre comemoram cada uma das minhas conquistas.

Aos meus amigos que sempre me incentivam e torcem por mim.

Aos meus alunos e ex-alunos aos quais tenho um carinho especial e que me fazem procurar sempre estar melhorando como profissional para transmitir da melhor forma os conhecimentos por mim adquiridos em todos esses anos de trabalho e estudo.

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar num sonho que se tem.”

(Renato Russo)

RESUMO

A falta de compatibilização de projetos na construção civil pode gerar interferências entre os diversos projetos de uma edificação e o projeto estrutural, uma destas interferências é a passagem de tubulações na alma de vigas. Na maioria das vezes só é constatado que uma tubulação irá passar no meio de uma viga após a mesma já ter sido concretada e nessa situação muitos construtores realizam uma abertura ou furo na viga para realizar a passagem da tubulação na maior parte das vezes sem a devida consulta a um engenheiro calculista e sem respeitar as prescrições da norma ABNT NBR 6118:2014 no que diz respeito às dimensões e posicionamento na alma da viga ocasionando perda da resistência dessas vigas. Com base no exposto, foi analisada neste trabalho a possibilidade de se adicionar fibras de aço à massa do concreto para atuar como reforço parcial junto ao local do furo. Para avaliar a capacidade das fibras que atua como reforços parciais foram conduzidos ensaios experimentais que consistiram na moldagem de vigas de concreto armado com iguais dimensões onde todas elas foram instrumentadas com extensômetros elétricos e medidores de deslocamento tipo LVDT. As vigas possuíam adição de fibras de aço em diferentes teores e uma abertura transversal de igual geometria e posição na alma. Para realização de um estudo comparativo foram analisadas duas vigas, uma de referência sem adição de fibras à massa do concreto e sem abertura transversal na alma e uma sem adição de fibras de aço à massa do concreto, com abertura transversal na alma, porém, com um reforço em armadura de aço junto ao local da abertura que foi calculado pelo método das Bielas e dos Tirantes. Todas as vigas foram analisadas quando a capacidade de carga, deformações do concreto e do aço além de flecha no meio do vão. Os resultados mostraram que as vigas com adição de fibras de aço à massa do concreto, em alguns locais da viga, alcançaram até a carga de ruptura uma discreta melhora na rigidez, que mostra que as fibras de aço foram eficientes no controle da fissuração, porém as fibras de aço sozinhas não conseguiram manter a mesma capacidade de carga da viga de referência. Sugere-se então a utilização da técnica da adição de fibras de aço à massa do concreto em conjunto com um reforço em armadura de aço junto ao local da abertura calculado pelo método das bielas e dos tirantes.

Palavras – chave: Compatibilização de projetos. Fibras de aço. Abertura em vigas. Controle da fissuração. Capacidade de carga.

ABSTRACT

The lack of compatibility of projects in a civil construction can cause interference among the various projects of a building and the structural project, one of these are interferences in the passage of pipes in the beam's web. In most cases it is only ascertained that a pipe will go through a beam after it has already been concreted, and in this situation many builders perform an opening or hole in the beam to get the pipes through at most times without proper refers to a calculating engineer and without complying with the requirements of the Brazilian standard NBR 6118: 2014 with regard to the dimensions and positioning the beam's web causing loss of strength on them. Based on this fact presented above, it was analyzed in this study the possibility of adding steel fibers to the concrete mass to act as partial reinforcement at the place of the hole. To evaluate the ability of the fibers act as partial reinforcement, experimental trials were conducted, which consisted of molding reinforced concrete beams with equal dimensions where all of them were instrumented with electric strain gages and LVDT displacement meters. The beams had addition of steel fibers at different levels and a transverse opening of the same geometry and position in the web. To conduct a comparative study two beams were analyzed, one of them being a reference without addition of fiber to the concrete mass and without transverse opening in the web. The other without the addition of steel fibers to the concrete mass, with cross opening in the web, however, with an increase in steel armor at the place of opening which was calculated by the struts an tie method. All beams were analyzed for the load capacity of concrete and steel strains plus arrow in the middle of the span. The results showed that the beams with added steel fibers to the concrete mass, in some places the beam, reached to a discrete breaking load improvement in rigidity, which shows that steel fibers were effective in controlling cracking, but the steel fibers alone do not show the same load capacity of the reference beam. It is then suggested to use the technique of adding steel fibers to the concrete mass together with a reinforcement of steel armor at the place of the opening calculated by the struts and tie method.

Keywords: Compatibility of projects. Steel Fibers. Open in beams. Cracking control. Load capacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo da treliça clássica de Ritter e Morsch 19
Figura 2 – Viga com abertura no trecho de força cortante reduzida 20
Figura 3 – (a) Pequenas aberturas que não prejudicam a resistência da peça (b) Pequenas aberturas que prejudicam a resistência da peça 21
Figura 4 - Abertura vertical em viga 23
Figura 5 - Falha típica de uma viga com abertura em sua alma sujeita a esforços de cisalhamento 24
Figura 6 – Análise da região do furo 25
Figura 7 – Esforços nas seções $S_1 - S_1$ e $S_2 - S_2$ 25
Figura 8 – Detalhamento da armadura de reforço no furo 26
Figura 9 – Detalhamento da armadura de reforço das vigas do grupo 3 27
Figura 10 – Representação de viga parede pelo modelo das Bielas e dos Tirantes 28
Figura 11 - Modelo de viga utilizada para o ensaio de Sttutgart 29
Figura 12 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V1 29
Figura 13 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V2 30
Figura 14 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V3 30
Figura 15 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V4 30
Figura 16 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V5 31
Figura 17 – Esforços obtidos na viga VG1 32
Figura 18 – Esforços obtidos na viga VG2 32
Figura 19 – Esforços obtidos na viga VG3 33
Figura 20 – Esforços obtidos na viga VG4 33
Figura 21 – Detalhe do esquema de carregamento das vigas ensaiadas 34
Figura 22 – (a) Detalhe do posicionamento dos extensômetros na viga VGP. (b) Detalhe do posicionamento dos extensômetros nas vigas com abertura 34
Figura 23 – Detalhamento das armaduras da viga VG1 35
Figura 24 – Detalhamento das armaduras da viga VG2 35
Figura 25 – Detalhamento das armaduras da viga VG3 36
Figura 26 – Detalhamento das armaduras da viga VG4 36
Figura 27 – Fibras de aço soltas curtas (a), longas (b) e longas coladas (c) 40
Figura 28 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto 43

Figura 29 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b) 47
Figura 30 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), igual (B) e acima (C) do volume crítico de fibras 50
Figura 31 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico 52
Figura 32 – Fibras de aço atuando como "ponte" de transferência de tensões no momento da fissura (a) Fibra frágil; (b) Fibra dúctil 56
Figura 33 – Características geométricas das vigas com abertura 59
Figura 34 - Imagem da viga 3 após a concretagem 59
Figura 35 – (a) Disposição dos extensômetros nas barras longitudinais das vigas com abertura e adição de fibras; (b) Disposição dos extensômetros nas barras longitudinais da viga de referência 60
Figura 36 – Detalhe dos extensômetros nas ferragens 60
Figura 37 – Detalhe do esquema de carregamento das vigas ensaiadas 61
Figura 38 – Viga pronta para o rompimento 61
Figura 39 – Detalhamento da Armação das vigas 62
Figura 40 – Ferragem de uma das vigas 62
Figura 41 – Fibra de aço utilizada na confecção das viga 64
Figura 42 – Mistura da fibra com as fibras para concretagem de uma viga 65
Figura 43 – Teste de Slump da viga 2 66
Figura 44 – Forma e ferragem antes da concretagem 66
Figura 45 – Viga no momento da concretagem 67
Figura 46 – Local e modo de ruptura típico das vigas com abertura na alma e adição de fibras que foram ensaiadas 69
Figura 47 – Gráfico da Carga x Deformação do concreto no meio do vão 70
Figura 48 – Forma de ruptura da viga de referência 70
Figura 49 – Posicionamento dos extensômetro da viga VG2 71
Figura 50 – Carga x Deformação do concreto no local da abertura 72
Figura 51 – Local e modo de ruptura da viga VG2 73
Figura 52 – Gráfico da Carga x Deformação do aço no meio do vão 73
Figura 53 – Carga x Deformação do aço no local da abertura 75
Figura 54 – Gráfico da Carga x Deflexão, medidas no meio do vão 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto 41
Tabela 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto (continuação) 42
Tabela 2 – Características do cimento 63
Tabela 3 – Características do agregado miúdo 63
Tabela 4 – Características do agregado graúdo 64
Tabela 5 – Características da fibra utilizada de acordo com a NBR 15530 (2007) 64
Tabela 6 – Propriedades do concreto empregado em cada uma das vigas 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço

LISTA DE SÍMBOLOS

fck	Resistência característica a compressão
λ	Fator de forma da fibra
l	Comprimento não alongado da fibra
d_e	Diâmetro equivalente da seção transversal da fibra
ε_{um}	Deformação última da matriz
σ_{um}	Tensão última da matriz
$V_{fcrít}$	Volume crítico de fibras dado em porcentagem em relação ao volume total do compósito
σ_{fu}	Tensão última das fibras
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da Matriz
V_c	Volume do compósito
V_f	Volume de fibras no compósito
V_m	Volume da matriz no compósito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 OBJETIVOS 17
1.1.1 Objetivo geral 17
1.1.2 Objetivo Secundário 17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 COMPATIBILIZAÇÃO DE PROJETOS 18
2.2 ABERTURAS E FUROS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO 18
2.2.1 Tensão de cisalhamento em vigas de concreto armado 19
2.2.2 Dimensões dos furos nas almas de vigas 20
2.3 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE REFORÇOS PARA VIGAS COM ABERTURAS EM SUA ALMA 24
2.3.1 Cálculo de armadura de reforço pelo método de Süssekind (1984) 24
2.3.2 Método das bielas e dos tirantes 27
2.3.2.1 Silva, Moreira e Vale (2014**)** 28
2.3.2.2 Simão (2014) 31
2.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA) 37
2.4.1 Caracterização das fibras de aço 38
2.4.2 Fissuração no concreto reforçado com fibras aço 45
2.4.3 Contribuição das fibras para resistência do concreto 53
2.4.4 Durabilidade do concreto reforçado com fibras de aço 56
3 ESTUDO EXPERIMENTAL 58
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS 58
3.2 ARMAÇÃO DAS VIGAS 62
3.3 CONCRETAGEM DAS VIGAS 63
3.3.1 Materiais utilizados 63
3.3.2 Características da dosagem 65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 68
4.1 COMPORTAMENTO GLOBAL 68
4.2 CARGAS E DEFORMAÇÕES 69
4.2.1 Deformação do concreto no meio do vão 69
4.2.2 Deformação do concreto no local da abertura 71

4.2.3 Deformação no aço no meio do vão..... 73
4.2.4 Deformação do aço no local da abertura..... 74
4.3 CARGAS E DEFLEXÕES..... 75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 77
5.1 FUTURAS PESQUISAS..... 78
REFERÊNCIAS 79

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a compatibilização de projetos não é uma prática comum na construção civil, isto além de rotular o setor como atrasado, quando comparado a outros setores da indústria, ainda reflete diversos problemas, sendo um deles, paradas e retrabalhos por interferências entre projetos. Essas interferências são resultados da falta de comunicação entre os projetistas que elaboram o projeto arquitetônico e os projetos complementares. Um dos problemas que sempre despertou preocupações aos engenheiros é a questão das aberturas nas almas em vigas de concreto armado. Essas aberturas são utilizadas normalmente para passagem de tubulações hidráulicas, cabos elétricos e dutos para sistemas de calefação e refrigeração, e que geralmente a posição dessas aberturas é realizada sem a devida consulta ao calculista estrutural para se efetuar o reforço necessário. Para Agustinho (2009) os motivos para o uso de procedimentos como a abertura de vigas para passagem de tubulações em geral e outros tantos decorrentes da falta de compatibilização de projetos, e que são feitos muitas vezes indiscriminadamente e sem critérios, geralmente são atribuídos ao aumento do custo de soluções compatíveis com cada caso, ou ainda, o tempo perdido para a implantação destas soluções. Quando as vigas possuem abertura em sua alma em situação de ausência de força cortante, a sua capacidade resistente à flexão não sofre prejuízo, desde que a abertura não intercepte o banzo comprimido nem o tracionado; contudo, a presença de aberturas em regiões de cisalhamento causa interrupção da continuidade da alma, que perturba localmente o fluxo de tensões de compressão e tração e modifica o mecanismo resistente ao cisalhamento, quando comparado com o das vigas de alma cheia. Essa interrupção no fluxo de tensões pode culminar com o aparecimento de fissuras na região próxima ao local do furo que além de promover a diminuição da capacidade resistente do elemento estrutural podem servir como ponto de entrada para agentes deletérios que podem em longo prazo promover problemas diversos como oxidação da armadura, por exemplo.

Para agravar o problema, tem-se observado que devido à necessidade de edifícios com mais pavimentos e estruturas cada vez mais esbeltas, as dimensões das aberturas têm aumentado muito em relação à altura das vigas e, ainda, que diante das altas taxas de armadura presentes nesses elementos estruturais a adição de reforço por meio de barras de aço torna-se uma tarefa difícil. Uma técnica que pode vir a solucionar o problema exposto é a utilização de armadura e a adição de fibras de aço à massa do concreto como reforço parcial.

A utilização de fibras de aço na massa do concreto como reforço parcial em vigas de concreto armado que receberam furos para passagem de tubulações hidráulicas, cabos elétricos ou dutos para sistemas de calefação e refrigeração, pode ser uma alternativa bastante interessante, uma vez que, essas fibras podem servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Com isto tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta certa capacidade portante pós-fissuração. Diversos trabalhos apontam também um considerável aumento na resistência à tração na flexão quando se adicionam fibras de aço à massa de concreto nas vigas.

A escolha do tipo certo de fibra e em teores bem definidos pode resultar em uma grande capacidade de reforço da matriz de concreto, por exemplo, fibras com alto módulo de elasticidade e de alta resistência tem uma grande capacidade de reforço para matriz de concreto quando esta romper, diferente das fibras de baixo módulo de elasticidade onde somente um elevado teor desta fibra apresentaria uma capacidade de reforço o que poderia inviabilizar a aplicação do material.

Assim o estudo do concreto reforçado com fibras de aço para confecção de elementos estruturais, pode vir a reduzir a preocupação dos profissionais envolvidos na execução de edificações que utilizam furos em vigas como uma alternativa para solução de determinados imprevistos, no que diz respeito à capacidade resistente do elemento e controle de fissuração.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a capacidade da fibra de aço quando adicionada à massa do concreto, servir como reforço parcial em vigas que sofreram uma abertura em sua alma para passagem de tubulações em geral.

1.1.2 Objetivo Secundário

Analisar as vigas quanto às deformações e flecha no meio do vão e comparar os resultados das vigas que possuem fibras adicionadas à massa de concreto e abertura transversal na alma, com os resultados de uma viga de referência que não tem fibras de aço adicionadas à massa do concreto e sem abertura transversal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 COMPATIBILIZAÇÃO DE PROJETOS

A compatibilização de projetos pode ser entendida como um processo integrado entre os diversos projetistas de um empreendimento para que todos os projetos se encaixem de tal maneira que não haja interferências de um projeto com relação ao outro garantindo assim a qualidade do empreendimento.

De acordo com o SEBRAE (1995 *apud* ÁVILA 2011), compatibilização define-se como uma atividade de gerenciar e integrar projetos correlatos, visando ao perfeito ajuste entre os mesmos e conduzindo para a obtenção dos padrões de controle de qualidade total de determinada obra.

Picchi (1993 *apud* SOUZA 2010), a compatibilização de projetos compreende a atividade de sobrepor os vários projetos e identificar as interferências, bem como programar reuniões, entre os diversos projetistas e a coordenação, com o objetivo de resolver interferências que tenham sido detectadas.

No Brasil o setor da construção civil na maioria das vezes não tem trabalhado com esse conceito de compatibilização e o que têm acontecido frequentemente são improvisações diante de certas situações de interferências entre os diversos projetos como, por exemplo, furos em vigas que ocorrem para passagem de tubulações hidráulicas, cabos elétricos ou dutos para sistemas de calefação e refrigeração.

Callegari (2007 *apud* ÁVILA 2011) afirma que durante a elaboração dos projetos, a compatibilização permite a retroalimentação das etapas, corrigindo e propondo novas soluções com o aumento da eficiência. Desta maneira, a elaboração de futuros projetos terá uma redução de incertezas construtivas.

O pior é que as situações de interferências entre os projetos têm sido na maioria das vezes solucionadas sem a devida consulta aos profissionais que elaboraram o projeto, em virtude disso, essas soluções muitas vezes não garantem que o elemento construtivo tenha a mesma eficiência que teria antes de ser modificado. É o que pode acontecer, por exemplo, quando se faz um furo em um elemento estrutural sem a devida consulta ao calculista.

2.2 ABERTURAS E FUROS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

As aberturas e furos na alma de vigas de concreto armado vêm sendo cada vez mais utilizados na construção civil para, passagem de canalizações ou para embutirem-se as mesmas. Esses furos causam uma perturbação local no fluxo de tensões quando comparamos com vigas de alma cheia. Isso ocorre porque na presença de esforço cortante esse furo pode interceptar a diagonal comprimida ou tracionada da viga o que pode comprometer a capacidade resistente do elemento estrutural.

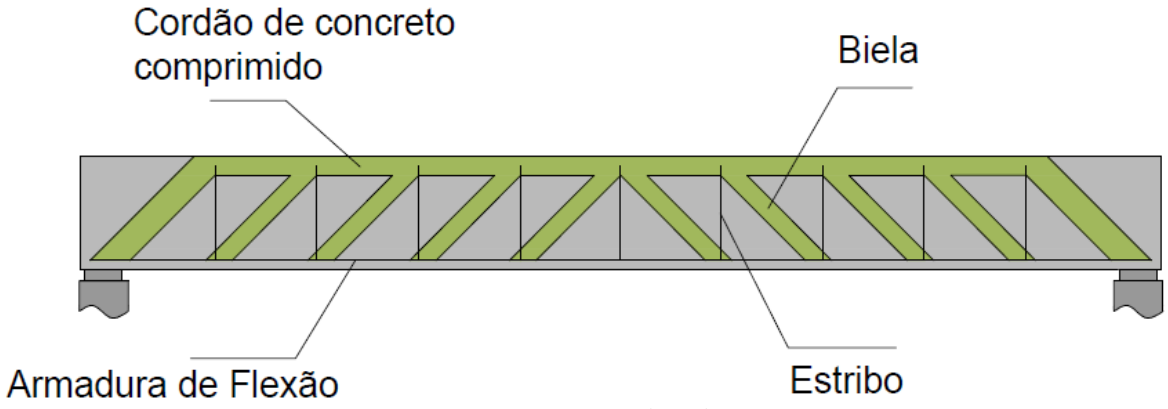
A norma ABNT NRB 6118:2014 no seu item 13.2.5 distingue furos de aberturas considerando que furos são aqueles que têm dimensões pequenas em relação à peça, considerando também que uma sequência de furos muito próximos seja considerada uma abertura na peça.

Essas aberturas ou furos na alma de vigas quando executados devem seguir as especificações normativas para avaliação da necessidade de aplicação de um reforço no local do furo para evitar danos como fissuras ou até mesmo ruína do elemento estrutural.

2.2.1 Tensão de cisalhamento em vigas de concreto armado

Em uma viga solicitada por esforço cortante, surgem tensões internas de cisalhamento que ocorrem para equilibrar a carga externa. O comportamento de uma viga sob influência das forças cortantes são descritas pela analogia a uma treliça isostática chamada de “Treliça clássica de Ritter e Morsch” onde seus elementos principais são as armaduras transversais (estribos), o concreto comprimido como bielas a 45º e por dois banzos paralelos chamados de banzo inferior representado pela armadura longitudinal de tração e banzo superior representado por um cordão longitudinal de concreto comprimido. Na Figura 1 é mostrado o modelo da treliça clássica de Ritter e Morsch

Figura 1 – Modelo da treliça clássica de Ritter e Morsch



Fonte: Autor (2015)

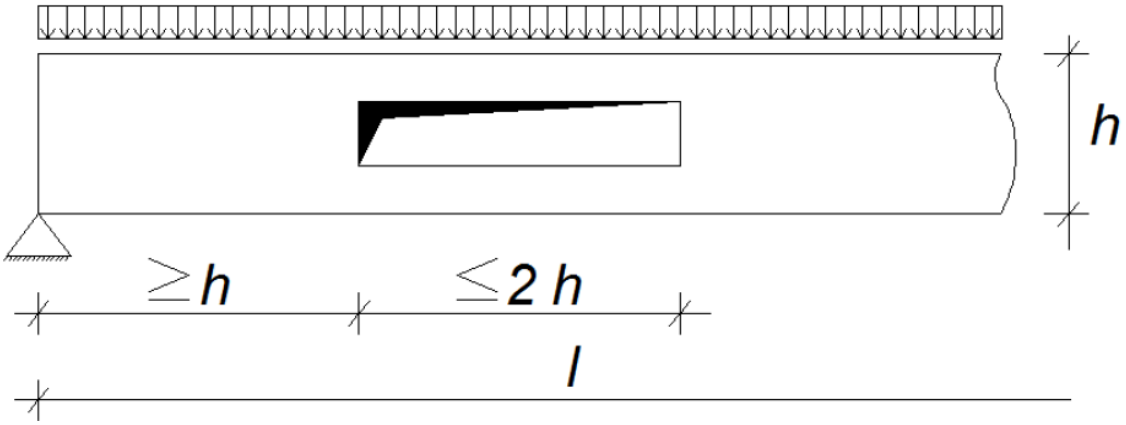
A posição mais eficiente de se colocar os estribos na armação de uma viga seria a 45° na direção da diagonal tracionada, ou seja, perpendicular à biela de compressão e interceptando a mesma, porém por questões de ordem práticas os estribos são colocados a 90° na direção perpendicular aos banzos.

2.2.2 Dimensões dos furos nas almas de vigas

Os furos nas almas de vigas têm suas dimensões limitadas por fatores como intensidade do esforço cortante na região do furo e dimensões da própria alma da viga.

Leonhardt e Monnig (1978) afirmam que nos trechos de menor esforço cortante podem ser realizados furos maiores, considerando um apoio de extremidade deve-se então guardar certa distância do apoio conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Viga com abertura no trecho de força cortante reduzida

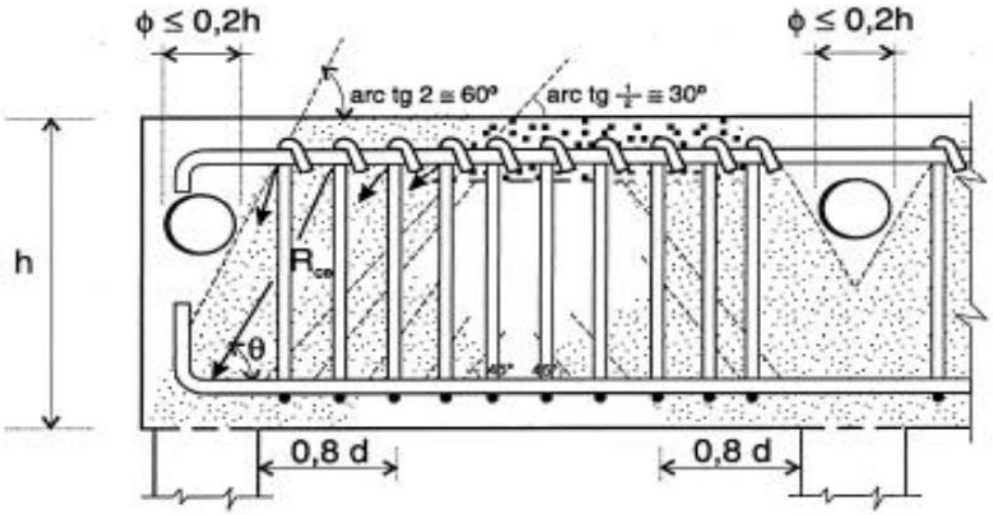


Fonte: Leonhardt e Monnig (1978)

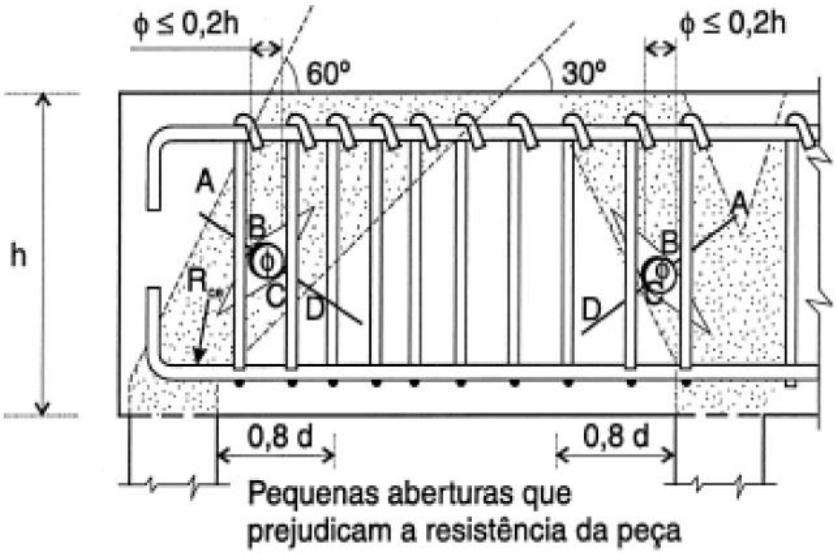
Segundo Mansur e Tan (1999) existe um limite para considerar aberturas quadradas ou circulares como pequenas em uma viga que seria quando as mesmas não ultrapassarem 40% da profundidade da estrutura.

Porém mesmo pequenas aberturas com diâmetros até a ordem de 0,2 h, podem prejudicar a resistência da viga conforme sua posição interfere ou não nas bielas de cisalhamento conforme é ilustrado na Figura 3 (FUSCO 1995).

Figura 3 – (a) Pequenas aberturas que não prejudicam a resistência da peça (b) Pequenas aberturas que prejudicam a resistência da peça



(a)



(b)

Fonte: Fusco (1995).

A NBR 6118:2014, em seu item 13.2.5.1, prescreve que para furos que atravessam a viga na direção de sua largura, a distância mínima de um furo à face mais próxima da viga deve ser no mínimo igual a 5 cm e duas vezes o cobrimento previsto para essa face. A seção remanescente nessa região, tendo sido descontada a área ocupada pelo furo, deve ser capaz de resistir aos esforços previstos no cálculo, além de permitir uma boa concretagem.

Para dispensar verificações quanto ao efeito na resistência e na deformação da viga, devem ser respeitadas, simultaneamente, as seguintes condições:

a) Abertura em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo 2 *h*, onde *h* é a altura da viga;

b) Dimensão da abertura de no máximo 12 cm e *h*/3;

c) Distância entre faces de aberturas, num mesmo tramo, de no mínimo 2 *h*;

d) Cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras.

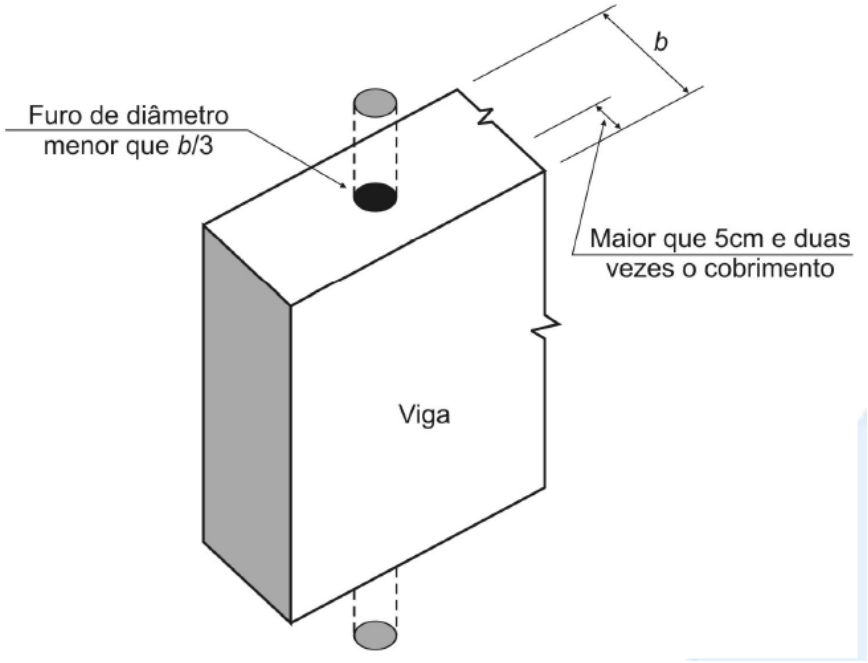
Para furos que atravessam as vigas na direção da altura a NBR 6118:2014 em seu item 21.3.3 diz o seguinte: As aberturas em vigas, contidas no seu plano principal, como furos para passagem de tubulação vertical nas edificações (ver Figura 4), não devem ter diâmetros superiores a 1/3 da largura dessas vigas nas regiões desses furos. Deve ser verificada a redução da capacidade portante ao cisalhamento e à flexão na região da abertura.

A distância mínima de um furo à face mais próxima da viga deve ser no mínimo igual a 5 cm e duas vezes o cobrimento previsto nessa face. A seção remanescente nessa região, tendo sido descontada a área ocupada pelo furo, deve ser capaz de resistir aos esforços previstos no cálculo, além de permitir uma boa concretagem.

No caso de ser necessário um conjunto de furos, os furos devem ser alinhados e a distância entre suas faces deve ser de no mínimo 5 cm ou o diâmetro do furo e cada intervalo deve conter pelo menos um estribo.

No caso de elementos estruturais submetidos à torção, esses limites devem ser ajustados de forma a permitir que o elemento estrutural desempenhe a função para a qual foi projetado de forma adequada.

Figura 4 - Abertura Vertical em Viga



Fonte: NBR 6118 (2014)

Para canalizações embutidas a norma NBR 6118:2014 no seu item 13.2.6 a norma proíbe nos seguintes casos:

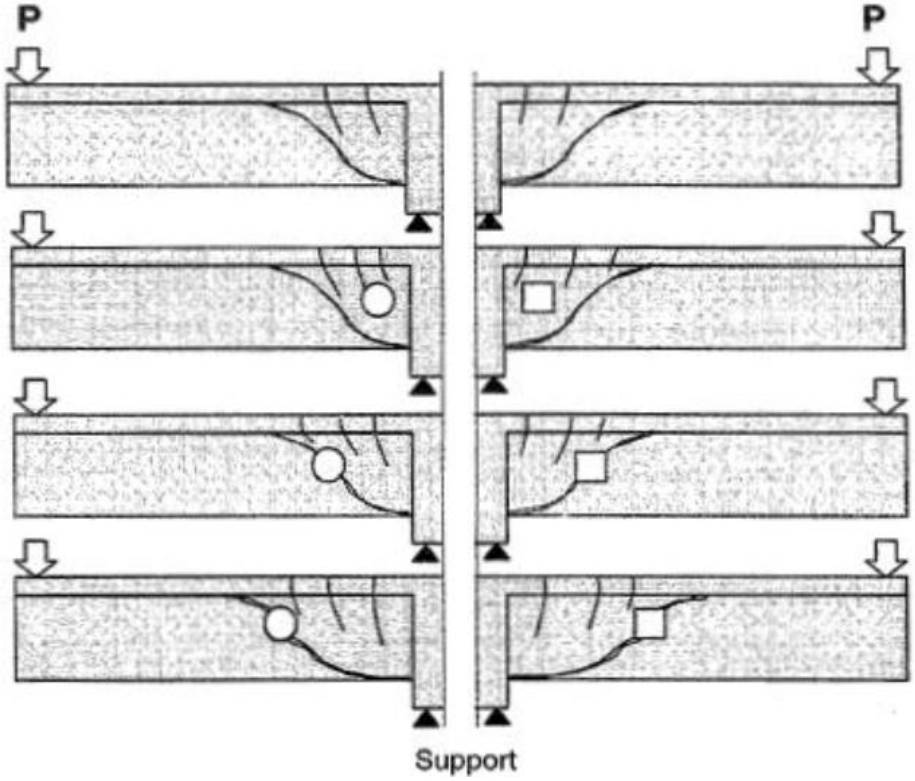
1 - Canalizações sem isolamento adequado ou verificação especial quando destinados a passagem de fluídos com temperatura que se afaste demais de 15° C da temperatura ambiente;

2 - canalizações destinadas a suportar pressões internas maiores de 0,3 Mpa;

3 - canalizações embutidas em pilares de concreto, que estão imersas no material ou em espaços vazios internos ao elemento estrutural, sem a existência de abertura para drenagem.

As fissuras por cisalhamento em vigas podem ocorrer principalmente sob duas condições: tração na diagonal tracionada ou esmagamento do concreto na direção da diagonal comprimida. Mansur e Tan (1999 *apud* Costa 2013) explicam que quando ocorrem furos ou aberturas nas vigas o plano de ruptura nessa região passará pelo centro da abertura exceto quando o furo ou abertura é muito próximo ao apoio (Figura 5).

Figura 5 - Falha típica de uma viga com abertura em sua alma sujeita a esforços de cisalhamento.



Fonte: Mansur (1999 *apud* Costa 2013)

2.3 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE REFORÇOS PARA VIGAS COM ABERTURAS EM SUA ALMA

2.3.1 Cálculo de armadura de reforço pelo método de Süssekind (1984)

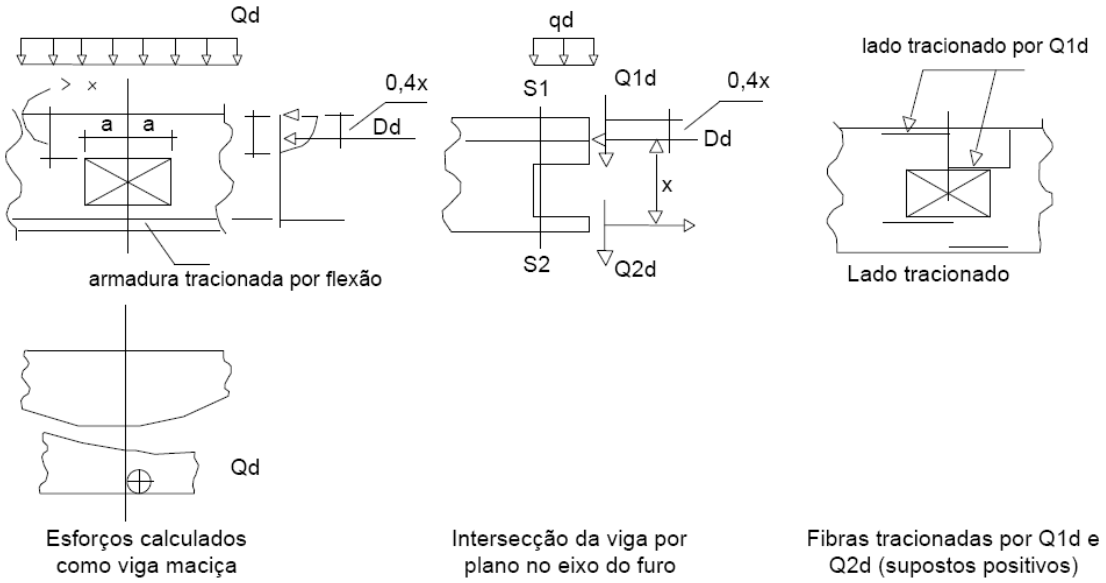
Campos e Vargas (2013) efetuaram o cálculo de armadura de reforço para uma viga de concreto armado com uma abertura em sua alma próxima do apoio, seguindo os passos propostos por Süssekind (1984). O cálculo consistiu em interceptar a viga num plano que atravessa o eixo da abertura como indicado na Figura 6, e obter o equilíbrio das resultantes dos esforços atuantes nessa seção, levando-se em consideração que:

a) O momento fletor será transmitido pelas resultantes D_d e Z_d no concreto e no aço, respectivamente (SÜSSEKIND, 1984 *apud* CAMPOS e VARGAS, 2013);

b) O esforço cortante total Q_d se dividirá em Q_{1d} e Q_{2d} proporcionais a rigidez a flexão de cada banzo. No banzo superior tem-se a rigidez de uma peça comprimida de concreto e no inferior tracionado (fissurado) somente da armadura existente. Como a

rigidez no banzo superior e muito maior considera-se $Q_{1d} = Q_d$ e $Q_{2d} = 0{,}1Q_d$ para limitar a fissuração no banzo inferior (SÜSSEKIND, 1984 *apud* CAMPOS e VARGAS, 2013)

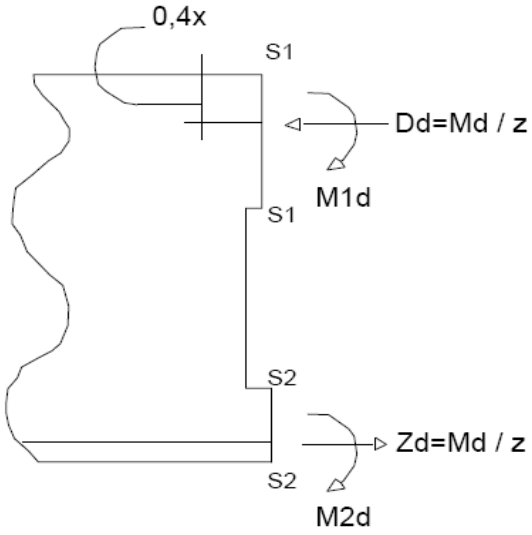
Figura 6 – Análise da região do furo



Fonte: Süssekind (1984) *apud* Campos e Vargas (2013)

c) Para o dimensionamento considera-se na seção S1-S1 na Figura 7, atuando um esforço $N_d = D_d$ (a 0,4x da borda mais comprimida) e um momento fletor M_{1d}=Q_d.a, e na seção S2-S2, M_{2d} =0,1.Q_d.a e $N_d = Z_d$, aplicada no nível da armadura de flexão tracionada, onde "a" é a altura da região comprimida (SÜSSEKIND, 1984).

Figura 7 – Esforços nas seções $S_1 - S_1$ e $S_2 - S_2$

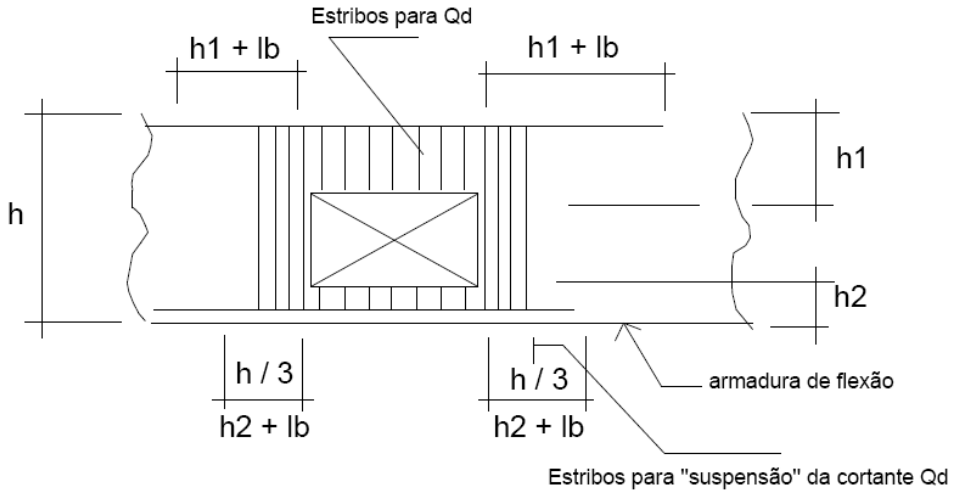


Fonte: Süssekind (1984) *apud* Campos e Vargas (2013)

d) Prever armaduras de suspensão junto à abertura, no lado mais afastado do apoio: dimensionar para cerca de $0{,}9.Q_d$ do lado mais próximo do apoio colocar apenas de 1 a 3 estribos (SÜSSEKIND, 1984);

e) No detalhamento da armadura na região do furo considera-se uma armadura simétrica (no intuito de evitar enganos), conforme é mostrado na Figura 8. (SÜSSEKIND, 1984).

Figura 8 – Detalhamento da armadura de reforço no furo



Fonte: Süssekind (1984) *apud* Campos e Vargas (2013)

Para realização da parte experimental do seu trabalho Campos e Vargas (2013) moldaram nove vigas que foram divididas em três grupos com três exemplares cada:

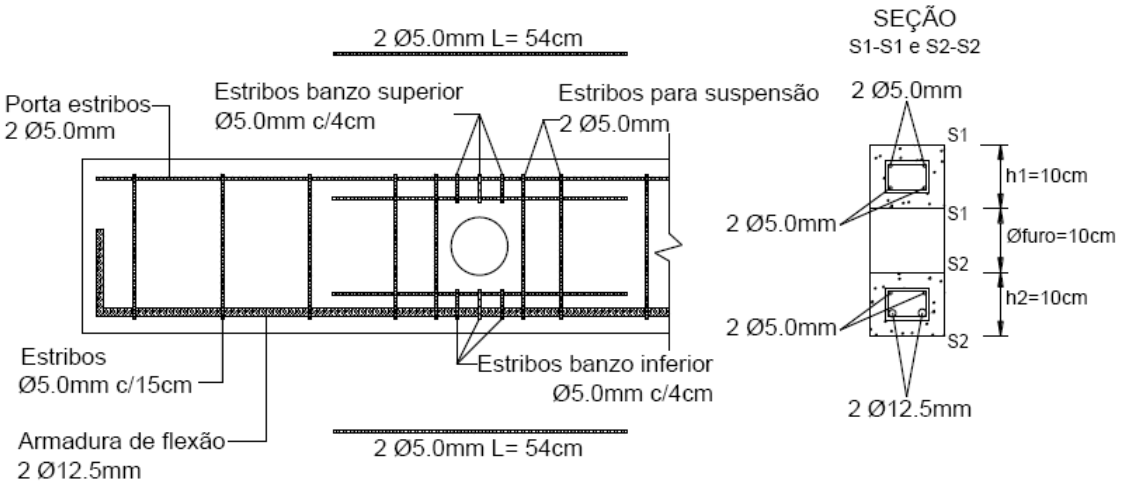
- Grupo1 – Viga de alma cheia, sem presença de furo, que servirá de parâmetro para comparação dos resultados;

- Grupo 2 – Viga com um furo circular de 10 cm de diâmetro, próximo ao apoio, atendendo os limites da antiga ABNT NBR 6118:2007, sem armadura de reforço;

- Grupo 3 – Viga com um furo circular de 10 cm de diâmetro, próximo ao apoio, atendendo os limites da antiga ABNT NBR 6118:2007, adotando uma armadura de reforço.

O furo nas vigas do grupo 2 e 3 foram feitos com 10 mm de diâmetro a uma distância de 2h do apoio sendo h a altura da seção transversal da viga. Na Figura 9 é mostrado o detalhamento da armadura de reforço das vigas do grupo 3.

Figura 9 – Detalhamento da armadura de reforço das vigas do grupo 3



3

Fonte: Campos e Vargas (2013)

As vigas foram instrumentadas com medidores de deslocamento do tipo LVDT posicionados no eixo da abertura e no meio da viga, e a carga foi aplicada através de um cilindro hidráulico posicionado a uma distância de 2,5h do apoio mais próximo ao furo.

Obtiveram como resultado que em todos os grupos de vigas os deslocamentos no meio da viga e no eixo do furo foram praticamente iguais, as vigas do grupo 3 obtiveram comportamento semelhante ao das vigas do grupo 1 quanto ao suporte de cargas antes da ruptura, porém o deslocamento foi 23,45% inferior na ruptura quando comparado ao deslocamento das vigas do grupo 1. Em geral as vigas do grupo 2 se comportaram de maneira diferente e romperam logo que o aço escoou.

2.3.2 Método das bielas e dos tirantes

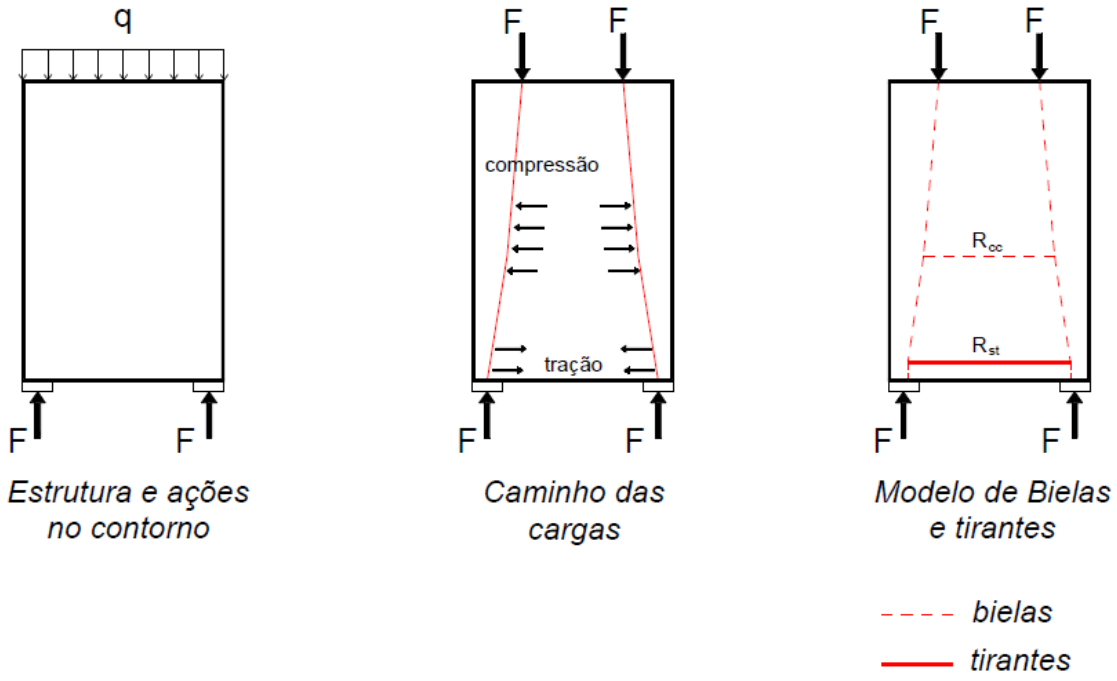
Santos e Giongo (2008) afirmam que o modelo de bielas e tirantes é um método racional cientificamente comprovado, recomendado pela norma brasileira e por diversas outras normas internacionais para o dimensionamento de regiões descontínuas de elementos de concreto armado, que atende às necessidades de tais análises.

No modelo de bielas e tirantes, os campos de tensões de compressão resistidas pelo concreto são chamados de bielas e os campos de tensões de tração resistidas pela armadura

são chamados de tirantes. Eventualmente o concreto pode resistir a tensões de tração desde que sejam respeitados os critérios de segurança para o material. Eventualmente também pode ocorrer do aço resistir a tensões de compressão como é o caso de vigas com armadura dupla.

Segundo Santos e Giongo (2008) utilizando métodos numéricos como o método dos elementos finitos, podem ser expressas as tensões elásticas e suas direções principais, a partir disso é criado um modelo constituído por barras comprimidas e tracionadas unidas por nós, onde a partir do equilíbrio das forças internas e externas atuantes são calculadas as forças nas bielas e nos tirantes. Um exemplo simplificado seria o da viga-parede mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Representação de viga parede pelo modelo das Bielas e dos Tirantes



Fonte: Santos e Giongo (2008), adaptado pelo autor.

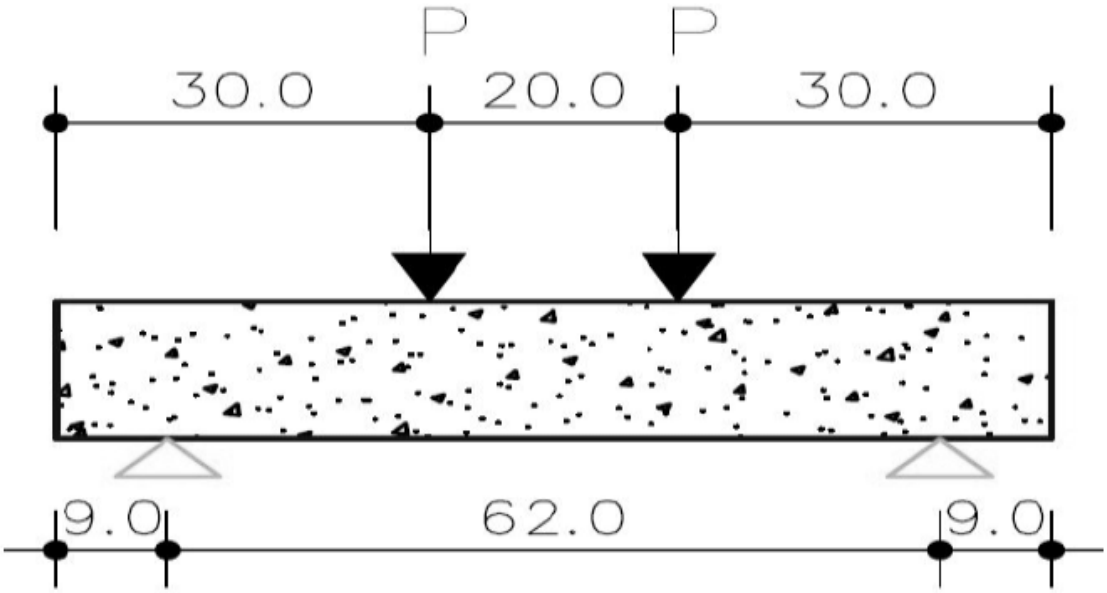
2.3.2.1 Análise de vigas de concreto armado com furo pelo método das bielas e dos tirantes por Silva, Moreira e Vale (2014)

Silva, Moreira e Vale (2014) publicaram um trabalho sobre análise do modelo de bielas e tirantes para análise de vigas de concreto armado com furo. O trabalho baseou-se em cinco vigas sendo uma delas sem furo que seria a viga de referência para comparação dos resultados, e quatro vigas com aberturas circulares em diferentes posições, e depois estas vigas foram modeladas no programa SAP 2000 onde foi desenvolvida uma rotina numérica através do equilíbrio dos nós pelo método das bielas e dos tirantes que permitiu estimar a

carga última de uma viga com furo obtendo-se resultados considerados no trabalho publicado como satisfatórios.

No trabalho de Silva, Moreira e Vale (2014) as vigas foram ensaiadas pelo método de ensaio de Sttutgart que consiste no carregamento gradativo de uma viga retangular biapoiada, com duas cargas concentradas simétricas. Na Figura 11 é mostrado o modelo de viga e carregamento que foi utilizado como referência para os ensaios.

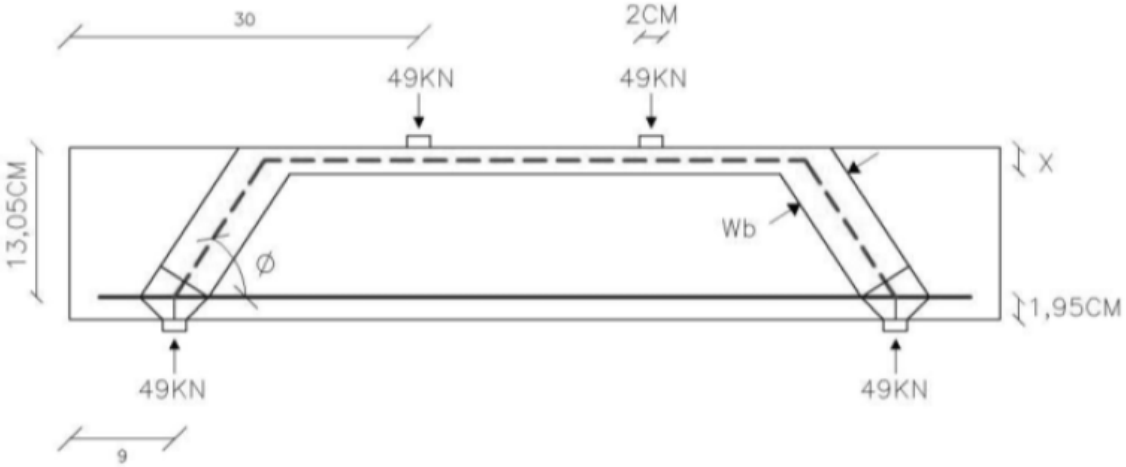
Figura 11 - Modelo de viga utilizada para o ensaio de Sttutgart



Fonte: Morais (2013) *apud* Silva, Moreira e Vale (2014)

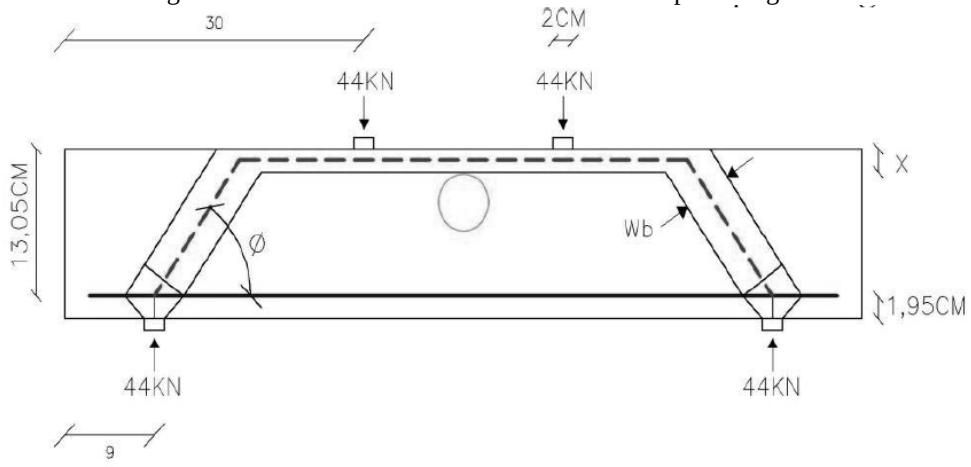
Nas Figuras 12 a 16 são mostrados os modelos de bielas e tirantes utilizados para as cinco vigas ensaiadas e a posição das aberturas.

Figura 12 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V1



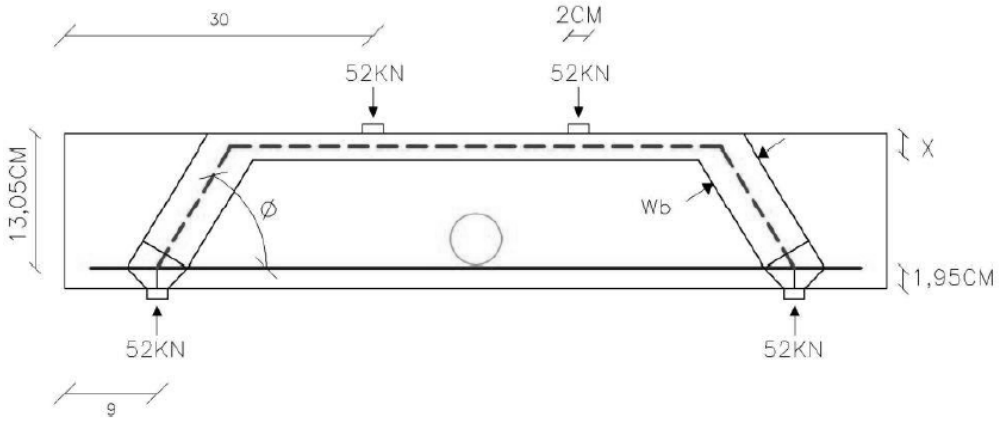
Fonte: Silva Moreira e Vale (2014)

Figura 13 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V2



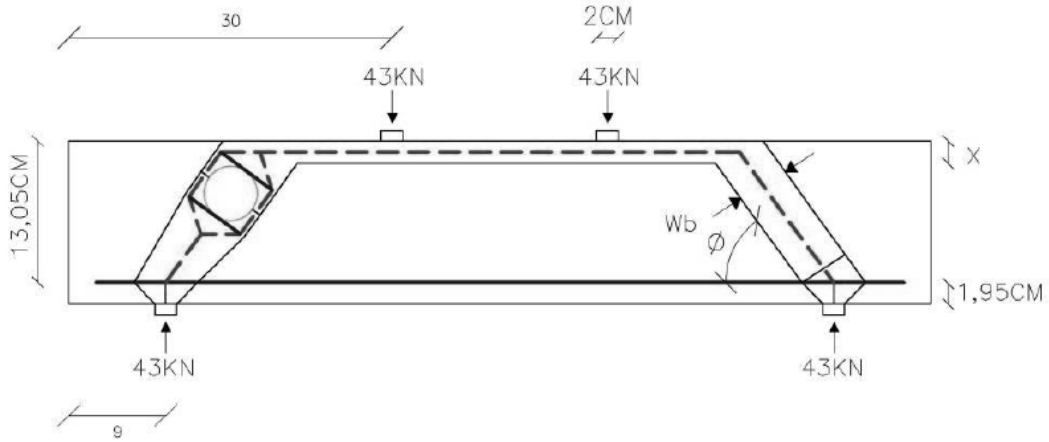
Fonte: Silva Moreira e Vale (2014)

Figura 14 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V3



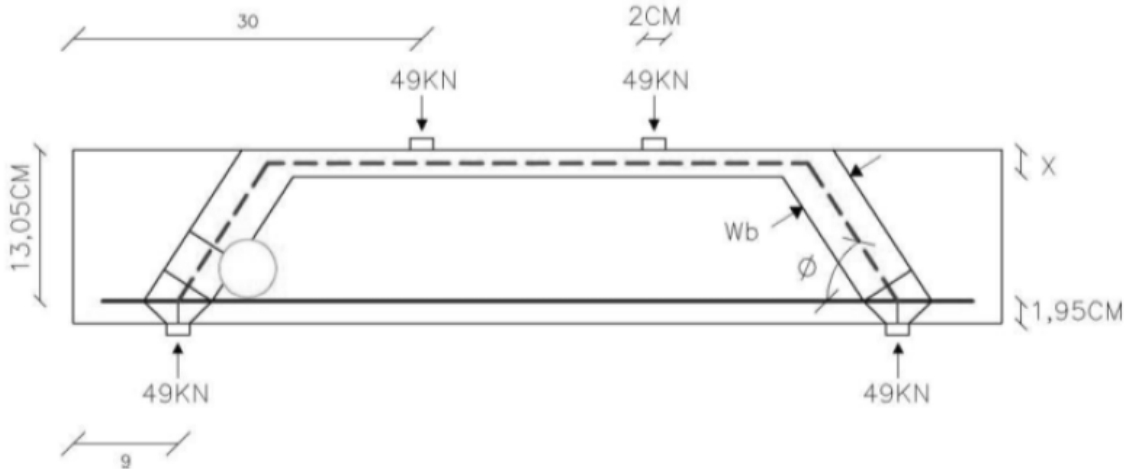
Fonte: Silva Moreira e Vale (2014)

Figura 15 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V4



Fonte: Silva Moreira e Vale (2014)

Figura 16 – Modelo de Bielas e tirantes adotados para a viga V5



Fonte: Silva Moreira e Vale (2014)

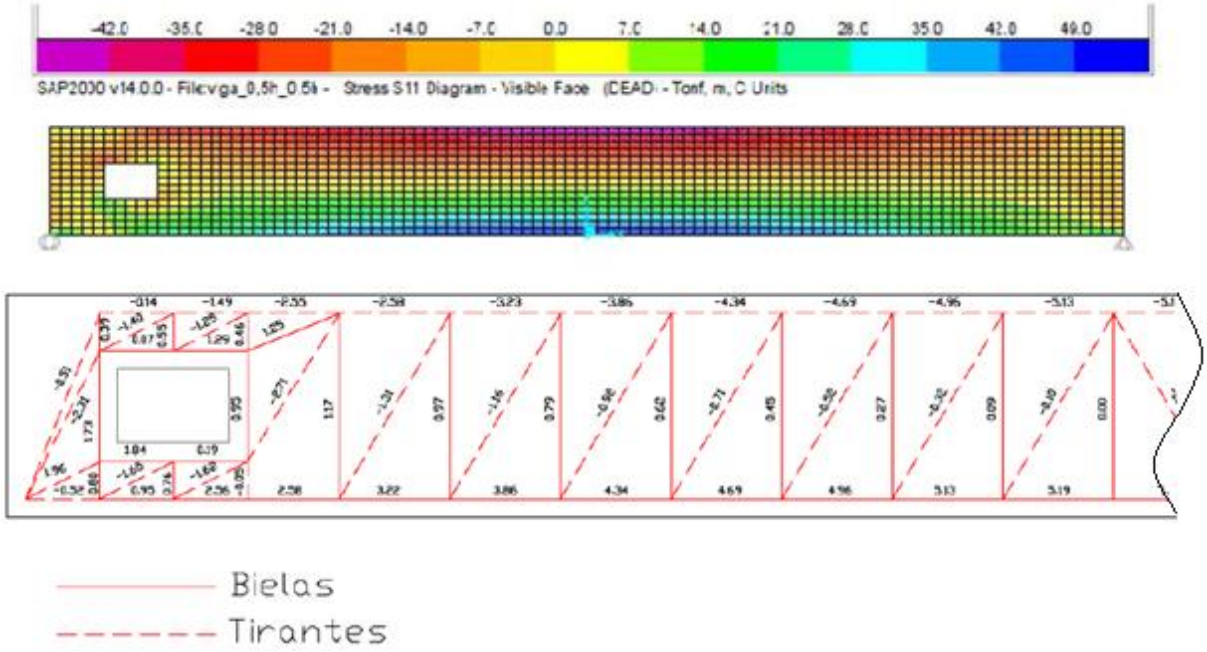
2.3.2.2 Análise de vigas de concreto armado com furo pelo método das bielas e dos tirantes por Simão (2014)

Simão (2014) em seu trabalho utilizou o método das bielas e dos tirantes para o dimensionamento de vigas com abertura na alma. Inicialmente com o intuito de conhecer o comportamento estrutural de uma viga com abertura na alma, foi realizada uma análise numérica por elementos finitos em 16 (dezesseis) vigas através do programa SAP 2000 que é um programa com interface gráfica 3D que utiliza o método dos elementos finitos para modelação, análise e dimensionamento do mais vasto conjunto de problemas de engenharia estrutural.

Para o estudo experimental foram confeccionadas e ensaiadas 5 (cinco) vigas onde 4 (quatro) delas possuíam furos na alma em posições diferentes, que foram chamadas de VG1, VG2, VG3, e VG4. As vigas foram divididas em dois grupos, denominados G1 e G2, no grupo G1 formado pela viga VG1 que possua uma abertura com uma distância do apoio de 0,5h e comprimento da abertura de 0,5h, e pela viga VG2 com uma abertura também com distância de 0,5h do apoio, porém, comprimento da abertura de 2h. O grupo G2 foi formado pela viga VG3 que possua uma abertura com uma distância do apoio de 2h e comprimento da abertura de 0,5h, e pela viga VG4 que também possua uma abertura com uma distância do apoio de 0,5h, porém comprimento da abertura de 2h. A quinta viga foi confeccionada sem abertura em sua alma para servir como referência para o estudo comparativo e foi chamada de viga padrão VGP.

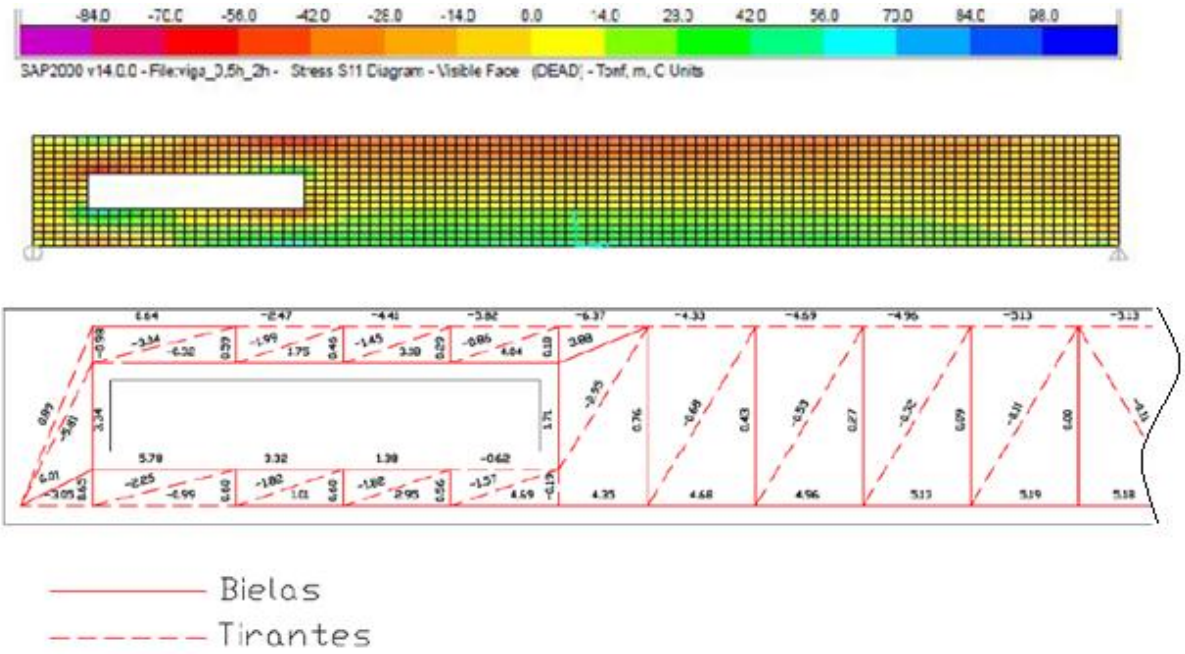
Nas Figuras 17 a 20 são mostradas as configurações das bielas e dos tirantes e seus respectivos esforços em cada uma das quatro vigas que possuíam abertura na alma onde foi dimensionada uma armadura de reforço para as mesmas.

Figura 17 – Esforços obtidos na viga VG1



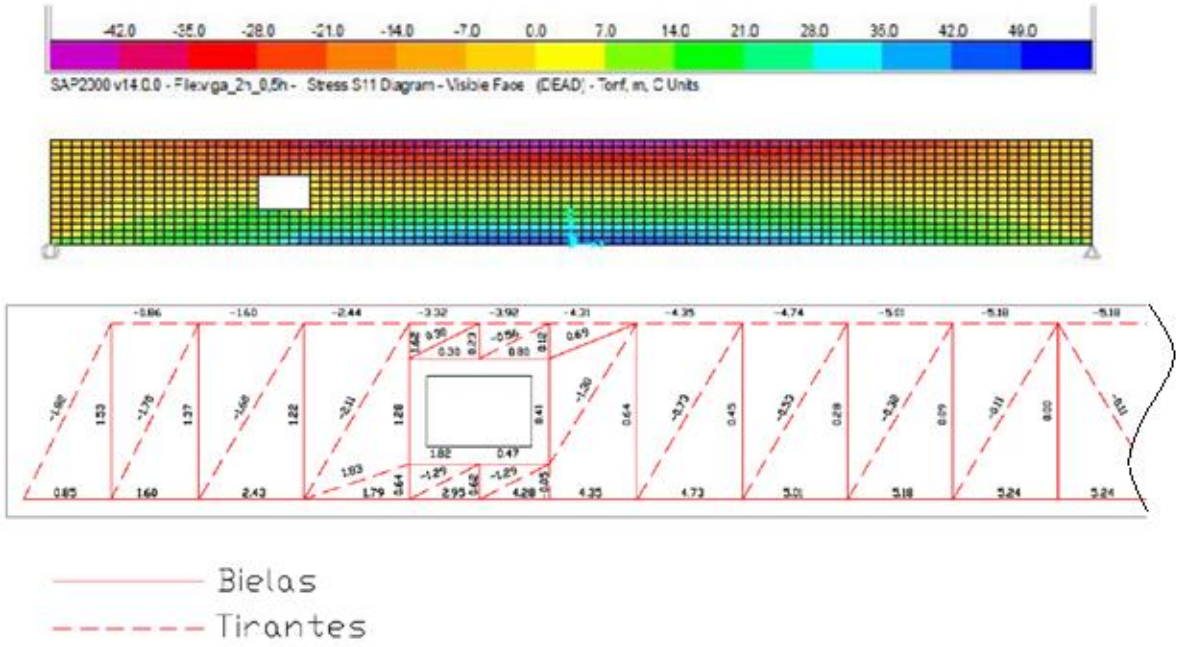
Fonte: Simão (2014)

Figura 18 – Esforços obtidos na viga VG2



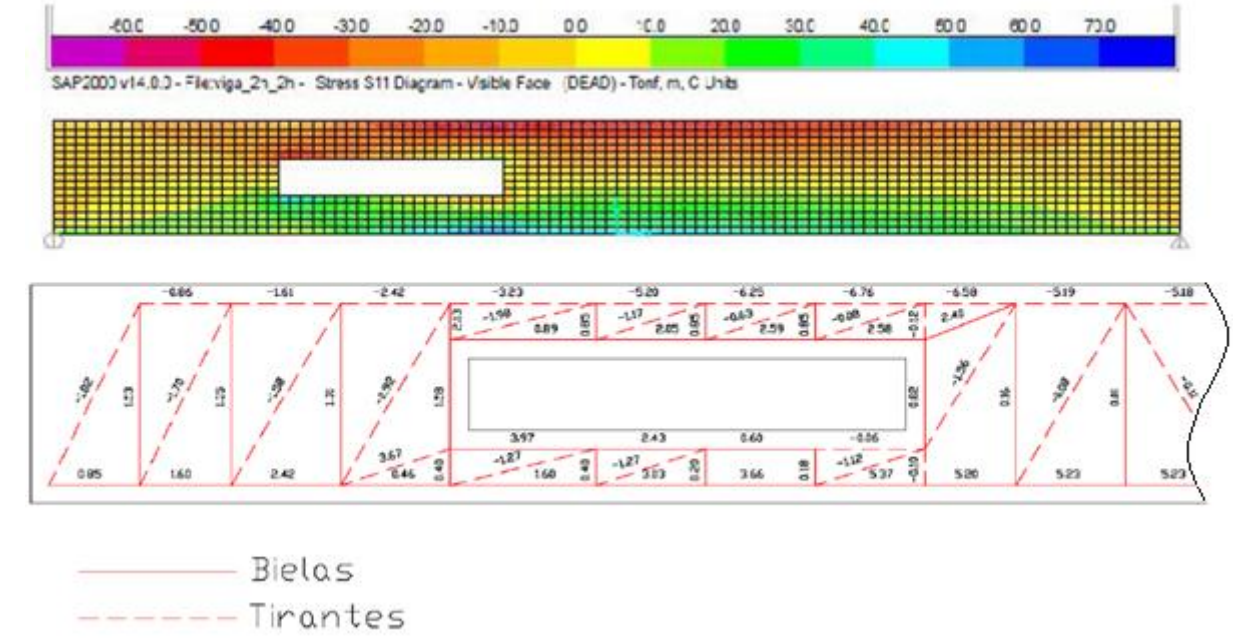
Fonte: Simão (2014)

Figura 19 – Esforços obtidos na viga VG3



Fonte: Simão (2014)

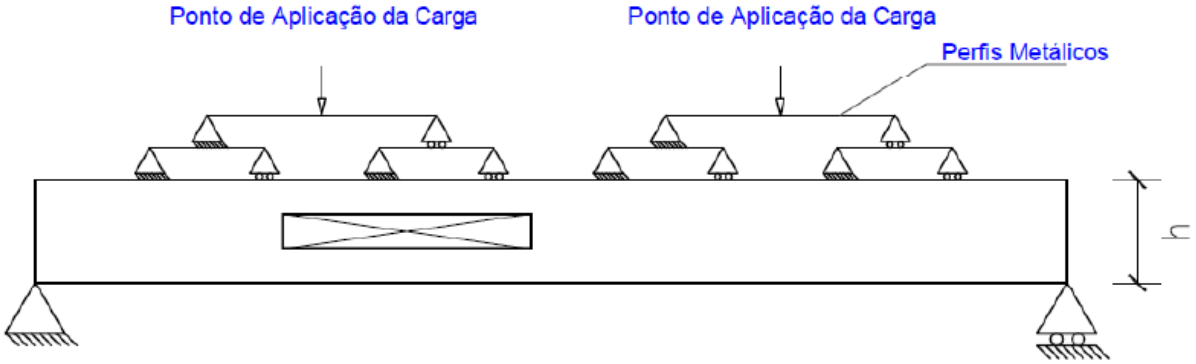
Figura 20 – Esforços obtidos na viga VG4



Fonte: Simão (2014)

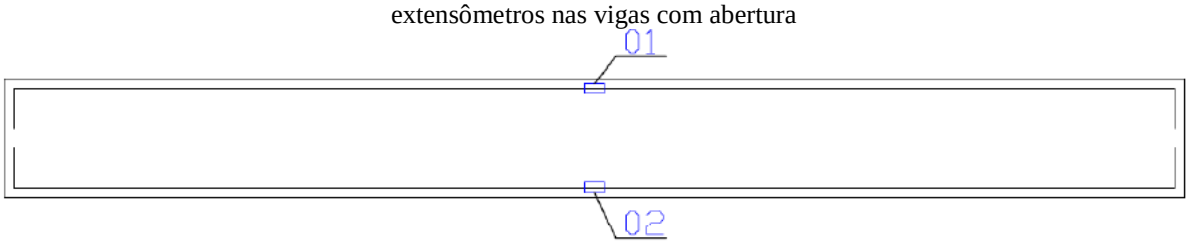
O carregamento foi aplicado por dois macacos hidráulicos e distribuído como é mostrado na Figura 21, para simular um carregamento distribuído. Para a coleta dos dados foi usado um medidor de deslocamento do tipo LVDT na parte central da viga e extensômetros posicionados como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Detalhe do esquema de carregamento das vigas ensaiadas

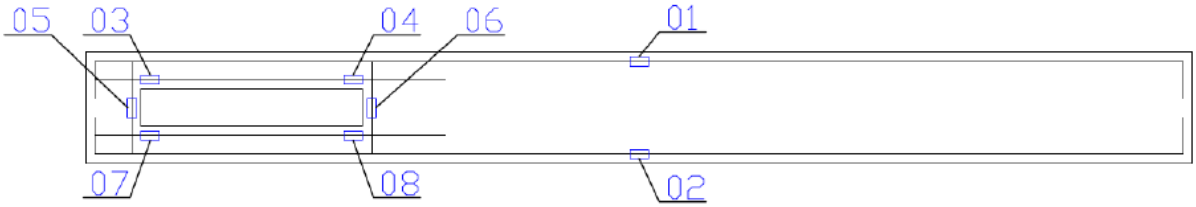


Fonte: Simão (2014)

Figura 22 – (a) Detalhe do posicionamento dos extensômetros na viga VGP. (b) Detalhe do posicionamento dos extensômetros nas vigas com abertura



(a)

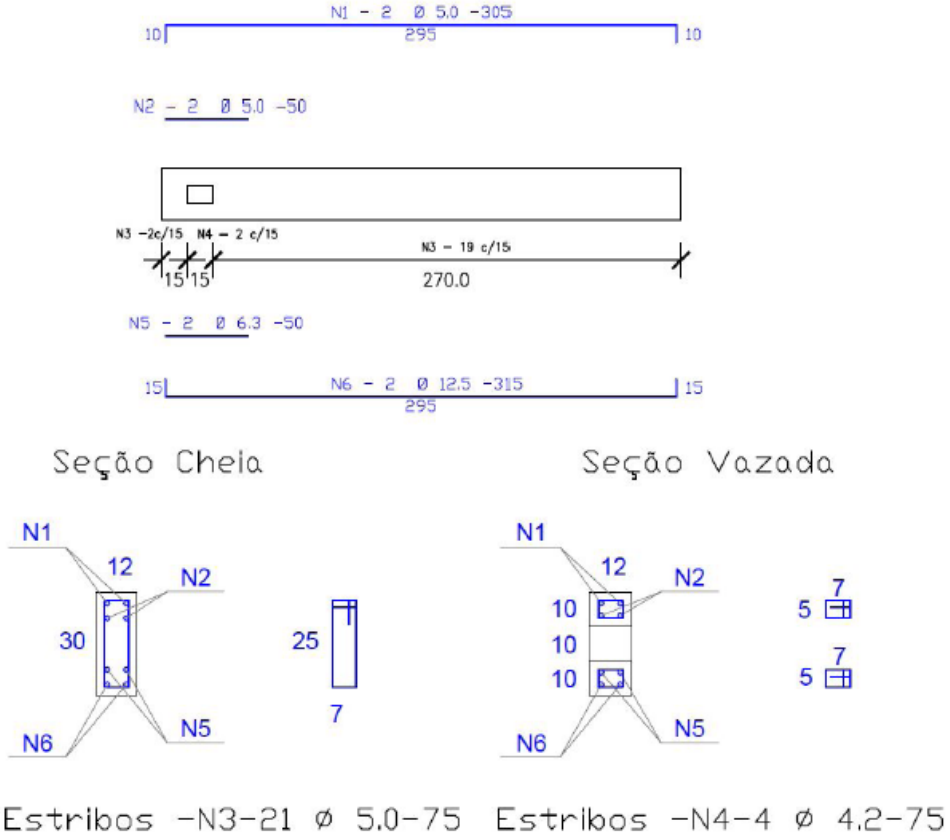


(b)

Fonte: Simão (2014)

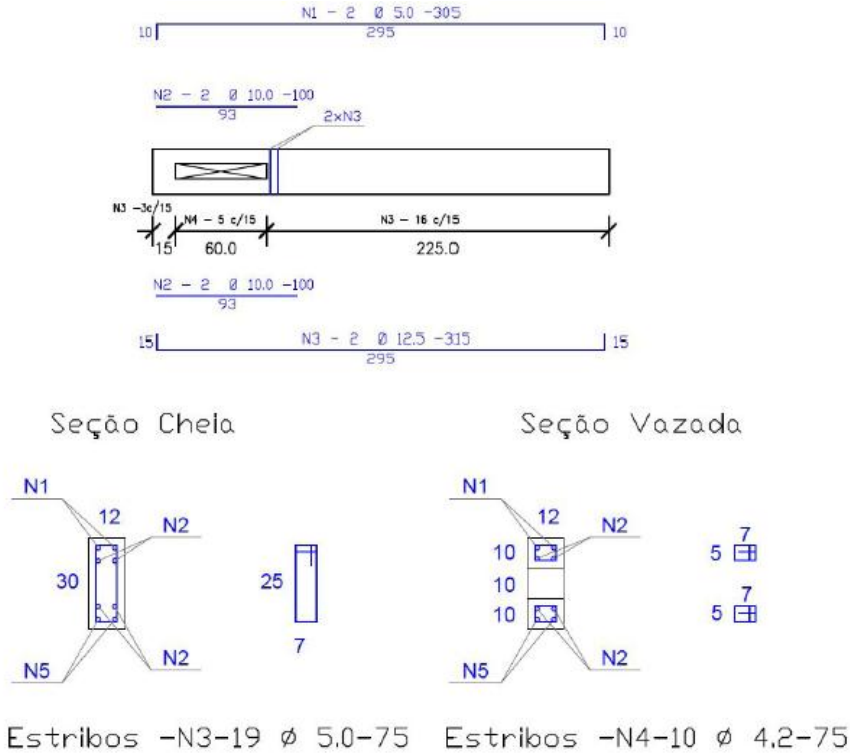
O dimensionamento das armaduras de reforço para as vigas com abertura na alma resultou no detalhamento mostrado nas Figuras 23 a 26.

Figura 23 – Detalhamento das armaduras da viga VG1



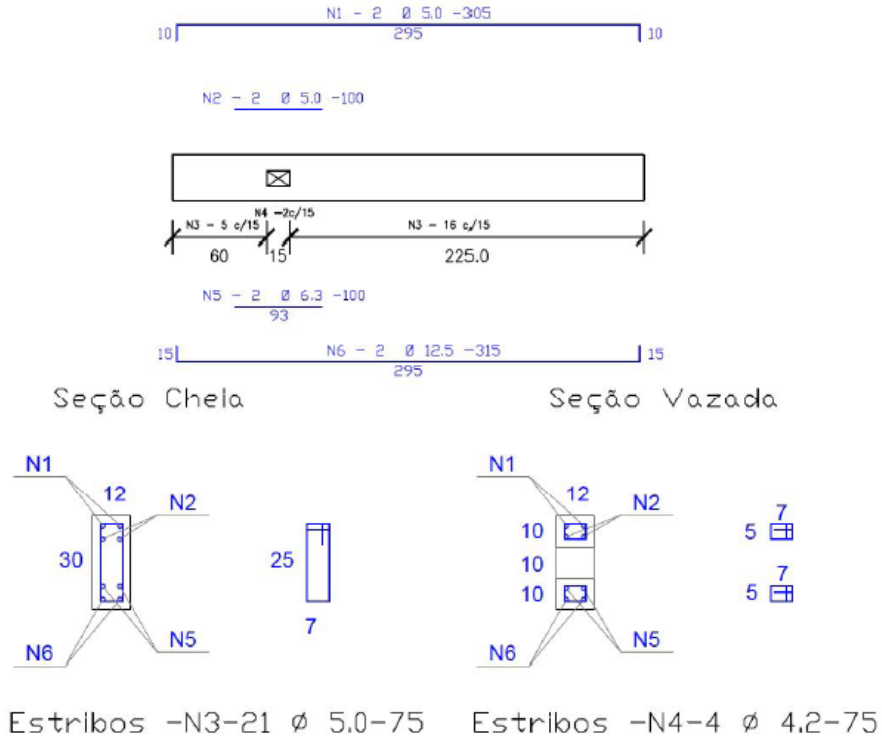
Fonte: Simão (2014)

Figura 24 – Detalhamento das armaduras da viga VG2



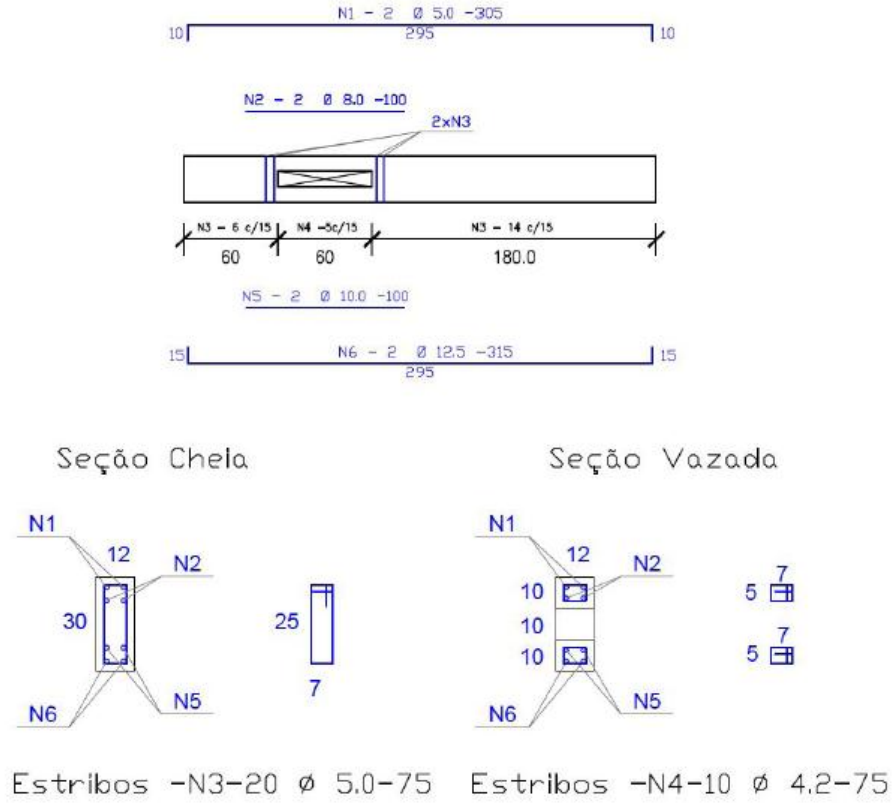
Fonte: Simão (2014)

Figura 25 – Detalhamento das armaduras da viga VG3



Fonte: Simão (2014)

Figura 26 – Detalhamento das armaduras da viga VG4



Fonte: Simão (2014)

Os resultados obtidos indicaram que o fator que mais influencia a tensão nos cantos da abertura é o comprimento da mesma, já o fator que mais influencia a deflexão no meio do vão livre é a distância da abertura ao apoio. As vigas VG1, VG2 e VG3 apresentaram força última praticamente igual ao da viga de referência, porém, a viga VG4 apresentou força última 24% superior a da viga de referência. Todas as vigas apresentaram deflexão máxima superior a da viga de referência em média de 31% fato explicado pela diminuição de rigidez que as aberturas provocaram nessas vigas. Observou-se quanto as deformações que as vigas VG1, VG2 e VG3 apresentaram uma deformação superior a da viga de referência VGP, porém a viga VG4 apresentou deformação praticamente igual a da viga VGP, esse fato foi explicado porque o ponto da deflexão máxima da viga se desloca no meio do vão no sentido da abertura.

2.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

Os compósitos são materiais basicamente compostos por duas fases ou mais fases, no caso do concreto reforçado com fibras as duas fases são a matriz de concreto de cimento portland e a fibra, sendo a matriz de concreto, por si só, um compósito formado por três fases principais: pasta de cimento, agregados graúdos e miúdos. Desde os tempos antigos, os mais variados tipos de fibras têm sido utilizados no intuito de reforçar materiais frágeis, existindo relatos de que palhas e pelos de cavalo foram utilizados para reforçar tijolos de adobe e alvenarias de argamassa e gesso na construção de casas. Uma casa construída por volta de 1540, a qual se acredita ser a casa mais antiga dos Estados Unidos, foi erguida com tijolos de adobe reforçado com palha (ACI 544.1R, 1996).

Após a I Guerra Mundial (1914 a 1918), as instituições militares saíram à procura por materiais que fossem capazes de absorve o impacto das explosões com baixa destruição do mesmo para o caso de outra Guerra de grandes proporções. Durante as épocas seguintes a Primeira Guerra Mundial houve um grande desenvolvimento do concreto reforçado com fibras (CRF), sendo os primeiros estudos sobre materiais compósitos a base de cimento desenvolvida nos anos 50 e 60, tratando dos concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) (LOPES, 2005).

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) ou concreto fibroso é aquele que contém cimento hidráulico, água, agregados miúdos e graúdos e fibras discretas e descontínuas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Figueiredo (2000) a utilização de compósitos cresceu em diversidade, podendo ser encontrados em várias aplicações na construção civil como telhas, painéis de

vedação vertical, e estruturas de concreto como túneis e pavimentos, onde o concreto reforçado com fibras vem aumentando sua aplicação.

Para Metha e Monteiro (1994) o concreto apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais como o aço. Este comportamento está associado às fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto, que prejudicam muito mais o material quando solicitado à tração do que à compressão.

As características citadas por Metha e Monteiro (1994) são peculiares dos materiais compostos por matrizes cimentíceas como é o caso do concreto. A fim de buscar alternativas para solucionar tais limitações, desenvolveu-se a possibilidade de adicionar fibras de aço como reforço, alterando as características iniciais das matrizes de concreto.

Segundo Figueiredo (2005), por possuir características como um alto grau de elasticidade, elevada resistência à tração e ductilidade, as fibras de aço proporcionam um aumento na tenacidade nas estruturas de concreto, melhorando sua resistência ao impacto e à fadiga, contribuindo para o aumento da durabilidade dessas estruturas. Sendo assim, apresenta-se a possibilidade de adicionar fibras de aço na matriz de concreto de modo a corrigir essa deficiência (BASTOS, 2000).

Entende-se por tenacidade a capacidade de um material se opor à propagação de fissuras dissipando energia de deformação.

O concreto convencional rompe bruscamente, imediatamente após sua primeira fissura quando submetido a cargas consideráveis, enquanto o CRF, além de resistir melhor às tensões ele não rompe bruscamente como o anterior, devido ao acréscimo de tenacidade que as fibras proporcionam (THOMAZ, 2006).

Desde então o mercado vem oferecendo uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas como reforço de matrizes a base de cimento para construção civil. Além da fibra de aço incluem-se as de vidro, fibras de carbono e kevlar, fibras de polipropileno, náilon, as fibras vegetais (sisal, juta, celulose) e as fibras minerais: volastonita e mica. Esses tipos de fibras variam consideravelmente em propriedades, eficiência e custo (LOPES, 2005).

2.4.1 Caracterização das fibras de aço

As fibras de aço podem ser utilizadas como reforço no concreto, haja vista, características inerentes a esse material como elevada resistência à tração e ductilidade.

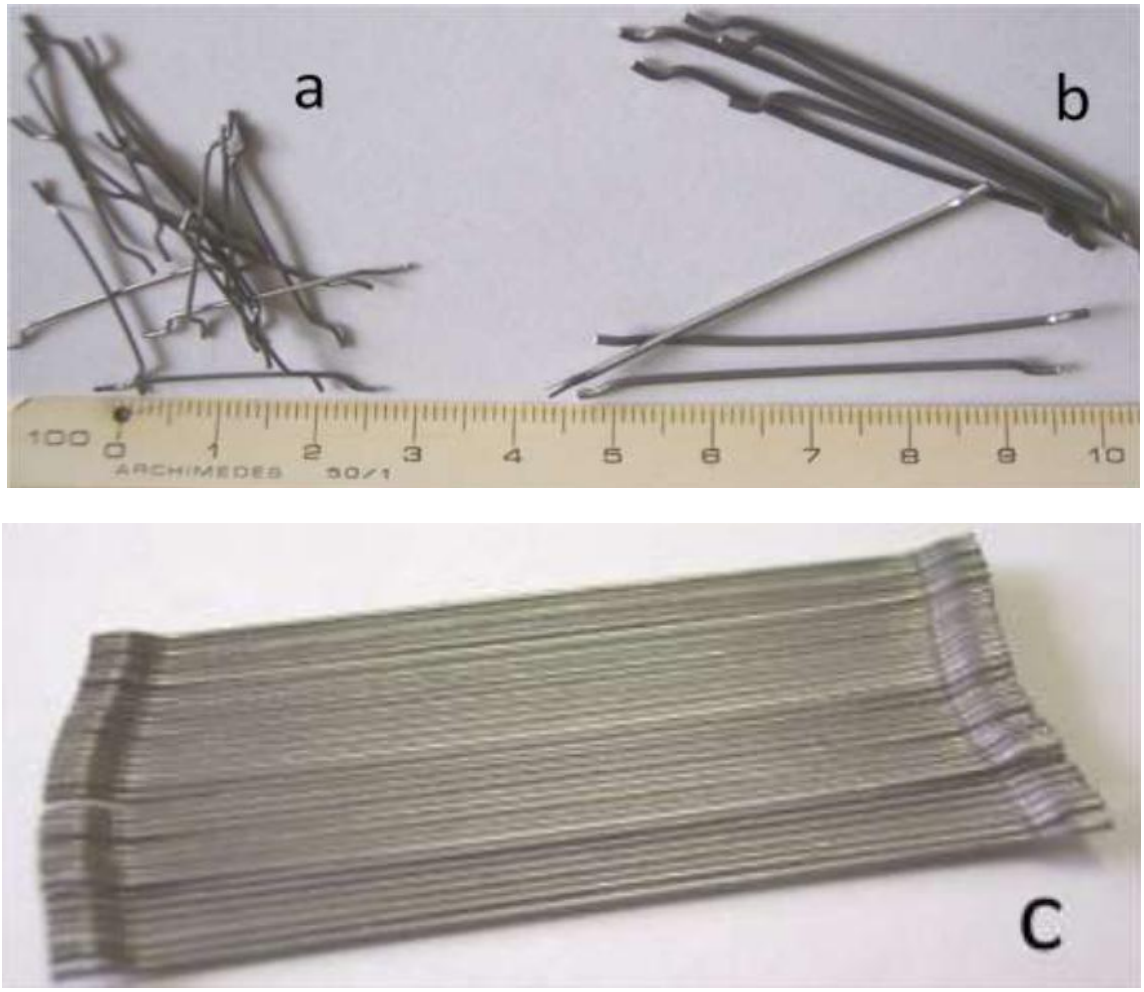
Segundo Sarzalejo et al. (2007), a fibra de aço é um produto caracterizado geometricamente por uma das dimensões (comprimento) que prevalece sobre as outras (diâmetro, ancoragem), podendo apresentar superfície lisa ou corrugada, formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades. Seu uso como reforço no concreto leva em consideração a dispersão homogênea na massa, sem alterar as características geométricas da mesma. Existem também, três classes previstas para fibras de aço segundo a norma, as quais foram definidas segundo o aço que deu origem às mesmas: fibra oriunda de arame trefilado a frio; fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio e fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Esta classificação, além de definir o tipo de aço utilizado na produção da fibra, irá determinar também a forma da seção transversal, o que proporcionará condições de definir os requisitos geométricos finais da mesma em conjunto com o nível de resistência mínima do aço. Apesar dessa classificação não tipificar as fibras em função do desempenho, seja quanto à trabalhabilidade ou mesmo quanto à tenacidade, ao adotar esta classificação possibilita estabelecer requisitos mínimos que poderão ser correlacionados com o desempenho final do CRFA.

Visando a padronização para tal estudo, foi publicada pela ABNT em dezembro de 2007, a nova especificação de fibras de aço a norma NBR 15530 intitulada “Fibras de aço para concreto – Especificação” estabelece parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono e definem os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais aos defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento das fibras.

> Geralmente, as fibras de aço possuem extremidades na forma de gancho para aumentar sua ancoragem e têm comprimento variando de 25 mm, chamadas fibras curtas (Figura 27 a), a 60 mm, chamadas fibras longas (Figura 27 b). Podem ser fornecidas soltas (Figura 27 a e 27 b) ou coladas em pentes (Figura 27 c) estas fibras coladas facilitam o processo de mistura e homogeneização do material. (FIGUEIREDO 2011)

Figura 27 – Fibras de aço soltas curtas (a), longas (b) e longas coladas (c).



Fonte: Figueiredo (2005)

A classificação das fibras segundo a NBR 15530:2007 é mostrada na Tabela 1. São previstos segundo esta norma três tipos básicos de fibras em função da sua conformação geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades
- Tipo C: fibra de aço corrugada
- Tipo R: fibra de aço reta

> Deve-se atentar para o fato que esta configuração geométrica, associada a cada um dos tipos de fibra de aço, não contempla o formato da seção transversal, mas somente o perfil longitudinal da fibra. O formato da seção transversal irá depender do tipo de aço utilizado na produção da fibra que pode ser trefilado ou laminado. (FIGUEIREDO 2011)

Com relação ao tipo de aço que deu origem as fibras a norma prevê três classes, a saber:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

Tabela 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

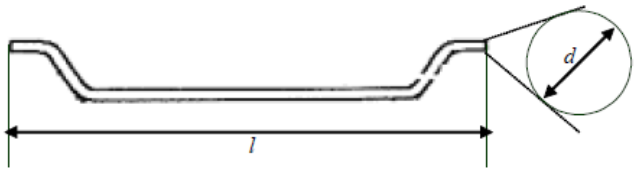
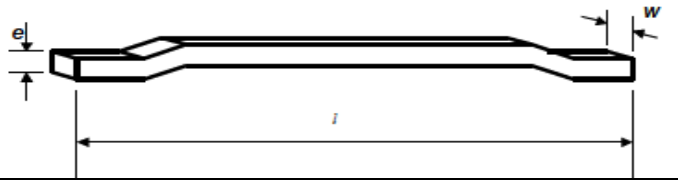
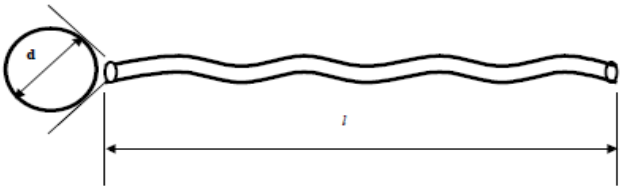
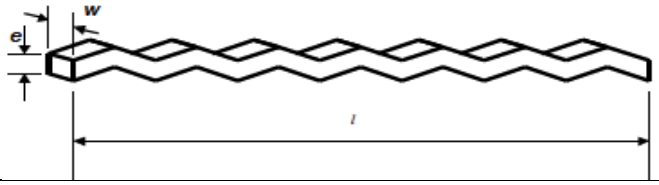
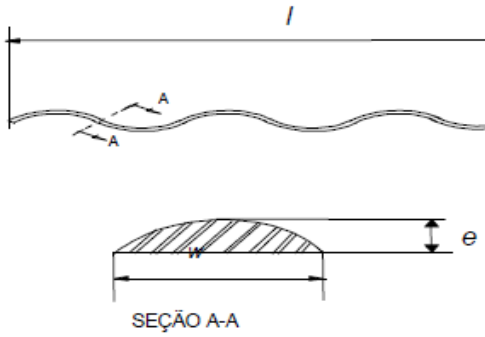
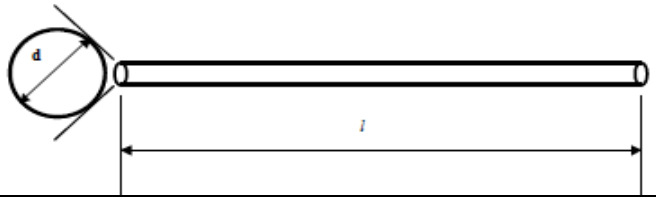
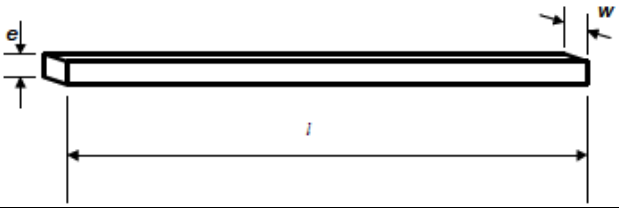
Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	

Tabela 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto (continuação)

Tipo	Classe da fibra	Geometria
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo (2011)

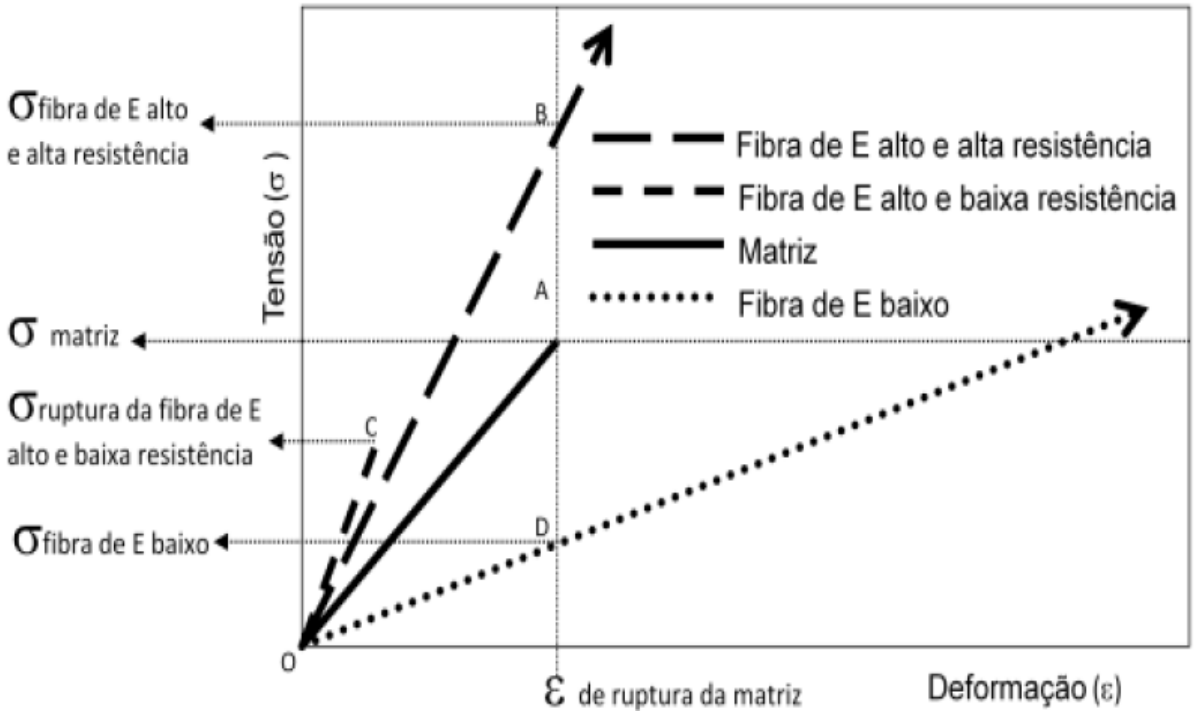
Para Mindess (1995) em comparação com outras tecnologias como a de estruturas convencionais de concreto armado, o concreto reforçado com fibras é de grande interesse tecnológico por aumentar a competitividade do concreto armado.

O papel que a fibra irá desempenhar no concreto irá depender de uma série de características da mesma. No entanto, para a classificação básica do material, as propriedades que são mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, pois estas duas propriedades irão definir a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO, 2005).

Para ilustrar a importância desse aspecto Figueiredo (2011) propõe o esquema apresentado na Figura 28. Nesse esquema uma matriz hipotética é reforçada com três tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. Todas as fases do compósito hipotético foram consideradas como de comportamento elástico perfeito. Figueiredo (2011) explica que na Figura 28 a curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas OB e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto módulo com alta e baixa resistência respectivamente. O comportamento da fibra de baixo módulo se encontra representado pela linha O-D. Supondo que, inicialmente, as fibras estão perfeitamente embutidas na matriz e há uma aderência perfeita entre ambas, o compósito quando for submetido a uma tensão de tração irá se deformar com diferentes níveis de tensão para cada uma das fases. Se formos analisar as fibras de baixo módulo de elasticidade as mesmas atingem um nível de tensão na ruptura bem mais baixo (ponto D) que a matriz (ponto A), então somente um elevado teor desta fibra apresentaria uma capacidade de reforço o que poderia inviabilizar aplicação do

material. Comportamento bem diferente da fibra de alto módulo de elasticidade de alta resistência que apresenta um elevado nível de tensão no momento em que o compósito atinge sua deformação crítica (ponto B). Isto faz com que este tipo de fibra apresente um elevado nível de reforço da matriz quanto ela rompe, mesmo para consumos de fibras mais baixos.

Figura 28 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto



Fonte: Figueiredo (2011)

Segundo Figueiredo (2011) a combinação de baixa resistência e alto módulo irá corresponder necessariamente a um material frágil de baixa capacidade de deformação elástica o que inviabilizaria a capacidade de reforçar a matriz após sua fissuração (ponto C).

Figueiredo (2011) explica que uma grande vantagem da fibra de aço é o fato de já contar com norma de especificação no Brasil, definindo as exigências que garantem sua capacidade de atuar como reforço do concreto.

Um problema sério a ser resolvido, característico do concreto fibroso é o empelotamento das fibras no momento na mistura dos componentes do concreto. Se a mistura apresentar teores de água muito baixos e uma quantidade de fibras muito alta o concreto tente a formar ninhos que dificultam o lançamento e adensamento do composto, além de que o concreto não apresenta homogeneidade satisfatória para desempenhar as funções que são atribuídas a ele (NUNES, 2005).

Sabe-se que independente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica das fibras introduzidas ao concreto (MEHTA e MONTEIRO,

1994). Para Figueiredo (2000) quanto maior for o fator de forma das fibras maior será o impacto na trabalhabilidade da mistura.

Segundo Figueiredo (2011) o fator de forma é a relação geométrica obtida a partir da divisão entre o comprimento não alongado da fibra (l), pelo diâmetro do círculo com área equivalente à de sua seção transversal. A norma NBR 15530:2007 define este diâmetro como sendo chamado de diâmetro equivalente (d_e). O fator de forma pode ser calculado como demonstra Figueiredo (2011) pela equação (1):

$$\lambda = l/d_e \quad (1)$$

Na qual:

$\lambda =$ Fator de forma da fibra, $l =$ Comprimento não alongado da fibra em (mm) e $d_e =$ Diâmetro equivalente da seção transversal da fibra.

Para fibras da Classe I como explica Figueiredo (2011) calcula-se o diâmetro equivalente a partir da equação (2):

$$d_e = (d_1 + d_2)/2 \quad (2)$$

Onde:

$d_1\ e\ d_2 =$ Medidas em milímetros tomadas na região central da fibra em duas direções ortogonais entre si.

Para as fibras da classe A-II, C-II e R-II, Figueiredo aponta a equação (3) para o cálculo do diâmetro equivalente, considerando "e" como sendo a menor dimensão da seção transversal e "w" a maior dimensão da seção transversal como são apontadas na Tabela 1, na qual também é apontado como o comprimento total (l) deve ser determinado.

$$d_e = \sqrt{4.e.w/\pi} \quad (3)$$

Para as fibras da classe C-III, Figueiredo aponta a equação (4) para o cálculo do diâmetro equivalente, considerando "e" como sendo a menor dimensão da seção transversal e "w" a maior dimensão da seção transversal como são apontadas na tabela 1, na qual também é apontado como o comprimento total (l) deve ser determinado.

$$d_e = \sqrt{2(3.e^3 + 4.e.w^2)/(3.w.\pi)} \quad (4)$$

A adição das fibras influencia na consistência do concreto fresco e interfere, portanto, na sua trabalhabilidade gerando também uma tendência na diminuição da fluidez do concreto, que sob vibração este efeito de "endurecimento" pode sumir (BASTOS, 1999). Isto ocorre pelo fato de se ter uma elevada área específica, que demanda uma grande quantidade de água de molhagem, resultando em uma menor quantidade de água disponível para fluidificar a mistura, aumentando assim o atrito interno do concreto e reduzindo sua mobilidade.

Independente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é função do fator de forma e do volume de fibras utilizados na mistura, ou seja, com o aumento do fator de forma e aumento do teor de fibras, ocorre uma redução na trabalhabilidade do material (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Mehta e Monteiro (1994) alertam: para que os problemas supracitados possam ser minimizados propõe-se a utilização de aditivos químicos superplastificantes. Com isso, o CRFA poderá ser aplicado em diversos tipos de obra de engenharia devido a sua versatilidade.

As fibras de aço apresentam o papel principal na definição do custo relativo ao CRFA, uma vez que o tipo, o fator de forma, a quantidade, a resistência, o tamanho e a forma são influencias diretas para determinação do método de moldagem, dimensionamento dos agregados e consequentemente o custo do CRFA. Para Shah (1991) *apud* Figueiredo (2000) um concreto com fibras mesmo em um teor abaixo do volume crítico, embora apresente vantagens na sua aplicação pode dobrar o seu custo por metro cúbico de concreto. Para isto, a dosagem correta do teor de fibras torna-se essencial para a viabilidade econômica da mistura.

2.4.2 Fissuração no concreto reforçado com fibras aço

O concreto convencional apresenta um bom desempenho quando solicitado à compressão, porém, observa-se um menor desempenho quando submetido a esforços de tração. Quando uma viga de concreto é submetida a condições de flexão, possui zonas com elevadas tensões de compressão, bem como, elevadas tensões de tração. A solução tradicional para este problema é o concreto armado, onde as armaduras, passivas ou ativas, inseridas nos elementos de concreto são capazes de absorver as tensões de tração que surgem (WEILER & GROSSE, 1996).

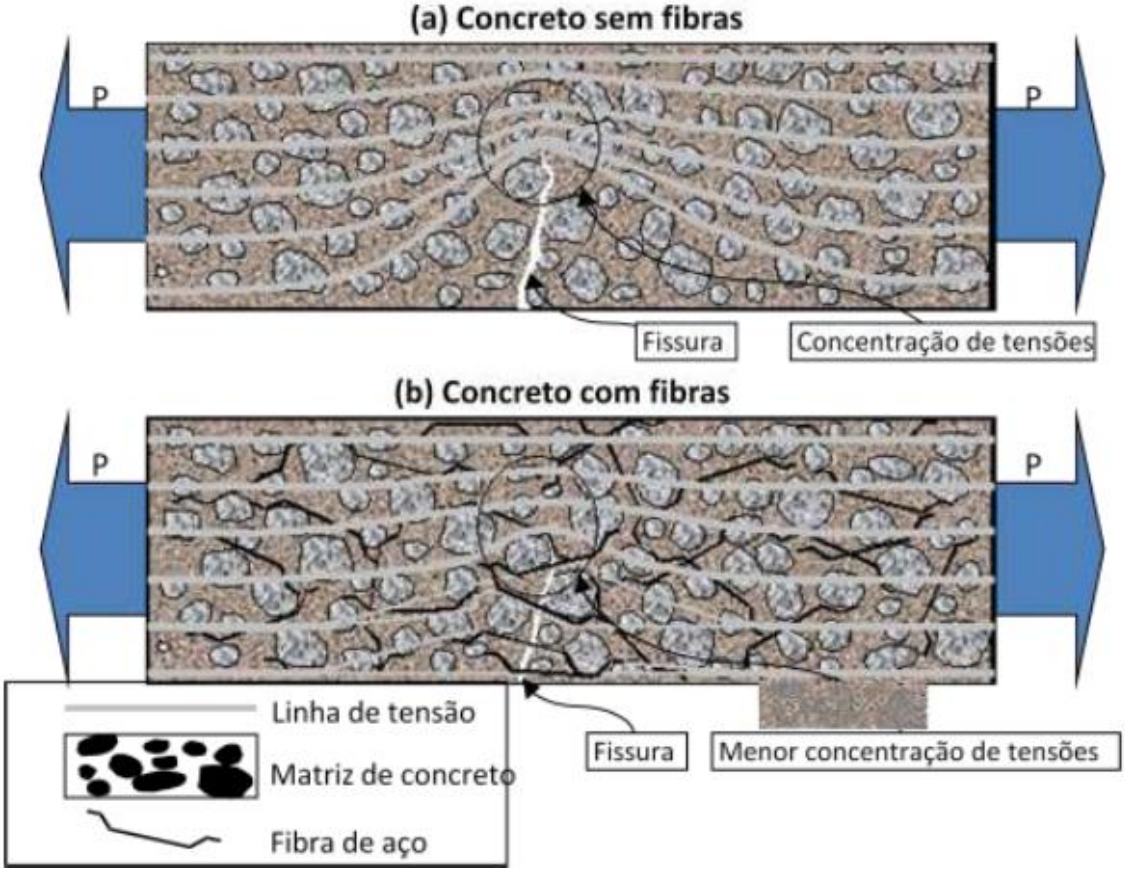
No entanto, nem sempre é possível distribuir essas armaduras por toda área de solicitação de tração, ficando as mesmas concentradas em determinadas regiões, não impedindo o aparecimento de algumas fissuras em áreas mais distantes das armaduras.

As fibras de aço, quando adicionadas ao concreto, permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores. Para melhor entender este comportamento deve-se lembrar de que o concreto, como um material frágil, apresenta-se sempre susceptível às concentração de tensões quando do surgimento e propagação de uma fissura a partir do aumento da tensão a ele imposta.

Ao adicionar fibras de aço ao concreto, este deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Com isto, tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta certa capacidade portante pós-fissuração.

No concreto simples uma fissura tende a atuar como uma espécie de barreira impedindo a propagação das tensões de tração, como consequência vai acarretar uma concentração de tensões nas extremidades da fissura como é mostrado na Figura 29 (a), que no caso dessa tensão superar o valor da tensão crítica vai ocorrer uma ruptura abrupta do material, uma vez que o concreto tem um caráter tipicamente frágil. No entanto ao se adicionar fibras de aço com resistência e módulo de elasticidade adequados, e num teor adequado, muda-se essa característica de material marcadamente frágil, pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando assim a concentração de tensões na extremidade da fissura (Figura 29 b), o compósito então passa a ter um comportamento pseudo-dúctil. Assim, a utilização de fibras de aço, poderá minimizar a questão da fissuração no concreto, fato este que pode justificar a utilização de fibras de aço mesmo para concretos armados, servindo como armadura complementar para reduzir a fissuração (MINDESS 1995).

Figura 29 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: Figueiredo, 2000

Tomando como base as recomendações do American Concrete Institute (ACI) (1988), para aplicações estruturais, a utilização das fibras de aço deve ser feita em conjunto com as barras de aço convencionais de tração, ou seja, as fibras de aço devem ter um papel secundário no reforço da estrutura, como, por exemplo, inibir a fissuração e melhorar a resistência ao impacto ou carregamentos dinâmicos. Em outras palavras, em elementos estruturais onde ocorrerá flexão ou atuarão carregamentos que induzam tensões de tração, as barras da armadura principal deverão ser capazes de resistir, na sua totalidade, aos esforços resultantes, mesmo na situação, onde se faz uso do concreto com fibras de aço.

É observado por Holschemacher et al. (2002) que, na maioria dos casos, a quantidade de fibras utilizada no concreto fica abaixo do volume crítico, e assim, as fibras são capazes de transferir apenas uma parte das forças que surgem no início da fissuração. Ainda nesse sentido, Orgass e Klug (2004) apontam o CRFA como um concreto situado na faixa entre um concreto simples e um concreto armado, não devendo, portanto, ser colocado no mesmo patamar de utilização do concreto estrutural convencional com barras de aço.

De acordo com Evangelista (2003), as fibras de aço utilizadas na produção de CRFA estão bem diferentes dos primeiros modelos que originalmente se introduziram nas tentativas

iniciais de reforço do concreto com fibras de aço. As fibras de aço para reforço do concreto atualmente, são suficientemente pequenas para serem dispersas randomicamente e misturadas no concreto fresco por procedimentos usuais.

Para Sarzalejo et al. (2007), as fibras com adequada resistência mecânica à tração, distribuídas homogeneamente dentro do concreto, constituem uma micro armadura que, mostra-se extremamente eficaz para combater o fenômeno da fissuração por retração, além de conferir considerável ductilidade à medida em que se elevam a quantidade e resistência das mesmas. Em tais circunstâncias, proporciona-se grande tenacidade ao concreto.

Geralmente, nos estudos de concretos reforçados com fibras de aço, são apresentadas avaliações de seu comportamento no estado endurecido através de vigas submetidas à flexão, assim, é possível determinar, dentre outros parâmetros, a capacidade do compósito em resistir aos esforços de tração, a inibição ao surgimento da primeira fissura, e avaliar o comportamento pós-fissuração e a tenacidade do material, que de certa forma refletem indiretamente as complexas relações existentes entre as fibras e a matriz que as envolve.

Com a utilização de fibras de aço será assegurada uma menor fissuração do concreto, este fato pode vir a recomendar sua utilização mesmo para concretos convencionalmente armados (MINDESS, 1995). De qualquer forma, a dosagem da fibra de aço deve estar em conformidade com os requisitos de projeto, tanto específicos como gerais (ACI, 1988 e ACI, 1993). Deve-se ressaltar que o nível de tensão que a fibra consegue transferir pelas fissuras depende de uma série de aspectos como o seu comprimento e o teor de fibras.

Como já foi dito anteriormente, o objetivo das fibras de aço ao concreto não é alterar a resistência à compressão do compósito, embora possam ocasionar uma leve diferença nos ensaios. Bentur e Mindess (1990), Balaguru e Shah (1992) afirmam que o aumento da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de aço não passa de 25%.

A resistência à tração na flexão é a propriedade mecânica onde ocorre o aumento mais significativo com a adição de fibras no concreto, sendo comuns aumentos maiores do que 100% (OLIVEIRA, 2005).

O aumento da tenacidade ocasionado pela fibra de aço torna sensível a distribuição das tensões nos elementos. Desta forma, o concreto reforçado com fibra de aço passa a adquirir um comportamento semelhante de materiais elastoplásticos pelo ganho de tenacidade. Por definição, os materiais elastoplásticos têm capacidade de suportar forças adicionais além do regime elástico.

Um concreto reforçado com fibras apresenta segundo o ACI (1994, *apud* FIGUEIREDO, 2000) de 3 a 10 vezes mais resistência quando submetidos a ensaios

dinâmicos como cargas explosivas, queda de massas e cargas dinâmicas de compressão, flexão e tração, comparadas aos concretos comuns. Este ganho é dado à quantidade de energia dissipada no concreto resistente por fibras.

Segundo o ACI (1994) as fibras de aço melhoram a resistência ao cisalhamento das vigas de concreto, podendo até mesmo substituir ou suplementar na armadura convencionalmente utilizada na vertical (estribos). As fibras de aço podem aumentar a resistência ao cisalhamento das vigas de concreto o suficiente para prevenir a ruptura catastrófica por tração diagonal e forçar a ruptura por flexão (ACI, 1994).

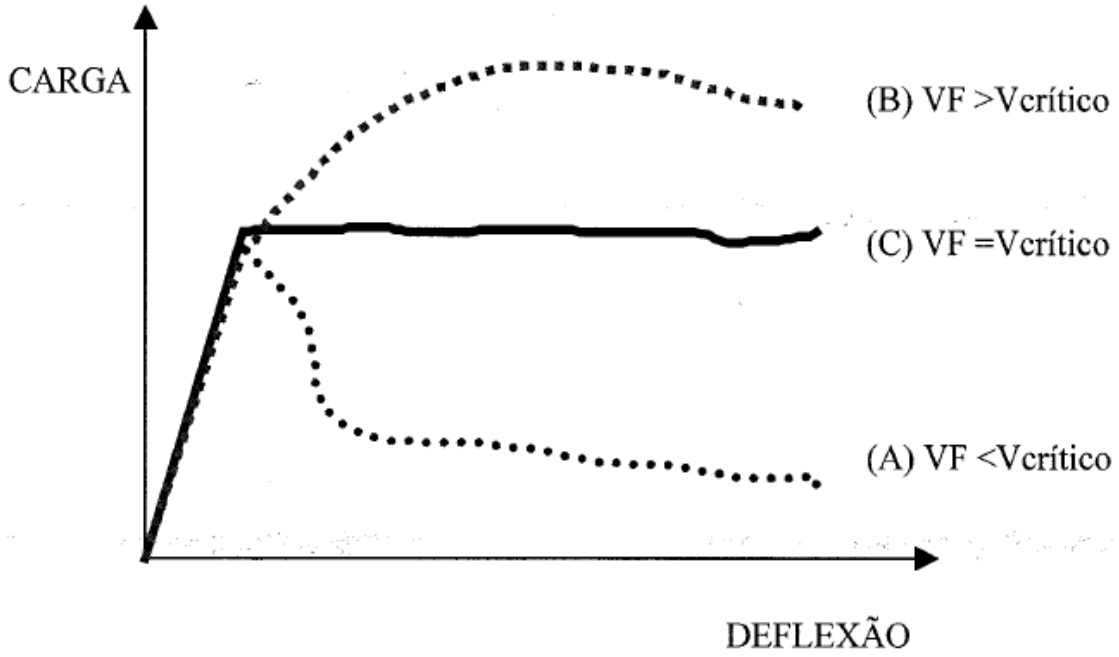
O ACI (1993) prescreve que, em elementos estruturais onde tensões de tração axial ou de flexão irão ocorrer, tal como em vigas, colunas, lajes suspensas, a armadura de aço deve ser capaz de resistir às tensões de tração, ou seja, as fibras de aço não devem ser utilizadas para substituir a armadura de aço, e sim às fibras de aço devem ser utilizadas nesses casos em uma função suplementar para inibir a fissuração, melhorar a resistência ao impacto ou carregamento dinâmico e para resistir à desintegração do material. Em aplicações onde a presença de armaduras contínuas não é essencial para a segurança e a integridade da estrutura, a melhora da resistência à flexão proporcionada pelas fibras pode ser usada para reduzir a espessura das seções, melhorar o desempenho ou ambas.

A adição de fibras de aço, em frações volumétricas adequadas, pode ser uma aliada importante ao concreto armado no combate às tensões de tração induzidas. Desse modo, o uso de fibras pode ajudar na redução do aparecimento de fissuras, inclusive aquelas decorrentes da retração do concreto.

Figueiredo (2000) ressalta que o nível de tensão que a fibra consegue transferir pelas fissuras depende de uma série de aspectos como seu comprimento e o teor de fibras.

O teor de fibras está diretamente associado ao conceito de volume crítico uma vez que o volume crítico seria o teor de fibras que mantém a mesma capacidade resistente para o compósito a partir da ruptura da matriz. Então é desejável um teor de fibras igual ou acima do volume crítico uma vez que este teor estando acima o compósito ainda poderia receber cargas crescentes mesmo após a ruptura da matriz, o que não é desejável é um teor abaixo do volume crítico, pois ocorreria uma queda na capacidade portante do compósito após a ruptura da matriz (Figueiredo 2000). Esse comportamento de suporte de carga com relação ao volume crítico de fibras está descrito na Figura 30.

Figura 30 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), igual (B) e acima (C) do volume crítico de fibras.



Fonte: Figueiredo (2000)

A determinação do volume crítico está associada à modelagem de Aveston et. al. (1971 *apud* FIGUEIREDO 2000) onde se consegue a dedução algébrica mostrada a seguir.

Parâmetros iniciais:

ε_{um} = deformação última da matriz

σ_{um} = tensão última da matriz

$V_{fcrít}$ = Volume crítico de fibras dado em porcentagem em relação ao volume total do compósito

σ_{fu} = tensão última das fibras

E_f = Módulo de elasticidade da fibra

E_m = Módulo de elasticidade da Matriz

V_c = Volume do compósito = 1

V_f = Volume de fibras no compósito

V_m = Volume da matriz no compósito

O volume do compósito é dado pela soma do volume de fibras com o volume da matriz assim têm-se:

$$V_c = V_f + V_m = 1 \quad (5)$$

O estado de tensões e deformação do compósito no exato momento em que há a ruptura da matriz define as condicionantes do volume crítico de fibras. Assim, a deformação da fibra é a mesma da matriz, nessa situação:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{um} \tag{6}$$

A tensão aplicada na fibra é dada pela equação:

$$\sigma_f = \varepsilon_{um}.E_f \tag{7}$$

A tensão de ruptura da matriz é dada pela equação:

$$\sigma_{um} = \varepsilon_{um}.E_m \tag{8}$$

Assim têm-se:

$$\sigma_c\,.V_c = \sigma_f.V_f + \sigma_{um}.V_m$$

$$\sigma_c\,.1 = \sigma_f.V_f + \sigma_{um}.(1 - V_{fcrít})$$

$$\sigma_c = \varepsilon_{um}.E_f.V_{fcrít} + \sigma_{um}.(1 - V_{fcrít}) \tag{9}$$

Logo após a ocorrência da ruptura da matriz há a transferência do carregamento da matriz, que perde sua capacidade portante, para a fibra, daí têm-se:

$$\sigma_c = \sigma_{fu}.V_{fcrít} \tag{10}$$

Substituindo em (9)

$$\sigma_{fu}.V_{fcrít} = \varepsilon_{um}.E_f.V_{fcrít} + \sigma_{um}.(1 - V_{fcrít}) \tag{11}$$

Isolando-se $V_{fcrít}$ em (11) têm-se:

$$V_{fcrít} = \sigma_{um}/\left[\sigma_{fu} - \left(\varepsilon_{um}.E_f\right) + \sigma_{um}\right] \tag{12}$$

Sabendo-se que o módulo de elasticidade do compósito é dado por:

$$E_c = E_f.V_f + E_m.V_m = E_f.V_{fcrít} + E_m.(1 - V_{fcrít}) \tag{13}$$

Obtêm-se:

$$E_f = (E_c - E_m + E_m.V_{fcrít})/V_{fcrít} \tag{14}$$

Substituindo-se (14) em (12) Obtêm-se:

$$V_{fcrít} = (\varepsilon_{um}.E_c)/\sigma_{fu} \tag{15}$$

No caso particular do concreto reforçado com fibras de aço, adotando-se os seguintes valores de referência:

$\varepsilon_{um} = 100 \,.\, 10^{-6}$

$\sigma_{um} = 3MPa$

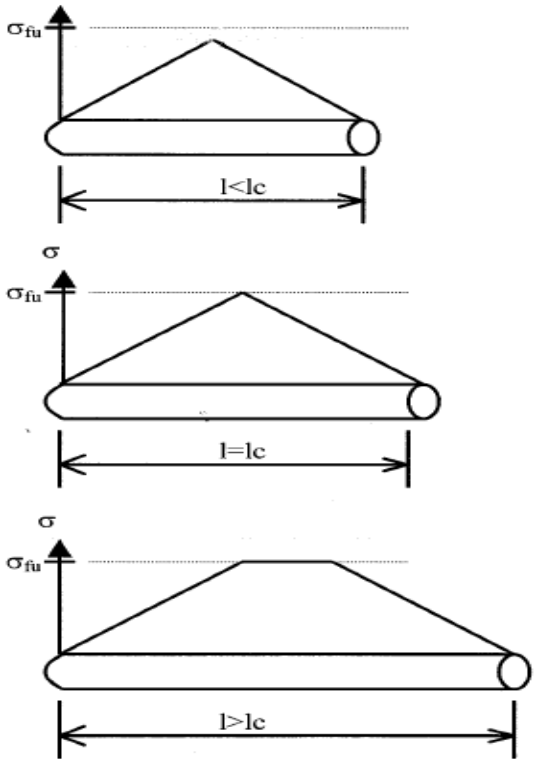
$\sigma_{fu} = 1000MPa$

$E_f = 200GPa$

Obtêm-se como $V_{fcrít}$ um valor da ordem de 0,31%, porém como ressalta Figueiredo (2000) este valor está associado a um modelo ideal de compósito descrito por Aveston *et.al.* (1971), onde as fibras são contínuas e perfeitamente alinhadas ao eixo das tensões principais, o que não ocorre na prática, pois, quando ocorrer a ruptura da matriz ocorrerá uma inclinação da fibra com relação à fissura, diferente da posição ortogonal proposta por Aveston *et.al.* (1971).

Além do volume crítico deve-se ressaltar outro fator de eficiência que é o comprimento crítico das fibras que está baseada num modelo que descreve a transferência de tensão entre a matriz e a fibra como aumentando linearmente dos extremos para o centro da fibra como é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico



Fonte: Bentur e Mindess (1990)

Quando ocorre fissuração perpendicular à fibra e posicionada no seu centro ela pode ser dita com o comprimento crítico quando a tensão no seu centro seja igual a sua tensão de ruptura essa seria a situação ideal, uma vez que abaixo do seu comprimento crítico, a carga de arrancamento que ocorre no comprimento embutido na matriz não irá superar a resistência da fibra, então com o aumento da deformação a fibra que está atuando como ponte de transferência será arrancada para o lado deixando de cumprir seu papel de transferir as tensões, principalmente em concreto de baixa e moderada resistência. Para comprimentos maiores que o crítico ocorrerá a ruptura de algumas fibras (FIGUEIREDO 2000).

De acordo com Prudêncio Jr. et al. (2006), muitas tentativas de modelagem do comportamento de vigas de CRFA à flexão foram feitas, porém, nenhuma foi capaz de explicar completamente o que ocorre na seção crítica fissurada, no que se refere às interações entre matriz e fibras.

Em resumo, dentre as vantagens referentes à utilização de fibras genéricas para reforço de matrizes cimentíceas, em comparação ao concreto convencional, podem ser citadas (WATANABE, 2008):

- As fibras contribuem para uma mudança no comportamento tensão-deformação de matrizes cimentíceas, com o aumento da ductibilidade, beneficiando o material no seu estado pós-fissuração;
- As fibras inibem a amplitude das fissuras associadas ao material compósito, acarretando um aumento na tenacidade;
- As fibras controlam a propagação das fissuras dentro da matriz do compósito;
- O reforço com fibras provoca um aumento das resistências à fadiga, às cargas de impacto e dinâmicas.

2.4.3 Contribuição das fibras para resistência do concreto

Vários estudos já foram feitos sobre a adição de fibras de aço ao concreto e, como apontou Armelin (1992), não há um consenso entre os resultados sobre a resistência a compressão como também acréscimo significativo em seu valor. Em contrapartida, a resistência à tração por flexão é que tem acréscimos significativos em sua magnitude.

Por outro lado, como as fibras de aço atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, sejam elas produzidas por esforços de tração ou cisalhamento como ocorre no

ensaio de compressão, o concreto também apresentará um ganho quanto à tenacidade, isto é, haverá um maior consumo energético após a fissuração do material.

A contribuição real de um concreto fibroso é a ductibilidade que ele apresenta quando submetido à flexão e a função primordial das fibras no concreto é controlar a fissuração da matriz do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A quantidade de fibras presente na matriz possui grande influência nas propriedades do CRFA, pois à medida que se aumenta o consumo de fibras verificam-se duas situações distintas na trabalhabilidade, na resistência à compressão, na resistência à tração, na resistência à flexão e na tenacidade à flexão.

Um dos principais efeitos da adição de fibras de aço no concreto, em seu estado fresco, consiste na redução da trabalhabilidade, uma vez que as fibras tendem a enrijecer a mistura provocando perda de homogeneidade e mobilidade. Esta redução é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto, isto porque, ao se adicionar fibra ao concreto está se adicionando também uma grande área superficial, que demanda água de molhagem para fluidificar a mistura. Assim, parâmetros como: teor de fibra, fator de forma, volume crítico, da dimensão máxima característica e granulometria do agregado carecem de cuidados com relação à dosagem de forma a assegurar uma maior dispersão de fibra na matriz (FIGUEIREDO apud GARCEZ, 2005).

As fibras têm pouca influência na resistência à compressão do CRFA (BENTUR e MINDESS, 1990). Historicamente não há um consenso sobre os possíveis efeitos da adição de fibras no ganho de resistência do concreto, podendo até mesmo em alguns casos provocar redução nos valores medidos para essa propriedade. Esta redução pode não ser devido à adição de fibras ao concreto e sim à adição de mais água para aumentar a trabalhabilidade do mesmo (FIGUEIREDO, 2000).

Estudos realizados por Bentur e Mindess (1990), ajudam a evidenciar a contribuição desses parâmetros no aumento da resistência à tração, segundo o autor um volume de 5% de fibras lisas e retas de aço orientadas na direção da tração pode acarretar um aumento nessa resistência de até 133%. Entretanto quando as fibras são colocadas aleatoriamente, este aumento chega ao máximo a 60%.

Normalmente o efeito das fibras de aço é mais significativo na flexão do que na resistência à compressão ou até mesmo à tração. Isto ocorre devido ao comportamento pseudodúctil desenvolvido pelo concreto, cuja distribuição de tensões e deformações fica alterada após a introdução das fibras. Dados têm mostrado que a resistência à flexão do CRFA

é de cerca de 50 a 70% maior que a resistência à flexão de um concreto não reforçado (GARCEZ, 2005).

A tenacidade à flexão é definida como a área abaixo da curva carga deflexão medida no ensaio de flexão. Estas curvas podem variar muito de acordo com o volume e as características das fibras. Fibras com melhores características de ancoragem, por exemplo, fibras com ancoragem mecânica ou com relações de aspecto altas, fornecem maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas, com a mesma concentração de volume. O impacto e a resistência à fadiga do concreto estão relacionados à tenacidade a flexão e também aumentam consideravelmente (BENTUR e MINDESS *apud* LOPES, 2005).

Segundo Migliorini (2011), no que diz respeito à interação fibra-matriz e o desempenho destas no concreto, entre os diferentes formatos de fibras de aço desenvolvidos, merecem destaque as fibras com deformações nas extremidades em formato de ganchos. No momento em que ocorre a fissuração da matriz, aumentando a solicitação destas fibras inicia-se o estiramento do gancho, promovendo assim um aumento na capacidade de carga correspondente a parte não linear da fibra. Quando o gancho apresenta-se parcialmente esticado, o processo de descolamento deste gancho na matriz ocasiona a queda de capacidade de suporte e, consequentemente, um volume maior na matriz é responsável por resistir à extração da fibra.

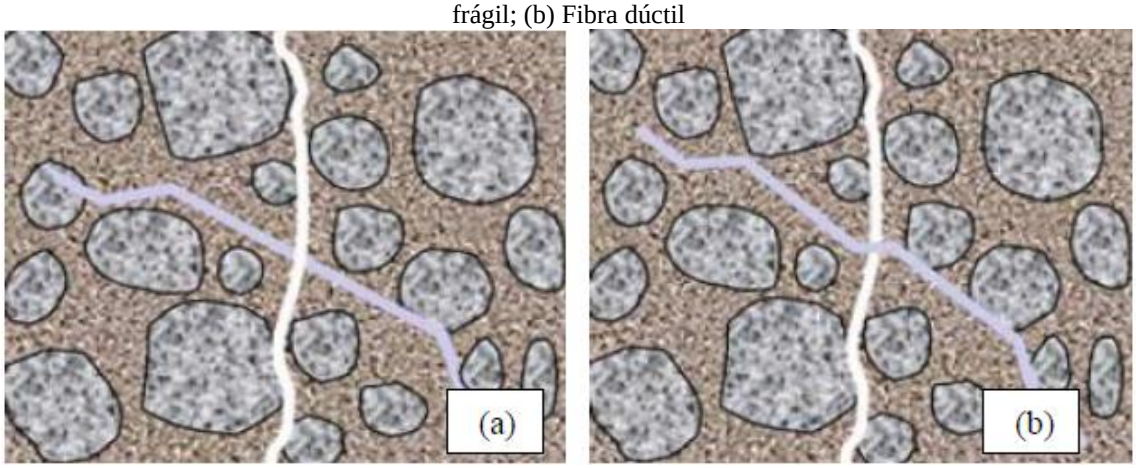
O interesse na adição de fibras de aço ao concreto tornou-se evidente, devido aos casos de solicitações por fadiga e impacto, quando se deseja maior durabilidade pela redução da fissuração e redução da armadura secundária como consequência da redistribuição de esforços (NUNES, 2005). Porém, como era previsto, no estado fresco, a adição de fibras aumenta consideravelmente a coesão do concreto devido ao contato entre si e com os outros componentes do concreto, aumentando em muito o atrito interno, restringindo a fluidez e a mobilidade da mistura.

No CRFA, a matriz em conjunto com as fibras opõe-se as forças de tração, forças estas transmitidas pela ancoragem mecânica da fibra na matriz e, pela adesão físico-química entre os materiais do compósito cimentício. Estas forças são influenciadas pelas características das fibras (teor, módulo de elasticidade, resistência, orientação e geometria), pelas características da matriz (composição, condição de fissuração, propriedades físicas e mecânicas), além das características da interface fibra-matriz (MILLER, 2008).

Quando adicionadas ao concreto, as fibras têm a função de promover, após a fissuração, aumento na resistência do compósito (superior esta à resistência da matriz), garantir um meio de transferência de tensões juntamente com a transferência de cargas ao

longo das fissuras e, principalmente, aumentar a tenacidade do compósito garantindo a este um mecanismo de absorção de energia, relacionada com o processo de deslocamento e arrancamento das fibras distribuídas ao longo da fissura. Conforme se pode verificar na Figura 32 a seguir, após a tensão máxima atingida pelo compósito, o decréscimo de tensão é acompanhado por uma grande deformação e, a energia total absorvida por uma viga é de 10 a 40 vezes maior para o concreto com fibras do que para concreto sem fibra (ACI, 2002 *apud* BENTUR e MINDESS, 1990).

Figura 32 – Fibras de aço atuando como "ponte" de transferência de tensões no momento da fissura (a) Fibra frágil; (b) Fibra dúctil



Fonte: Figueiredo (2005)

2.4.4 Durabilidade do concreto reforçado com fibras de aço

O desempenho do CRFA dependerá de alguns fatores como: qualidade do concreto, quantidade e dimensões das fibras utilizadas e da interação fibra-matriz (proporcionada pelo efeito das ancoragens). Quantidade alta de fibras, comprimentos inadequados e má distribuição, podem propiciar ao concreto embolamentos de fibras, formando os chamados *ouriços*, que são bolas formadas por fibras aglomeradas que acarretam uma redução no teor de fibras distribuídas homogeneamente ao concreto e constituem um ponto fraco devido à alta porosidade, no local onde for se alojar (FIGUEIREDO, 2005).

Concretos contendo fibras de aço podem possuir excelente durabilidade, quando bem adensados e curados, enquanto as fibras permanecerem protegidas pela pasta. Nas condições ambientais onde ocorre a presença de íons cloreto, formação de ferrugem na superfície do concreto torna-se inevitável, ao passo que no interior da massa normalmente estas permanecem sem corrosão.

Destaca-se aqui o fato das fibras de aço não receberem nenhum tratamento especial para evitar a corrosão, portanto sua durabilidade está simplesmente relacionada ao seu confinamento no meio altamente alcalino (pH em torno de 12,5). A corrosão das fibras na superfície do concreto está associada à carbonatação do mesmo que se inicia na região mais próxima da atmosfera e força a redução do pH para 9 (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Bastos (1999) a corrosão das fibras de aço próximas à superfície não apresenta problemas à estrutura, visto que, não prejudica a integridade estrutural do concreto e não propicia o lascamento do concreto na superfície.

No entanto, deve-se ressaltar de que pelo fato das fibras restringirem a propagação das fissuras no concreto tem-se um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos com consequente aumento da durabilidade da estrutura (BASTOS, 1999).

Mesmo com o concreto fissurado a fibra apresenta uma capacidade resistente à corrosão, como apontou o estudo desenvolvido por Chavillard et al, (1989) *apud* Bastos (1999), que não observou sinais de corrosão e perda de seção transversal por este fenômeno quando a abertura de fissuras no pavimento não ultrapassou 0,2 mm.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

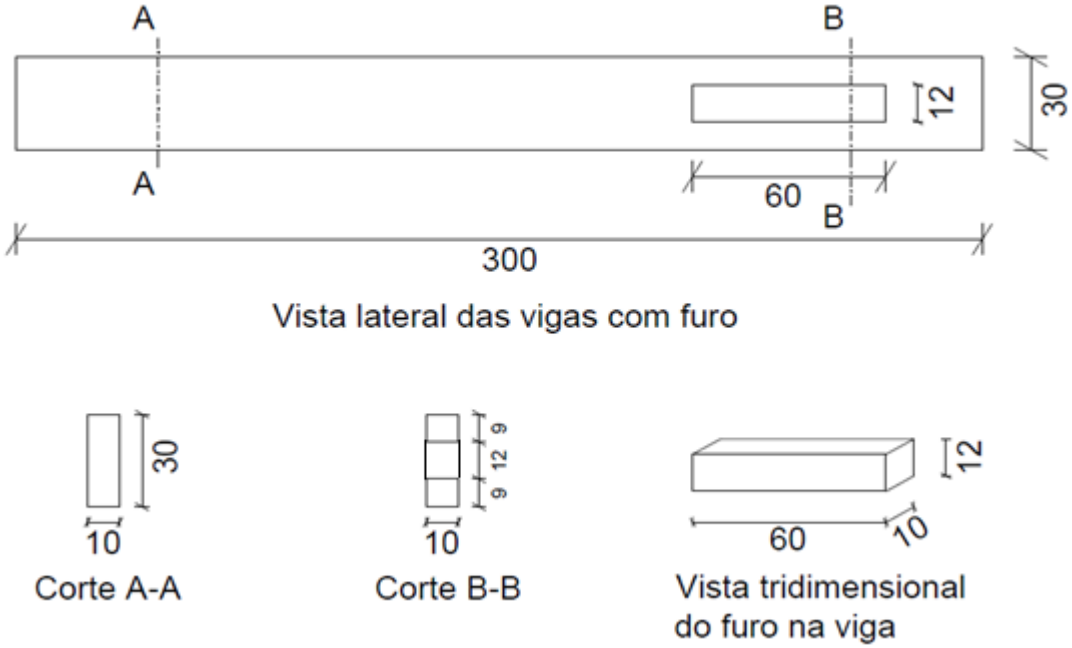
Para realização de um estudo comparativo foram moldadas três vigas, as quais foram ensaiadas a flexão e seus resultados analisados. Para fins de comparação também analisamos os resultados da viga de referência, VR e da viga VG2 do trabalho de Simão (2014), pois a viga de referência e a viga VG2 foram moldadas com as mesmas características geométricas, taxas de armadura longitudinal e transversal. A viga VG2 foi moldada com uma abertura na alma de dimensões e posição na viga iguais as das vigas estudadas neste trabalho, a principal diferença é que a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) recebeu um reforço em armadura de aço junto à abertura que foi calculado pelo método das bielas e dos tirantes.

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS

As vigas ensaiadas foram denominadas V1, V2 e V3, elas foram moldadas com adição de fibras de aço e uma abertura em sua alma a uma distância de 15 cm do apoio diferindo apenas o teor de fibras de aço que foi adicionado em cada uma delas. A viga VR foi confeccionada sem abertura na sua alma e sem adição de fibras e serviu como parâmetro para elaboração de um estudo comparativo. Foi também analisada a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) uma vez que ela foi moldada com as mesmas características geométricas das vigas ensaiadas neste trabalho, além de possuir uma abertura transversal de mesmas características geométricas e na mesma posição na alma com relação as vigas ensaiadas neste trabalho, porém sem adição de fibras de aço à massa do concreto e com um reforço em armadura de aço junto a abertura calculado pelo método das bielas e dos tirantes.

Todas as vigas foram confeccionadas com 300 cm de comprimento e a seção transversal de 10 x 30 cm (largura e altura). As dimensões das aberturas nas almas das vigas foram de 60 x 10 x 12 cm (comprimento, largura e altura), como é mostrado na Figura 33. Na Figura 34, é apresentada a viga 3 após a concretagem.

Figura 33 – Características geométricas das vigas com abertura



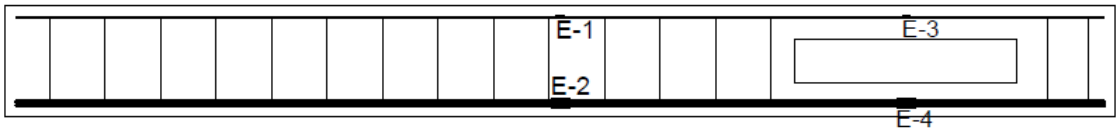
Fonte: Autor (2015)

Figura 34 - Imagem da viga 3 após a concretagem

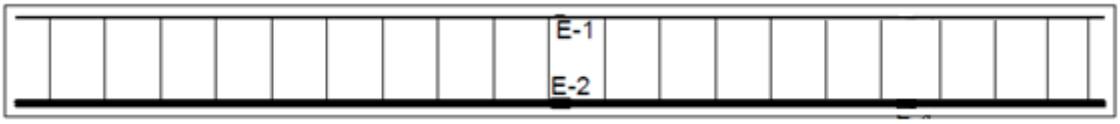
Fonte: Autor (2015)

Todas as vigas foram instrumentadas com um medidor de deslocamento tipo LVDT colocado no meio do vão, além de medidores de deformação (extensômetros elétricos) acoplados nas barras de aço na parte inferior e superior (porta estribos) dois na metade do comprimento das barras e mais dois na metade do comprimento do furo como é mostrado na Figura 35 (a), exceto a viga de referência que foi instrumentada apenas com dois extensômetros na metade do comprimento das barras superior e inferior (Figura 35 (b)), na Figura 36 é mostrado o detalhe dos extensômetros na ferragem.

Figura 35 – (a) Disposição dos extensômetros nas barras longitudinais das vigas com abertura e adição de fibras; (b) Disposição dos extensômetros nas barras longitudinais da viga de referência



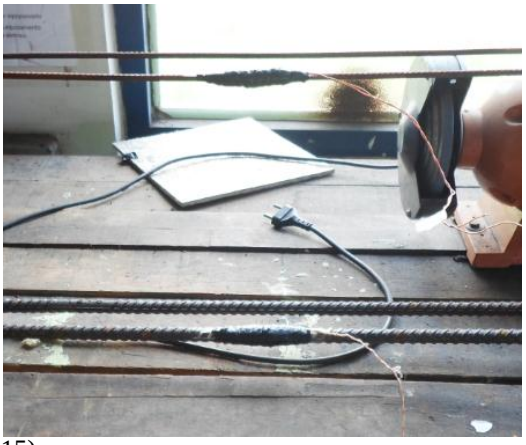
(a)



(b)

Fonte: Autor (2015)

Figura 36 – Detalhe dos extensômetros nas ferragens

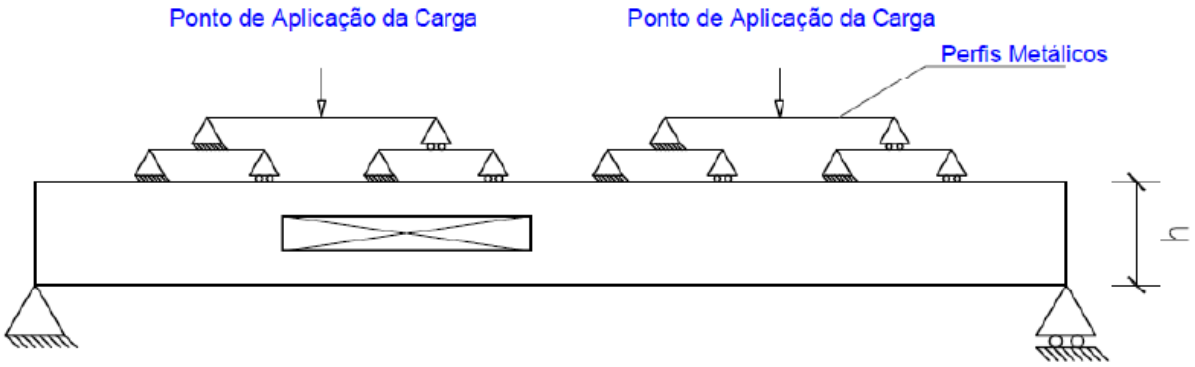


Fonte: Autor (2015)

O carregamento foi aplicado por meio de dois macacos hidráulicos e um sistema de bomba elétrica. A carga foi aplicada segundo o modelo mostrado na Figura 37 assim como foi feito no trabalho de Simão (2014) para tentar simular um carregamento distribuído e se aproximar das situações reais de carregamento em que as vigas são submetidas na maioria das

edificações. Na Figura 38 é mostrada uma das vigas pronta para o rompimento. Os dados dos instrumentos foram coletados por meio de um sistema de aquisição de dados.

Figura 37 – Detalhe do esquema de carregamento das vigas ensaiadas



Fonte: Simão (2014)

Figura 38 – Viga pronta para o rompimento

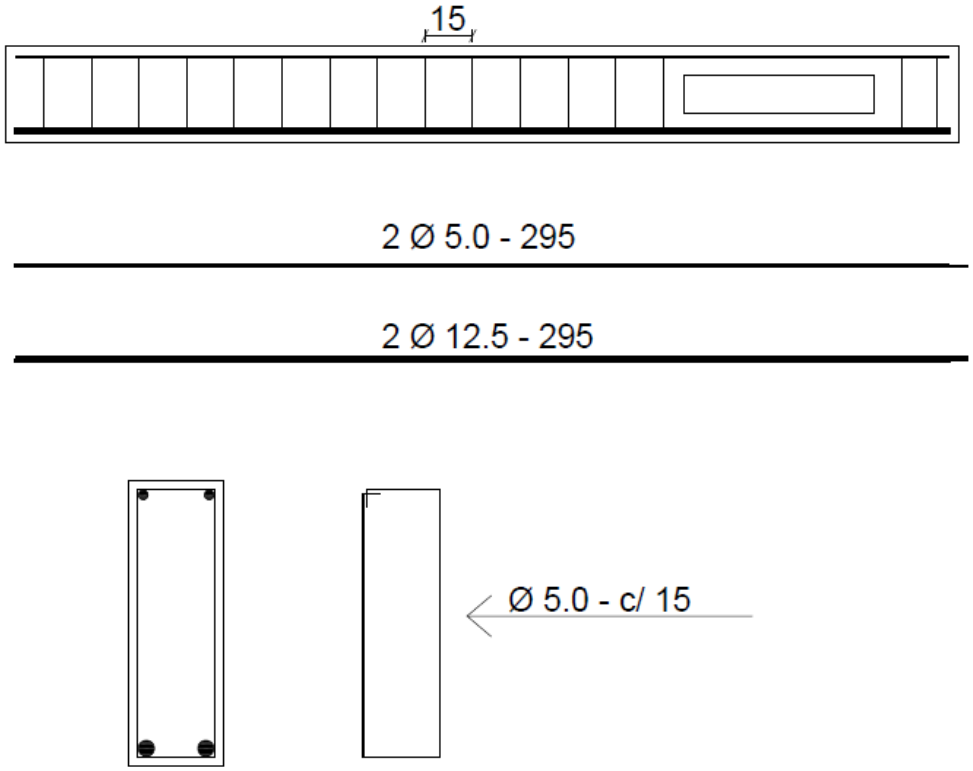
Fonte: Autor (2015)

3.2 ARMAÇÃO DAS VIGAS

A armadura de aço utilizada para armação das vigas consistiu em aço CA-50A com diâmetro de 12,5 mm e aço CA60A com diâmetro de 5,0 mm.

As vigas foram armadas da seguinte forma: armação longitudinal com 2 barras com $\emptyset = 12.5$ mm na parte inferior da viga, 2 barras com $\emptyset = 5.0$ mm na parte superior da viga (porta estribos), armação transversal com estribos de $\emptyset = 5.0$ mm a cada 15 cm como é mostrado na Figura 39. Na Figura 40 é mostrada a imagem da ferragem de uma das vigas.

Figura 39 – Detalhamento da Armação das vigas



Fonte: Autor (2015)

Figura 40 – Ferragem de uma das vigas

Fonte: Autor (2015)

3.3 CONCRETAGEM DAS VIGAS

3.3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na concretagem das vigas foram os seguintes:

- Cimento Portland: Nesse estudo foi utilizado para fabricação do concreto o cimento CPII-F 32, da marca Votorantim, com as características apresentadas na Tabela 2, dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2 – Características do cimento

Caracterização Física			Caracterização Química (%)		
Água para consistência Normal (%)		28,8	Composição potencial do Clínquer	C3S	*NI
Área específica Blaine (cm²/g)		3780		C2S	*NI
Massa específica (g/cm³)		3,1		C3A	*NI
Densidade aparente (g/cm³)		*NI		C4AF	*NI
Finura	Resíduo na peneira #200 (%)	2,6	Perda ao fogo		4,06
	Resíduo na peneira #325 (%)	11,3	Resíduo insolúvel		1,53
Tempo de pega	Início (min)	255	Al2O3		4,53
	Fim (min)	320	SiO2		18,52
Resistência a Compressão	3 dias (MPa)	26,4	Fe2O3		2,11
	7 dias (MPa)	31,9	CaO		60,95
	28 dias (MPa)	38	MgO		3,26
			SO3		3,34
			CaO livre		0,89

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante

- Agregado miúdo: Foi utilizada areia mineral quartzosa em seu estado natural com as características apresentadas na Tabela 3

Tabela 3 – Características do agregado miúdo

Dimensão máxima característica (mm)	2,36
Módulo de finura	2,15
Densidade aparente (g/cm³)	1,63
Massa específica (g/cm³)	2,56
Coeficiente de uniformidade	1,2

Fonte: Autor (2015)

- Agregado graúdo: Foi utilizada uma brita de natureza granítica em estado seco e sem lavagem. A Tabela 4 apresenta as características do agregado graúdo utilizado

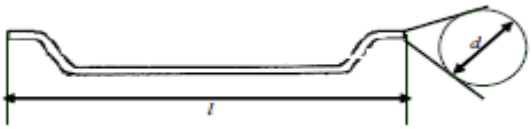
Tabela 4 – Características do agregado graúdo

Dimensão máxima característica (mm)	19
Módulo de finura	6,99
Densidade aparente (g/cm³)	1,24
Coeficiente de uniformidade	1,33

Fonte: Autor (2015)

- Fibra: A fibras utilizadas no estudo foram do tipo A, classe 1 (NBR 15530:2007) fornecidas pela empresa Macaferri do Brasil Ltda., referência: Wirand FF4. Na Tabela 6 são descritas as características da fibra utilizada a partir dos dados fornecidos pelo fabricante

Tabela 5 – Características da fibra utilizada de acordo com a NBR 15530:2007

Tipo	A	
Classe	I	
Geometria		
Dimensões	Comprimento (l) em mm	60
	Diâmetro (d) em mm	0,75
	Fator de forma (l/d)	80

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante

Figura 41 – Fibra de aço utilizada na confecção das vigas

Fonte: Autor (2015)

- Água: A água utilizada nesse estudo é proveniente da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa)

3.3.2 Características da dosagem

As vigas foram confeccionadas no traço 1:2, 25:3,50 com relação a/c de 0,50, diferindo apenas os teores de fibras utilizados em cada uma delas.

Figueiredo (1997) afirma que a utilização de concretos com reforços de fibras em pequeno volume (inferior a 1% em volume ou 80 kg/m3) tem pouca ou nenhuma influência nas propriedades da matriz de concreto sendo uma grande vantagem para utilização de baixos teores. Sendo assim as fibras iriam atuar exclusivamente como ponte de transferência de tensões, diminuindo a propagação das fissuras.

Os teores de fibra de aço adicionados à massa de concreto em reação ao volume do mesmo foram de 1% para a viga V1, 0,67% para a viga V2 e 0,33% para a viga V3, uma vez que o objetivo principal era avaliar as fibras como elementos que serviriam para diminuir a fissuração no local do furo contribuindo assim para o aumento de sua resistência sem influenciar nas propriedades da matriz. Na Figura 41 é mostrada a mistura da brita com a fibra na viga 2. Na Figura 42 é mostrado o teste de slump para o concreto da viga 2.

Figura 42 - Mistura da brita com as fibras para concretagem de uma viga

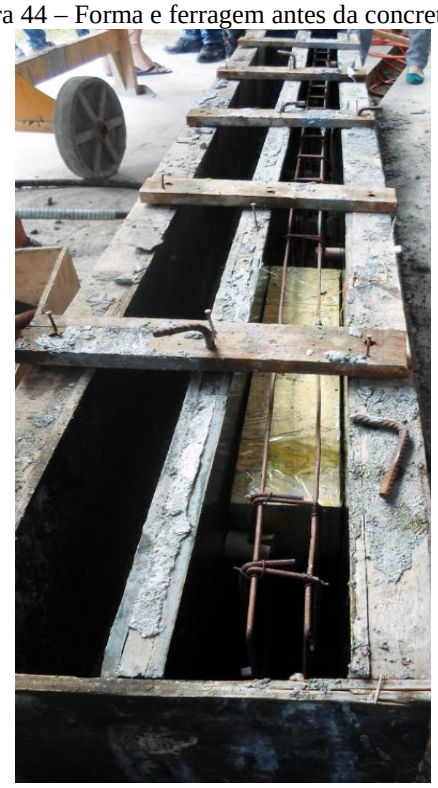
Fonte: Autor (2015)

Figura 43 – Teste de Slump da viga 2

Fonte: Autor (2015)

Na Figura 43, mostra-se a forma e ferragem antes da concretagem e na Figura 44 mostra-se a viga no momento da concretagem.

Figura 44 – Forma e ferragem antes da concretagem



Fonte: Autor (2015)

Figura 45 – Viga no momento da concretagem.

Fonte: Autor (2015)

Na tabela 6 são descritas as propriedades do concreto empregado em cada uma das vigas ensaiadas para este trabalho além das propriedades das vigas VR e VG2 do trabalho de Simão (2014).

Após a concretagem de cada uma das vigas V1, V2 e V3, foram moldados três corpos de prova e rompidos em compressão por meio de uma prensa hidráulica, os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades do concreto empregado em cada uma das vigas

Viga	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (L)	Fibras (KG)
VR	50	100	200	22	-
VG2	50	100	200	22	-
V1	50	112,5	175	25	11,5
V2	50	112,5	175	25	3,84
V3	50	112,5	175	25	7,7

Viga	Relação a/c	Slump (cm)	Abertura	f_{ck} (MPa)
VR	0,44	8,5	Não	31,53
VG2	0,44	8,2	Sim	40,07
V1	0,5	1,5	Sim	20,21
V2	0,5	6	Sim	21,45
V3	0,5	4	Sim	21,58

Fonte: Autor (2015)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPORTAMENTO GLOBAL

Após a desforma, as vigas V1, V2 e V3 ensaiadas para realização deste trabalho foram analisadas quanto a defeitos de concretagem, onde se concluiu que as vigas foram concretadas de modo satisfatório, sem apresentarem defeitos aparentes, mesmo para a viga de maior teor de fibras.

O sistema de aplicação de carga conseguiu aplicar cargas similares nos dois pontos, não diferindo mais que 5% entre eles. Os perfis metálicos utilizados para distribuição das cargas ao longo do comprimento da viga suportaram satisfatoriamente o carregamento aplicado. Todas as vigas romperam por cisalhamento nos cantos da abertura. Foram observadas algumas fissuras por tração no meio do vão da viga, porém a armadura colocada suportou bem a tensão. Verificou-se que alguns extensômetros foram danificados durante a concretagem das vigas e/ou durante os ensaios. A colocação do LVDT na viga V3 apresentou problema sendo assim não foi possível obter os resultados da flecha no meio do vão para este espécime. Por fim concluiu-se que a metodologia aplicada para os ensaios mostrou-se adequada no que diz respeito à condição de avaliar o comportamento estrutural dos elementos ensaiados. Na Figura 45 é mostrado o local e o modo de ruptura típico das vigas com abertura na alma e adição de fibras de aço que foram ensaiadas.

Figura 46 – Local e modo de ruptura típico das vigas com abertura na alma e adição de fibras que foram ensaiadas

Fonte: Autor (2015)

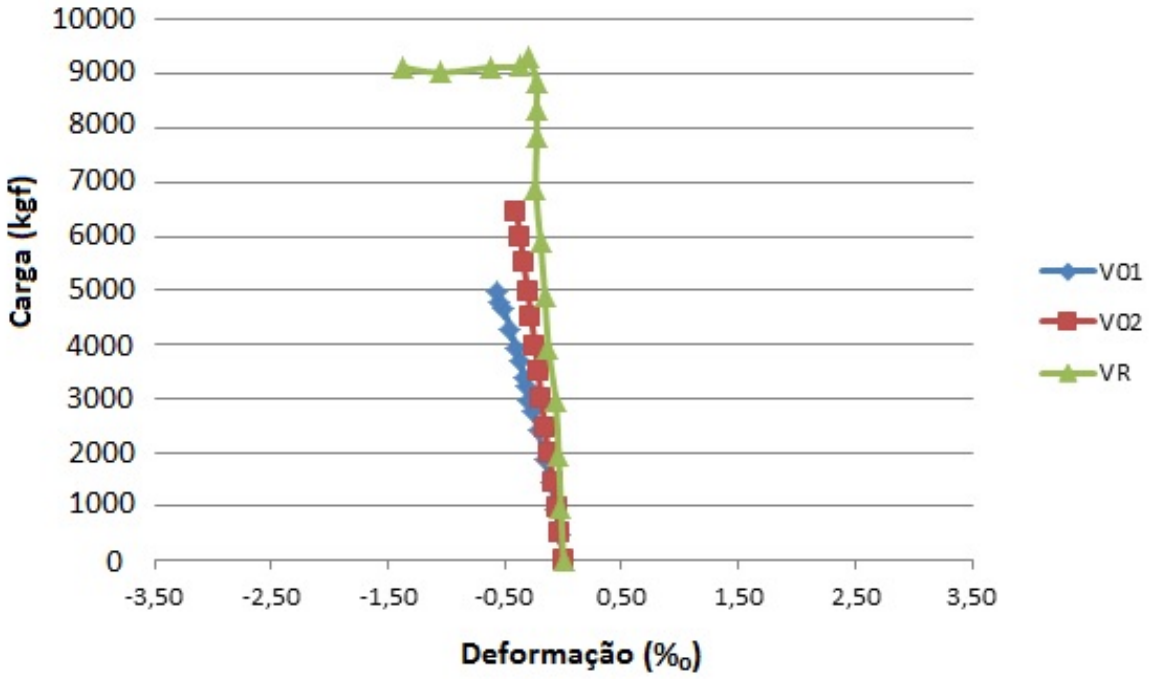
4.2 CARGAS E DEFORMAÇÕES

4.2.1 Deformação do concreto no meio do vão

Para o estudo comparativo da deformação no concreto foi analisado o extensômetro 1 da viga de referência VR do trabalho de Simão (2014) e o extensômetro 1 das vigas com furo V1, V2. O extensômetro 1 da viga V3 foi danificado no momento da concretagem e/ou no momento do ensaio.

Apesar da resistência do concreto das vigas do presente trabalho e das vigas de Simão serem em média um pouco diferentes (21,08 MPa e 31,53 MPa), fez-se a correção das deformações em função dos módulos de elasticidades dos concretos. Na Figura 46 é mostrado o gráfico da carga x deformação no concreto.

Figura 47 – Gráfico da Carga x Deformação do concreto no meio do vão



Fonte: Autor (2015)

Observa-se que as deformações das três vigas ensaiadas praticamente não diferem até o carregamento de 5000 kgf. Contudo, para o carregamento de ruptura a viga de referência apresenta claramente maiores deformações. Esse fato é explicado, uma vez que, a viga de referência rompeu no meio do vão por flexão; assim, elevando a deformação de compressão do concreto. Já as vigas V1 e V2 romperam por cisalhamento junto à abertura. Nesse último caso, as deformações do concreto junto ao banzo comprimido foram aliviadas e praticamente permaneceram elásticas lineares até o colapso das vigas. Na Figura 47, é apresentado o modo e local de colapso da viga de referência.

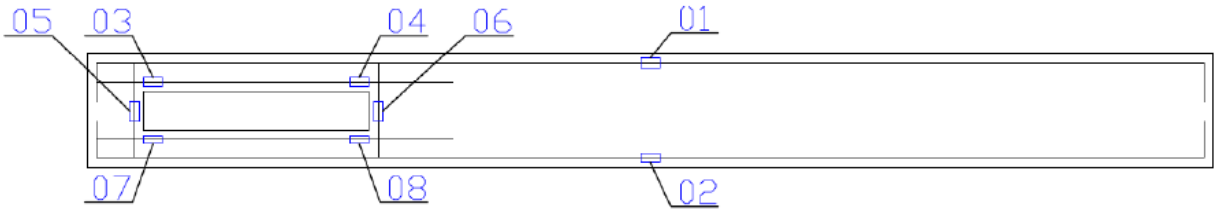
Figura 48 – Forma de ruptura da viga de referência

Fonte: Simão (2014)

4.2.2 Deformação do concreto no local da abertura

Para comparação da deformação do concreto no local da abertura foi analisada a viga VG2 do trabalho de Simão (2014), uma vez que esta viga foi concretada com uma abertura no mesmo local e de mesmas dimensões que as vigas concretadas nesta pesquisa, além disso, foi dimensionado um reforço em armadura de aço pelo método das bielas e tirantes que conseguiu resultados muito semelhantes ao comportamento da viga de referência. Foram comparados o extensômetro 3 das vigas V1, V2 e V3 com o extensômetro 4 da viga VG2 do trabalho de Simão (2014), uma vez que o extensômetro 3 da mesma foi danificado durante a concretagem e/ou durante os ensaios, na Figura 48 é mostrado o posicionamento dos extensômetros na viga VG2 de Simão (2014).

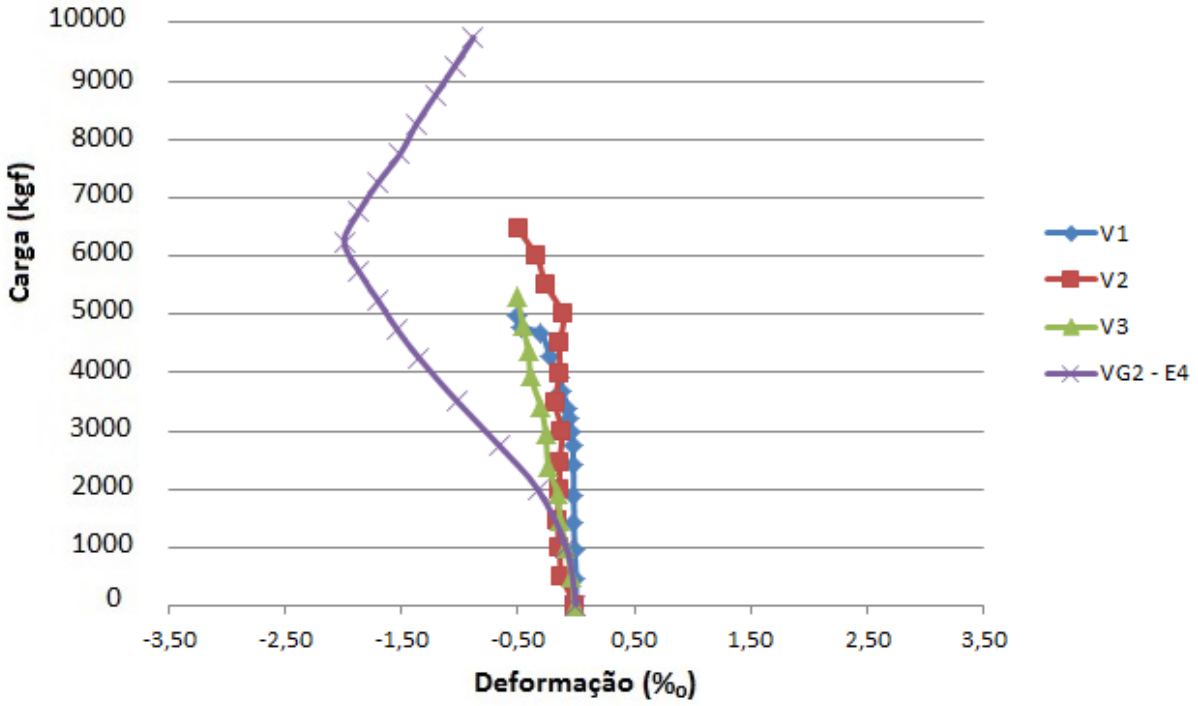
Figura 49 – Posicionamento dos extensômetro da viga VG2



Fonte: Simão (2014)

Apesar da resistência do concreto das vigas do presente trabalho e da viga VG2 de Simão (2014) serem em média um pouco diferentes (21,08 MPa e 40,07MPA), fez-se a correção das deformações em função dos módulos de elasticidades dos concretos. A Figura 49 mostra o gráfico carga x deformação no extensômetro 3 das vigas V1, V2, e V3 além do extensômetro 4 da viga VG2 do trabalho de Simão (2014).

Figura 50 – Carga x Deformação do concreto no local da abertura



Fonte: Autor (2015)

Quando comparados com a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) as deformações nas 3 vigas se mantiveram constantes e menores até o momento da ruptura das mesmas, fato que demonstra que as fibras conseguiram controlar satisfatoriamente o processo de fissuração.

Quanto ao suporte de carga era esperado que a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) tivesse valores maiores uma vez que na mesma foi dimensionado um reforço com armadura de aço pelo método das bielas e dos tirantes para que o comportamento estrutural fosse similar a de uma viga sem abertura na alma, e isso fica evidente uma vez que a viga rompeu no meio do vão por esmagamento do concreto. Na Figura 50 é mostrado o local e o modo da ruptura da viga VG2. Verifica-se um aumento significativo na rigidez das vigas com adição de fibras de aço quando comparado com a viga VG2 do trabalho de Simão (2014).

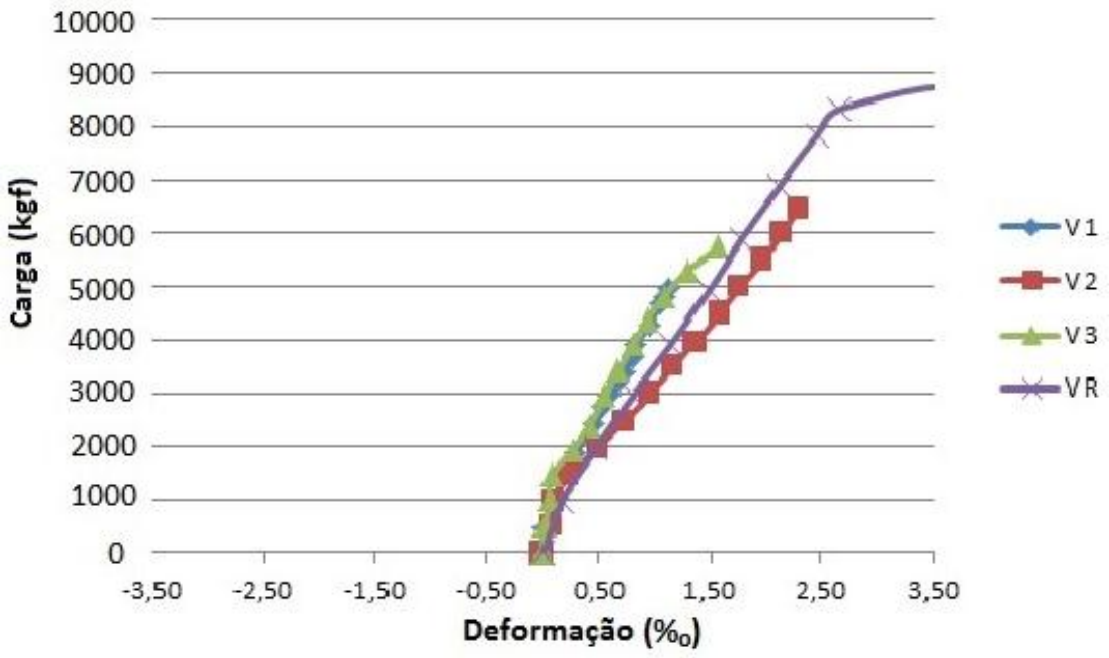
Figura 51 – Local e modo de ruptura da viga VG2

Fonte: Simão (2014)

4.2.3 Deformação do aço no meio do vão

Para o estudo comparativo da deformação do aço no meio do vão foram analisados o extensômetro 2 da viga de referência VR, e o extensômetro 2 das vigas com furo V1, V2 e V3. Na Figura 51 é mostrado o gráfico da carga X deformação no aço.

Figura 52 – Gráfico da carga X deformação do aço no meio do vão



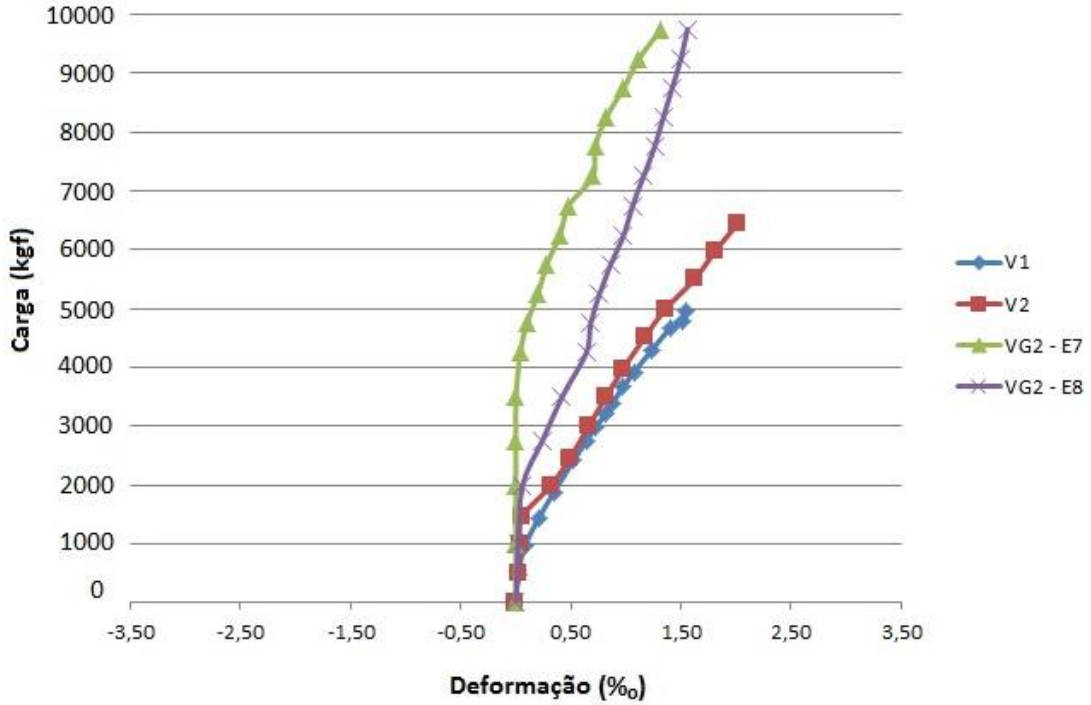
Fonte: Autor (2015)

Observa-se que tanto as viga V1 e V3 até a ruptura, apresentam deformação um pouco menor que a viga de referência e a viga V2 uma deformação um pouco maior, o que mostra que as fibras conseguiram controlar satisfatoriamente o processo de fissuração no local. Quanto à diferença de suporte de carga é explicado pela própria presença da abertura na alma das vigas que faz com que ocasione perda de resistência no elemento estrutural. Observa-se que a viga de referência rompeu por esmagamento do concreto no meio do vão, enquanto as vigas com abertura na alma e reforçada com fibras romperam por cisalhamento no local da abertura. Apesar do aumento do teor de fibra, observa-se uma discreta melhora na rigidez das vigas.

4.2.4 Deformação do aço no local da abertura

Para comparação da deformação do aço no local da abertura foi analisado a viga VG2 do trabalho de Simão (2014), uma vez que esta viga foi concretada com uma abertura no mesmo local e de mesmas dimensões que as vigas concretadas nesta pesquisa, além disso foi dimensionado um reforço em armadura de aço pelo método das bielas e tirantes que conseguiu resultados muito semelhantes ao comportamento da viga de referência. Foram comparados o extensômetro 4 das vigas V1, V2 e V3 com os extensômetros 7 e 8 da viga VG2 do trabalho de Simão (2014), na Figura 52 é mostrado o gráfico carga x deformação no extensômetro 4 das vigas V1, V2, e V3 além dos extensômetro 7 e 8 da viga VG2 do trabalho de Simão (2014).

Figura 53 – Carga x Deformação do aço no local da abertura



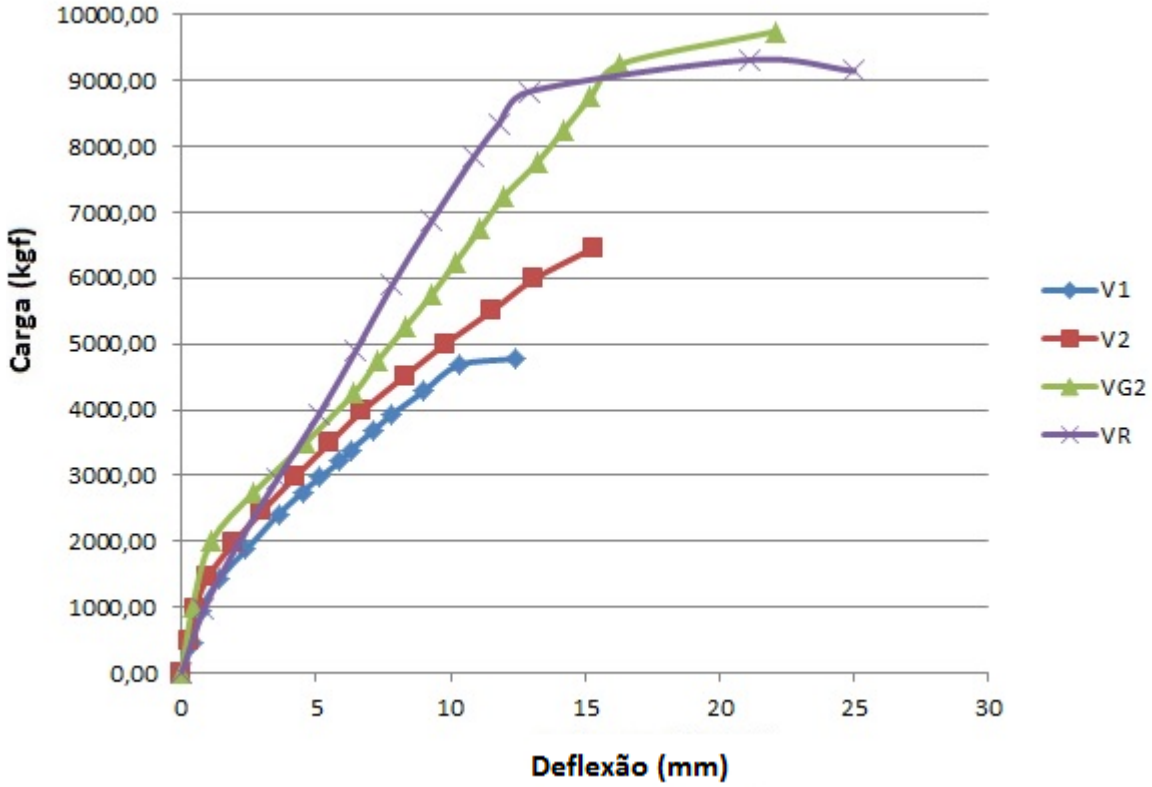
Fonte: Autor (2015)

Quando comparados com a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) Observa-se que o dimensionamento da armadura de reforço feito por Simão (2014) fez com que a deformação ocorrida no local para sua viga VG2 fosse menor que a deformação das vigas V1 e V2 comparadas no momento da ruptura. Quanto ao suporte de carga novamente era esperado que a viga VG2 do trabalho de Simão (2014) tivesse valores maiores uma vez que na mesma foi dimensionado um reforço com armadura de aço pelo método das bielas e dos tirantes para que o comportamento estrutural fosse similar a de uma viga sem abertura na alma, e isso fica evidente uma vez que a viga rompeu no meio do vão por esmagamento do concreto.

4.3 CARGAS E DEFLEXÕES

Para comparação da deflexão no meio do vão foram analisados os dados coletados pelo LVDT das vigas V1, V2 e da viga de referência do presente trabalho, além da viga VG2 do trabalho de Simão (2014). Na Figura 53 é mostrado o gráfico da carga x deflexão no meio do vão destas vigas.

Figura 54 – Gráfico da Carga x Deflexão, medidas no meio do vão



Fonte: Autor (2015)

Observa-se que as vigas V1 e V2, apresentam deflexão maiores que as vigas VR e VG2, até o carregamento de colapso. Esse fato é explicado pela menor rigidez dessas vigas e maiores deslocamentos junto as aberturas.

Quanto a carga de ruptura, observa-se que as vigas VR e VG2 alcançaram valores bem maiores, em média 40% maior, fato explicado pela presença da abertura nas vigas V1 e V2 o que diminui a rigidez da peça acarretando a redução dos valores de carga de ruptura, vale salientar que a viga VG2 apesar de também ter uma abertura na peça de dimensões iguais na peça, foi reforçada com armadura de aço para se aproximar do comportamento estrutural da viga de referência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram que as fibras conseguiram controlar o processo de fissuração levando até a uma melhora na rigidez das vigas com adição de fibras de aço à massa do concreto em certos locais analisados. Quando comparados com os resultados obtidos para a deformação do aço no meio do vão as vigas com fibra de aço chegaram a apresentar uma deformação 55% menor para o teor de 1% e 10% menor para o teor de 0,67% quando comparados com os resultados obtidos para o mesmo local na viga de referência. Quando comparados com os resultados obtidos para a deformação do concreto no local da abertura as vigas com fibra de aço chegaram a apresentar uma deformação superior a 200% menor comparados com os resultados obtidos para o mesmo local VG2 do trabalho de Simão (2014). Com relação às deformações do concreto no meio do vão os resultados mostraram deformações cerca de 200% maiores nas vigas com adição de fibras de aço quando comparada com os resultados apresentadas pela viga de referência. A maior diferença ocorreu para as deformações do aço no local da abertura onde as vigas com adição de fibras de aço apresentaram deformações cerca de 900% maiores quando comparadas com as deformações apresentadas pela viga VG2 do trabalho de Simão (2014). Com relação à deflexão no meio do vão até a carga de ruptura das vigas com adição de fibras, os resultados mostraram um deslocamento cerca de 90% maior das vigas com adição de fibras de aço à massa do concreto quando comparados os resultados obtidos na viga de referência e na viga VG2 do trabalho de Simão (2014), mesmo assim as fibras também tiveram resultados satisfatórios quanto ao controle da deflexão no meio do vão considerando a perda de rigidez ocasionada pela presença da abertura e os maiores deslocamentos junto a abertura.

O problema maior da utilização da fibra de aço adicionada à massa do concreto como reforço parcial em vigas com uma abertura transversal em sua alma é que as fibras sozinhas não conseguiram manter a mesma capacidade de carga da viga de referência. Os resultados mostram que a carga de ruptura das vigas com adição de fibras de aço chegou a ser 46% menor quando comparado com a carga de ruptura da viga de referência.

Desse modo, sugere-se a utilização da técnica da adição de fibras de aço à massa do concreto em conjunto com um reforço junto ao local da abertura calculado pelo método das bielas e dos tirantes para que seja garantida a manutenção da capacidade de carga do elemento estrutural.

Deve-se salientar também a importância de que seja prevista antes da concretagem da viga a necessidade de se passar uma tubulação em sua alma, para que possa ser aplicado o reforço necessário visando à manutenção das características resistentes do elemento estrutural.

5.1 FUTURAS PESQUISAS

Como observado neste trabalho à adição de fibras de aço por si só não garante o reforço necessário a uma viga que recebe uma abertura ou um furo em sua alma, assim esta técnica deve ser utilizada em conjunto com o reforço calculado pelo método das bielas e dos tirantes, sendo interessante uma análise comparativa no que diz respeito a suporte de cargas e rigidez entre vigas com abertura ou furo em sua alma, com reforço de aço calculado através do método das bielas e dos tirantes, com adição de fibras de aço em diferentes teores e sem adição de fibras de aço.

.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto (Especificação)**. Rio de janeiro, novembro de 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de janeiro, Abril de 2014.

AGUSTINHO, Sérgio Ricardo. **Análise da influência de furos horizontais em vigas de concreto armado.** 131 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma. 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete**. ACI Committee 318. Detroit, USA, 1988.

_____. **Manual of concrete practice: Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete.** ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993.

_____. **Manual of concrete practice: part 5. Guide for the evaluation of shotcrete.** (ACI 506.4R-94). ACI Committee 506. American Concrete Institute. Detroit, USA, 1994.

_____. 544.1R: **Manual of concrete practice: State_of_the_Art report on fiber reinforced concrete.** ACI Committee 544. (Reapproved 2002). 1996.

ARMELIN, H.S. **Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM**. 145f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.

ÁVILA, Vinícius Martins. **Compatibilização de projetos na construção civil, Estudo de caso em um edifício residencial multifamiliar.** 86f. Monografia de especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. 2011 .

BASTOS, P. S. dos S. **Análise experimental de dormente de concreto protendido reforçado com fibras de aço.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. São Paulo, 1999.

_____. **Concreto com Fibras de Aço**, Tese (doutorado), Capítulo 4, São Paulo, 2000.

BALAGURU, Perumalsamy N; SHAH, Surenda P; **Fiber-Reinforced Cement Composites,** Mc Graw-Hill, 1992.

BENTUR, A; MINDESS, S; **Fiber reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier Science Publishers LTD. 1990.

CAMPOS, Lucas. VARGAS, Alexandre. **Análise experimental de vigas em concreto armado com furo na alma próximo ao apoio utilizando armadura de reforço.** Artigo (graduação em engenharia civil). 15f. Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2013.

.

EVANGELISTA, L. M. R. (2003) **Concreto reforçado com fibras de aço: aplicação em pavimentos industriais**. Construlink Press. No. 11. Disponível em: http://www.construlink.com/Homepage/2003_ConstrulinkPress/Monografias.php. Acesso em: 19 de fevereiro de 2014.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R.; TORNERI, P. **Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço.** 39º REIBRAC. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 1997. 10p.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras de aço.** BT/PCC/206. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

_____. **Concreto com fibras.** Concreto – Ensino, Pesquisas e Realizações. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Anais. Cap. 39. Págs: 1195 – 1225. São Paulo, 2005.

_____. **Concreto Reforçado com Fibras.** 247 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. São Paulo. 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; NETO, P. J. C.; FARIA, H. M.; **Aço em Obras de Concreto. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço.** Revista Concreto e Construções. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Ano XXXVI. Nº 50. Págs: 67 – 75. Abr, mai, jun, 2008.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de armar estruturas de concreto.** Pini Ltda. São Paulo. 1995.

GARCEZ, E. O. **Análise teórica experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço quando submetido a carga de impacto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2005.

HOLSCHEMACHER, K.; KLOTZ, S.; WEIßE, D. **Application of steel fibre reinforced concrete for timber-concrete composite constructions**. LACER, nº 7. 2002.

LEONHARDT, Fritz ; MÖNNIG, Eduard. **Construções de Concreto**. v. 3. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1978.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto.** 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MANSUR, M. A.; TAN, Kiang H. **Concrete beams with openings.** CRC Press. 1999.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo. PINI, 1994.

MILLER, K. P.; **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2008.

MIGLIORINI, Alessandra Vieira. **Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para a possível utilização em carapaças de molhes.** 200 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio grande. Rio Grande. 2011.

MINDESS, S. **Fibre reinforced concrete: challenges and prospects.** In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada, 1995.

CASTRO, N. S. **Influência do agregado graúdo na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 74p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2010.

NUNES, N.L. **Potencialidade para a aplicação do concreto reforçado com fibra de aço em estruturas metroviárias.** Disponível http://ww.ipep.edu.br/portal/publicações/revista/ revista2005. Acesso em 03/01/14.

OLIVEIRA, S. L. de; **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

ORGASS, M.; KLUG, Y. **Steel fibre reinforced ultra-high strength concretes**. LACER, nº 9. 12 f. 2004.

PRUDENCIO JR., L.; AUSTIN, S.; JONES, P.; ARMELIN, H.; ROBINS, P. **Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexure from an inferred fibre pull-out response.** Materials and Structures. Vol 39. 2006.

SANTOS, Daniel dos. GIONGO, José Samuel. **Análise de Vigas de Concreto Armado utilizando modelos de Bielas e Tirantes.** Cadernos de Engenharia de Estruturas. São Carlos. v. 10. n. 46. p. 61-90. 2008.

SARZALEJO, A.G.; ROSSI, B.; PERRI, G. et al. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto** – Manual Técnico. Jundiaí, MACCAFERRI, 2007.

SILVA, Ricardo José Carvalho. MOREIRA, José Fabiano Araújo. VALE, Rodrigo Farias do. **Análise do modelo de bielas e tirantes para vigas de concreto armado com furo.** Revista Essentia, Sobral, vol. 15, n° 2, p. 67-87, dez. 2013/maio 2014.

SIMÃO, David Williams da Glória. **Análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas na alma.** 80f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2014.

SOUZA, Francisco Jesus de. **Compatibilização de projetos em edifícios de múltiplos andares - estudo de caso.** 117 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco. Recife. 2010

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto.** Vol. 2. Rio de Janeiro. Editora Globo, 1984.

THOMAZ, E.C.S. CRF – **Concreto reforçado com fibras – mito e realidade.** Notas de aula. Instituto Militar de Engenharia, 2006.
WATANABE, P. S.; **Concretos Especiais – Propriedades, materiais e aplicações.** Universidade Estadual Paulista – UNESP. Relatório final de pesquisa (FAPESP). São Paulo, fevereiro de 2008.

WEILER, B.; GROSSE, C. **Pullout behaviour of fibers in steel fiber reinforced concrete.** Annual Journal on Research and Testing Materials. Vol. 7. p. 116-127. Otto - Graf - Institut (FMPA). Stuttgart University. 1996.