

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

MARINA MACHADO LEAL DOS SANTOS

PILARES DE AÇO FORMADOS A FRIO COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO
- ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA

Recife

2018

MARINA MACHADO LEAL DOS SANTOS

**PILARES DE AÇO FORMADOS A FRIO COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO
- ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA**

Dissertação apresentada ao programa de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

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

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S237p

Santos, Marina Machado Leal dos.

Pilares de aço formados a frio com revestimento contra fogo - análise experimental e numérica / Marina Machado Leal dos Santos. – 2018.
81 folhas, il., gráfs., tabs.

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Pilares de aço formado a frio. 3. Revestimento contra fogo. 4. Situação de incêndio. 5. Modelo numérico em elementos finitos. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de. (Orientador).
II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-100



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**PILARES DE AÇO FORMADOS A FRIO COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO -
ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA**

Defendida por:

Marina Machado Leal dos Santos

Considera a candidata APROVADA

Recife, 8 de fevereiro de 2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira – UFOP
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Liliane de Allan Fonseca – UFPE
(examinadora externa)

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Ciência Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte financeiro cedido pelo processo de número IBPG-0702-3.01/15;

Ao programa de pós graduação em engenharia civil (PPGEC);

Aos professores do programa de pós-graduação, em especial a Tiago Ancelmo e José Jéferson;

Aos meus amigos que me acompanharam durante os dois anos de mestrado, Paulo Sousa, Roberta Tabaczinski e Iago Borges;

Aos Técnicos do laboratório pela ajuda com os ensaios;

À empresa Lajeiro gesso, em especial a Cleandro Alencar pelo auxílio prestado e fornecimento do material de proteção;

À Empresa Rontec, pela manutenção do equipamento hidráulico;

À equipe Mangue Baja pela ajuda com a preparação dos pilares;

A minha família e ao meu noivo Diego pelo suporte nas horas mais difíceis.

RESUMO

Com o *software* Abaqus fez-se a calibração de um modelo numérico utilizando-se parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 14323 (2013) para simular o comportamento de um pilar em situação de incêndio, testes com elementos finitos do tipo casca e do tipo sólido, além da variação do tamanho dos elementos utilizados. As temperaturas e os deslocamentos da estrutura são comparados com resultados experimentais a fim de validar o modelo. Segundo revisão de literatura, estruturas de aço geralmente apresentam um tempo de resistência ao fogo inferior ao tempo mínimo requerido para dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, que é de 30 minutos (ABNT NBR 14432, 2000), necessitando, portanto, de revestimento contra fogo. Entretanto, esta é uma área de estudo que ainda apresenta muitas lacunas em âmbito mundial (SILVA *et al.*, 2017). Neste trabalho foi realizado um estudo experimental de pilares revestidos por placas de gesso em situação de incêndio, pois, quando se trata de proteger os elementos estruturais com material de revestimento, é notório o ganho no tempo de resistência ao fogo. O modelo numérico desenvolvido, foi utilizado para simular o comportamento do pilar revestido em situação de incêndio e foi feita uma comparação com os resultados experimentais deste trabalho, a fim de verificar o ganho de resistência ao fogo quando comparado à situação sem revestimento. Devido ao pilar estar afastado de 3,0 cm da placa de gesso, são feitas hipóteses no modelo numérico para a transferência de calor no espaço entre a proteção de placas de gesso e o perfil de aço; os resultados foram satisfatórios pois o modelo em elementos finitos se aproximou bastante do resultado experimental. Faz-se ainda a comparação entre o modelo numérico, com revestimento de placas de gesso e de argamassa, com o método simplificado, para estruturas de aço em situação de incêndio, da ABNT NBR 14323 (2013) e do EN 1993-1-2 (2005). Observou-se que o modelo numérico apresentou desenvolvimento de temperaturas bastante similares às estabelecidas pelas normas, e as normas se mostraram a favor da segurança quando comparados os tempos de falha do perfil. Destaca-se que a diferença entre o método numérico e o método simplificado é mais acentuada para as maiores espessuras de proteção testadas deste trabalho.

Palavras-chave: Pilares de aço formado a frio. Revestimento contra fogo. Situação de incêndio. Modelo numérico em elementos finitos.

ABSTRACT

Using Abaqus software, the calibration of a numerical model was carried out using parameters of Brazilian standard ABNT NBR 14323 (2013) in order to simulate a column in fire situation, tests were performed with finite elements type shell and type solid, besides the variation of the size of the elements. The temperatures and the displacements of the structure were compared with experimental results in order to validate the model. According to literature review, steel structures usually presents a fire resistance time less than the minimum time required for a structure in fire situation, which is 30 minutes (ABNT NBR 14432, 2000), thus requiring fireproofing. However, this is an area of study that still has many gaps worldwide (SILVA et al., 2017). In this work an experimental study of gypsum boards as fire coating material was performed, because when it comes to protecting the structural elements, the gain in fire resistance time is notorious. The numerical model developed was used to simulate the behavior of the coated column and a comparison was made with the experimental results of this work in order to verify the fire resistance gain when compared to the uncoated situation. Because the column is 3.0 cm away from the gypsum board, hypotheses are made in the numerical model for the heat transfer in the space between the gypsum board protection and the steel profile; the results were satisfactory because the finite element model was very close to the experimental result. It is also possible to compare the numerical model, using plasterboard and mortar coating, with the simplified method for steel structures in fire situation of ABNT NBR 14323 (2013) and EN 1993-1-2 (2005). It was observed that the numerical model development of temperatures was similar to those standardized, being the standards more conservators when comparing the failure times of the profile. It should be noted that the difference between the numerical method and the simplified method is higher for the greater thicknesses tested in this work.

Keywords: Cold formed steel columns. Fireproofing. Fire situation. Numerical model in finite elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Número de ocorrências de incêndio estruturais no Brasil (exceto residências) noticiados na internet em 2012 e 2015.	16
Figura 1.2 - Aumento na produção de aço no Brasil.	16
Figura 2.1 - Seção transversal dos perfis ensaiados.	21
Figura 2.2 - Esquema do ensaio realizado por Costa.	22
Figura 2.3 - Pórticos 2D e 3D.....	23
Figura 2.4 - Espécimes testadas por Feng, Wang e Davies (2003.c)	26
Figura 2.5 - Resultados obtidos por Feng, Wang e Davies (2003.c) para um modelo com isolamento térmico	28
Figura 2.6 - Resultados obtidos por Feng, Wang e Davies (2003.c) para um modelo sem isolamento térmico.	28
Figura 2.7 - Distribuição de temperatura no perfil pelo MEF e simplificações	31
Figura 2.8 - Comparativo entre custos unitários de materiais de revestimento contra fogo	34
Figura 2.9 - Custos obtidos pela análise Pareto frontier para diferentes tipos de proteção.....	35
Figura 3.1 - Seções transversais com proteção de gesso	37
Figura 3.2 - Aparelhos utilizados nos ensaios	39
Figura 3.3 - Conjunto pilar-revestimento de gesso.....	41
Figura 3.4 - Esquema representativo da instrumentação do ensaio.....	41
Figura 3.5 - Posicionamento dos LVDT's e seção transversal do ensaio.....	42
Figura 3.6 - Posicionamento dos termopares para o ensaio	42
Figura 3.7 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento utilizados no ensaio (LVDT's)	43
Figura 3.8 - Temperaturas da Curva ISO vs temperaturas desenvolvidas no forno	45
Figura 3.9 - Temperaturas desenvolvidas no Ensaio 01	47
Figura 3.10 - Temperaturas desenvolvidas no Ensaio 03.....	47
Figura 3.11 - Deslocamentos axiais do centro do Pilar	48
Figura 3.12 - Forças de restrição desenvolvidas durante o Ensaio 01.....	49
Figura 3.13 - Constante de rigidez axial observada no Ensaio 01.....	49
Figura 3.14 - Pilar na configuração deformada após o Ensaio 01	50
Figura 4.1 - Análise da convergência de malha na simulação térmica.....	52
Figura 4.2 - Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo sólido.....	53
Figura 4.3 - Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo casca.....	53
Figura 4.4 - Comparação elemento casca vs elemento sólido.....	55
Figura 4.5 - Resultados obtidos numericamente com os fatores de redução para flambagem local e global propostos pela ABNT NBR 14323:3013	56
Figura 4.6 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o pilar carregado com 220 kN	57

Figura 4.7 - Pilar na configuração deformada após experimento.....	58
Figura 4.8 - Pilar na configuração deformada após simulação numérica.....	58
Figura 5.1 - MODELO 01	60
Figura 5.2 - MODELO 02	60
Figura 5.3 - Comparação das temperaturas do centro do pilar nos modelos numéricos	61
Figura 5.4 - Comparação das temperaturas da face externa do gesso para o Ensaio 01	63
Figura 5.5 - Comparação das temperaturas da face externa do gesso para o Ensaio 03	64
Figura 5.6 - Comparação das temperaturas da face interna do gesso para o Ensaio 01	65
Figura 5.7 - Comparação das temperaturas da face interna do gesso para o Ensaio 03	65
Figura 5.8 - Comparação das temperaturas no centro do pilar de aço para o Ensaio 01	66
Figura 5.9 - Comparação das temperaturas do pilar de aço para o Ensaio 03	67
Figura 5.10 - Aplicação da restrição axial no modelo numérico.....	68
Figura 5.11 - Comparação entre forças de restrição desenvolvidas no modelo experimental e numérico	69
Figura 6.1 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 10 mm de espessura	71
Figura 6.2 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 30 mm de espessura	71
Figura 6.3 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 50 mm de espessura	71
Figura 6.4 – Temperaturas na sessão cetral do pilar de aço com revestimento de placas de gesso	72
Figura 6.5 - Temperaturas na seção cetral do pilares de aço com revestimento de argamassa.	72
Figura 6.6 - Deslocamento axial do modelo numérico para o pilar de aço com revestimento de placas de gesso	73
Figura 6.7 - Deslocamento axial do modelo numérico axial para o pilar de aço revestimento de argamassa.....	73
Figura 6.8 - Força resistente ($N_{fi,rd}$) determinada segundo o método simplificado para o pilar de aço com diferentes espessuras de revestimento de placas de Gesso.....	74
Figura 6.9 - Força resistente ($N_{fi,rd}$) determinada segundo o método simplificado para o pilar de aço com diferentes espessuras de revestimento de placas de Argamassa.....	74
Figura 6.10 - Modelo numérico no momento docolapso para perfil protegido por espessuras de 10 (a), 30 (b) e 50 (c) mm.....	75
Figura 6.11 - Falha dos pilares de aço com revestimento, método simplificado vs modelo numérico	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Amostras utilizadas por Costa (2013).	22
Tabela 2.2 - Propriedade dos materiais utilizados por Feng, Wang e Davies (2003.c).....	27
Tabela 2.3 - Comparação da carga crítica de flambagem pelo MRD e MEF.....	32
Tabela 2.4 - Materiais de proteção utilizados por Piquet & Figuerido (2016).....	34
Tabela 2.5 - Quantidade de seções estudadas.....	35
Tabela 2.6 - Propriedades dos materiais de proteção passiva.....	36
Tabela 3.1 - Programa experimental	38
Tabela 3.2 - Numeração dos aparelhos utilizados nos ensaios na Figura 3.2.....	39
Tabela 3.3 - Resumo da instrumentação utilizada nos ensaios.....	43
Tabela 3.4 - Programação do forno	44
Tabela 3.5 - Diferença percentual entre as áreas abaixo das curvas no Ensaio 01.....	45
Tabela 3.6 - Diferença percentual entre as áreas abaixo das curvas no Ensaio 03.....	46
Tabela 4.1 - Parâmetros do modelo térmico.....	52
Tabela 4.2 - Dados numéricos dos modelos testados	54
Tabela 5.1 - Propriedades do gesso utilizadas nos modelos numéricos	62
Tabela 6.1 - Propriedades térmicas dos materiais de proteção passiva.....	70
Tabela 6.2 - Resistências ao fogo dos pilares de aço com revestimento contra fogo.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

AFF	Aço Formado a Frio
CA	Calibração com base nos estudos de Wakali & Hugi (2009)
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
EC3	EN 1993-1-2 (2005)
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco
FE	Resultados obtidos com propriedades segundo Feng, Wang e Davies (2003.c)
GE	Resultados obtidos com propriedades segundo Gerkeen (2007)
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
NBR	Norma Brasileira
LPS	British Loss Prevention Standard
NUM	Resultado Numérico
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLF	Método das Larguras Efetivas
MRD	Método da Resistência Direta
RF	Resistência ao fogo
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao fogo
UL	Underwriters Laboratories
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de radiação;
A_i	Área da face i;
F_{ij}	Matriz de fator de visualização geométrica;
ρ_p	Densidade do material;
q	Fluxo de calor por unidade de área em W/m^2 ;
t	Tempo;
dp	Espessura do material de revestimento;
de	Cálculo dos erros percentuais entre as áreas abaixo das curvas me função do tempo;
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção;
ϕ_r	Fator de configuração da radiação;
ε_i	Emissividades nas faces i;
ε_j	Emissividades nas faces j;
ε_m	Emissividade do aço;
ε_f	Emissividade do fogo;
$k_{\gamma,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada para perfis não sujeitos à flambagem local;
$k_{\sigma,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada para perfis sujeitos à flambagem local;
$k_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço em temperatura elevada;
$f_{y,\theta}$	Tensão de escoamento dos aços laminados a uma determinada temperatura θ_a ;
ξ	Emissividade resultante entre a superfície e o ambiente, tomada como 0 para a face não exposta ao incêndio e 0.8 para a face exposta.;
σ	Constante de Stephan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$;
θ^0	Temperatura de aquecimento dos gases, adotada como a curva ISO 834;
θ^Z	Temperatura no Zero na escala absoluta;
λ_p	Condutividade térmica do material;
C_p	Calor específico do material;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivos gerais.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.2.3	Estrutura do trabalho.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ESTADO DA ARTE DE PILARES DE AÇO FORMADAS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	19
2.2	ESTADO DA ARTE DE ESTRUTURAS DE AÇO COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO	26
2.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO	33
2.4	CUSTO DOS MATERIAIS DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO	34
2.5	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	36
3	ESTUDO EXPERIMENTAL DO PILAR REVESTIDO	37
3.1	INTRODUÇÃO	37
3.2	ENSAIOS REALIZADOS	38
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.4	INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....	41
3.5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	44
3.5.1	Evolução de temperaturas	44
3.5.2	Deslocamento axial	48
3.5.3	Forças de restrição.....	48
3.5.4	Tempo de falha.....	50
3.5.5	Modo de flambagem	50
4	CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO SEM REVESTIMENTO CONTRA FOGO.....	51
4.1	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA	52
4.2	ELEMENTO CASCA VS ELEMENTO SÓLIDO	55
4.3	VERIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE REDUÇÃO PROPOSTOS PELA NORMA BRASILEIRA	55
4.4	CASO COM CARREGAMENTO DE 80% DA CAPACIDADE RESISTENTE..	57
4.5	MODO DE FLAMBAGEM	58
5	ESTUDO NUMÉRICO DOS PILARES COM REVESTIMENTO TÉRMICO	59
5.1	ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	59
5.2	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS.....	62

5.3	RESULTADOS TÉRMICOS	63
5.3.1	Face externa do gesso	63
5.3.2	Face interna do gesso	64
5.3.3	Pilar de aço	66
5.4	RESULTADOS MECÂNICOS	68
6	VALIDAÇÃO DE MÉTODO NUMÉRICO POR COMPARAÇÃO COM MÉTODOS ANALÍTICOS.....	70
6.1	ANÁLISE TÉRMICA	70
6.2	COMPARAÇÃO MECÂNICA	73
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A segurança contra incêndio no Brasil vem se desenvolvendo ao longo das últimas décadas. Os primeiros passos foram dados na década de 70 por advento da ocorrência de dois incêndios de grande magnitude nos edifícios Joelma e Andraus, na cidade São Paulo. A partir de então vários estudos foram desenvolvidos no país. Recentemente, no ano de 2012, foi deflagrado na boate Kiss em Santa-Maria um incêndio que provocou a morte de 242 pessoas.

Tais eventos foram marcos na história da segurança contra o incêndio no Brasil. Entretanto incêndios não são fatos isolados, são eventos que acontecem com uma frequência cada vez mais alta. A tragédia da boate Kiss desencadeou a formação de uma Frente Parlamentar Mista de segurança contra o incêndio, oficialmente lançada em outubro de 2015. Essa Frente tem por objetivo a elaboração de políticas públicas que visem a redução de ocorrências bem como do número de vítimas, evitando assim perdas de patrimônio material e imaterial.

Em 30 de março de 2017 o presidente Michel Temer sancionou a Lei nº 13.425 (2017) que ficou conhecida como “Lei Kiss”, que estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndios e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público. Dentre as diretrizes trazidas nesta lei destaca-se:

- caracterização da prevenção de incêndios e desastres como condição para a execução de projetos artísticos, culturais, esportivos, científicos e outros que envolvam incentivos fiscais da União e atribui responsabilidades para os órgãos de fiscalização do exercício das profissões das áreas de engenharia e de arquitetura, no combate e prevenção de incêndios;
- obriga a inclusão de conteúdo relativo à prevenção e ao combate a incêndio e a desastres, nas disciplinas ministradas dos cursos de graduação em Engenharia e Arquitetura em funcionamento no País, em universidades e organizações de ensino públicas e privadas, bem como os cursos de tecnologia e de ensino médio correlatos;
- obriga a reunião das informações sobre incêndios ocorridos no País em áreas urbanas, em um sistema unificado de informações, com a participação da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, integrado ao sistema de informações e monitoramento de desastres.

No âmbito normativo destaca-se a ABNT NBR 15575-1 (2013) conhecida como norma de desempenho para edificações habitacionais. Ela traz um Capítulo que fala exclusivamente da

segurança contra incêndio, destacando este critério nas boas práticas da engenharia. Esta norma basicamente institui um nível mínimo de desempenho ao longo da vida útil da edificação para os principais elementos da mesma. No que diz respeito à segurança contra o incêndio a norma determina os seguintes requisitos:

- proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;
- dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;
- proporcionar meios de controle e extinção do incêndio;
- dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros;

Em relação à resistência ao fogo de elementos estruturais a referida norma exige:

- possibilitar a saída dos ocupantes da edificação em condições de segurança;
- garantir condições razoáveis para o emprego de socorro público, onde se permita o acesso operacional de viaturas, equipamentos e seus recursos humanos, com tempo hábil para exercer as atividades de salvamento (pessoas retidas) e combate a incêndio (extinção);
- evitar ou minimizar danos à própria edificação, às outras adjacentes, à infraestrutura pública e ao meio ambiente.

Para garantir a segurança da estrutura em situação de incêndio esta norma prevê que os métodos de avaliação contra incêndio devem atender à ABNT NBR 14323 (2013) para estruturas de aço, à ABNT NBR 15200 (2012) para estruturas de concreto e ao Eurocode correspondente para as demais estruturas.

A preocupação com incêndios vem ganhando espaço, pois está cada vez mais evidente que incêndios são eventos que ocorrem com uma frequência considerável. A universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por meio do grupo de pesquisa RISCTEC, em parceria com o Corpo de Bombeiros Militar do estado têm desempenhado um papel importante nos estudos brasileiros sobre a segurança contra incêndio. Este trabalho tem também como justificativa a continuidade dos estudos realizados pelo grupo de pesquisa da UFPE, como, por exemplo, as dissertações desenvolvidas por Costa (2013), Rocha (2015) e Abreu (2016).

Segundo o instituto Sprinkler (2017) do Brasil, no ano de 2012 foram noticiados na internet 198 ocorrências de incêndio somente no estado de São Paulo. Este número subiu para 238 no ano de 2015 conforme pode ser visto na Figura 1.1.

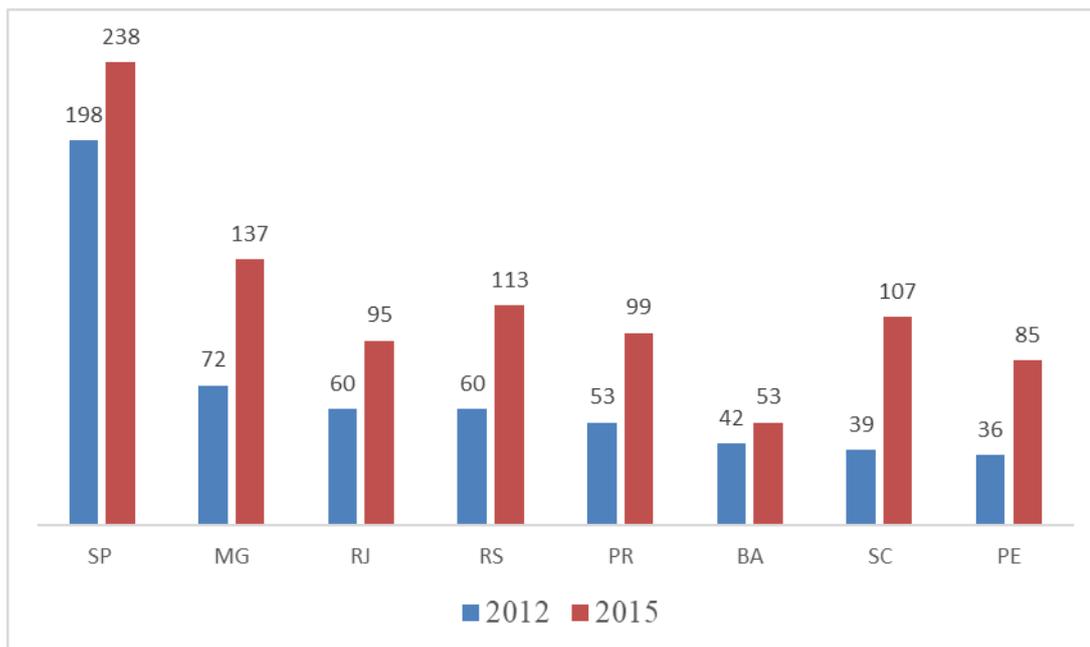


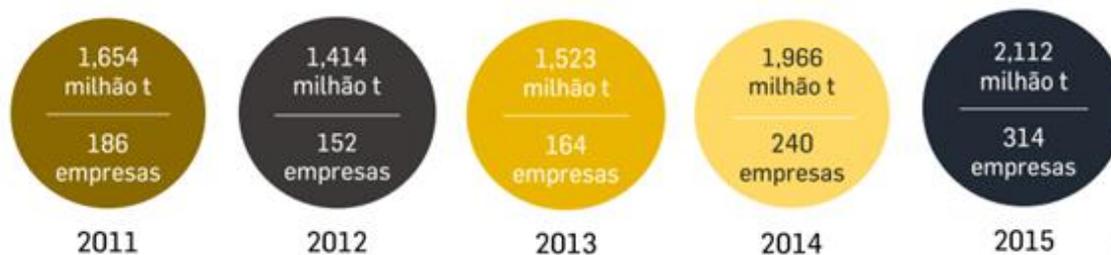
Figura 1.1 - Número de ocorrências de incêndio estruturais no Brasil (exceto residências) noticiados na internet em 2012 e 2015.

Fonte: Adaptado de Instituto Sprinkler (2017)

O foco principal da segurança contra incêndio é a preservação da vida, de forma a garantir que as pessoas consigam evacuar o local antes que o fogo adquira elevadas proporções. Isso é feito com a utilização de proteções ativas, como os chuveiros automáticos, layouts adequados, rotas de fuga, utilização de portas corta-fogo, entre outros. Após a evacuação do estabelecimento deve-se garantir a segurança estrutural do mesmo para que a edificação não colapse e não venha a causar maiores danos.

Um tipo de construção que vem ganhando crescente espaço no mercado brasileiro é o de estruturas metálicas, conforme pode ser visto no gráfico de capacidade produtiva das empresas desse segmento por um estudo feito pelo Centro Brasileiro em Construção em Aço (CBCA).

Figura 1.2 - Aumento na produção de aço no Brasil.



Fonte: CBCA (2015)

Na construção civil, estruturas de aço têm uma série de vantagens quando comparadas com estruturas convencionais de concreto. Dentre estas vantagens pode-se destacar: velocidade de execução, confiabilidade no material, menos desperdício em canteiro, menor geração de resíduos, entre outros. Uma grande desvantagem desse tipo de estrutura é a redução das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura, fato ainda mais agravado quando se trata de pilares, por serem estruturas de suporte que, se comprometidas, podem levar toda a edificação ao colapso. Estruturas de aço formadas a frio apresentam as vantagens das estruturas de aço, com uma maior relação entre área e capacidade resistente da peça estrutural. Por serem extremamente finas (geralmente inferiores à 3,0 mm), são ainda mais susceptíveis ao colapso quando submetidas à temperaturas elevadas.

Uma das soluções mais comuns para a situação de incêndio é a utilização de revestimento contra fogo. Entretanto, esta é uma área de estudo que ainda apresenta muitas lacunas em âmbito mundial (SILVA *et al.*, 2017). Tanto a norma europeia EN 1993-1-2 (2005) quanto a norma brasileira ABNT NBR 14323 (2013) que definem as orientações para o projeto de estruturas de aço em situação de incêndio na Europa e Brasil, respectivamente, não definem as características térmicas dos materiais de proteção. Elas recomendam normas de ensaio para obtenção destas características, dificultando assim a determinação das espessuras para projetos de estruturas de aço em situação de incêndio. Essas normas trazem apenas métodos simplificados que, baseados nas equações diferenciais de transferência de calor, preveem as temperaturas desenvolvidas no perfil revestido contra a ação do fogo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Pretende-se contribuir para o estudo da segurança contra incêndio do Brasil, especialmente na análise pilares de aço formados a frio com revestimento contra fogo.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando o correto dimensionamento de pilares com proteção passiva em situação de incêndio, este trabalho tem por objetivos:

- verificar a resistência ao fogo de pilares de aço formados a frio a partir do desenvolvimento de um modelo tridimensional, não linear, em elementos finitos, no *software* Abaqus (2011);

- comparar resultados obtidos no modelo numérico com resultados experimentais para validação do mesmo;
- realizar ensaio experimental com pilares de aço formado a frio empregando revestimento contra fogo de placas de gesso;
- desenvolver um modelo para análise de resistência ao fogo dos pilares com revestimento contra fogo de placas de gesso e argamassa projetada; e
- comparar os resultados do modelo numérico com o método simplificado da ABNT NBR 14323 (2013) e do EN 1993-1-2 (2005) com as simulações numéricas realizadas, discutindo a viabilidade de emprego destas normas no dimensionamento de estruturas de chapa fina com revestimento contra fogo em situação de incêndio.

1.2.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi dividida em 7 capítulos, estruturados da seguinte forma:

O Capítulo 1 contém a justificativa para o tema escolhido e os objetivos deste trabalho;

O Capítulo 2 descreve o estado da arte para estudos experimentais e numéricos envolvendo colunas de aço com e sem revestimento contra fogo, ainda apresenta um breve resumo sobre materiais de proteção empregados no país;

O Capítulo 3 demonstra o desenvolvimento do modelo numérico através da comparação com os resultados experimentais sem revestimento contra fogo;

O Capítulo 4 apresenta o estudo experimental realizado para pilares com revestimento contra fogo;

O Capítulo 5 mostra a aplicação do modelo numérico desenvolvido no Capítulo 3 para pilares com proteção e a comparação com os resultados obtidos no Capítulo 4;

O Capítulo 6 mostra a comparação entre resultados obtidos numericamente utilizando-se o modelo apresentado no Capítulo 5 e a comparação com resultados analíticos calculados pelos procedimentos descritos no EN 1993-1-2 (2005) e na norma brasileira ABNT NBR 14323 (2013);

O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas com os estudos realizados e recomendações para trabalhos futuros;

Por fim, apresentam-se as referências utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTADO DA ARTE DE PILARES DE AÇO FORMADAS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Feng, Wang e Davies (2003.a) realizaram ensaios experimentais com intuito de avaliar o desempenho de seções de aço formadas a frio em situação de incêndio. No total foram feitos 52 testes, 11 com perfis U sem enrijecimento, 29 com perfis U enrijecidos sem furos e 12 com perfil U enrijecidos com furos. Os testes feitos em temperaturas elevadas foram realizados em um forno elétrico, as temperaturas foram medidas por 5 termopares e os deslocamentos por 4 transdutores, posicionados de forma que não fossem afetados pela temperatura. O carregamento axial foi aplicado por uma prensa hidráulica com pequenos incrementos de carga, e a cada aplicação de carga a pressão do óleo da bomba era aliviada, de forma a permitir uma dilatação livre do exemplar ensaiado. Os testes foram realizados em situação ambiente e com temperaturas de 250, 400, 550 e 700°C.

Testes auxiliares para verificar a uniformidade de distribuição de temperaturas na seção e o comportamento tensão x deformação na situação ambiente também foram feitos.

O principal modo de flambagem observado para os pilares nos testes para o perfil não enrijecido foi a flambagem local; nos perfis sem enrijecimento e com furos foram observadas combinações de flambagem local com flexão e flambagem local com distorcional; já com perfis enrijecidos sem furos o colapso se deu com flambagem distorcional e dobramento por flexão. Com os experimentos, os autores concluíram que a depender das condições iniciais de imperfeição, duas colunas idênticas podem ter diferentes modos de falha. Apesar da diferença do modo de falha, a carga crítica é a mesma para perfis de igual configuração. O furo nas colunas não afetou a rigidez, mas afetou a capacidade de carga e o modo de falha. O efeito prejudicial dos furos é mais acentuado em temperaturas elevadas do que em situação ambiente. Feng, Wang e Davies (2003.b) utilizaram os resultados obtidos no estudo experimental para conduzir um estudo numérico utilizando o programa de elementos finitos Abaqus (1998). Os autores modificaram parâmetros de dimensionamento do método simplificado das normas britânica (BS5950 - Part 5), europeia (EN 1993-1-2, 2005) e americana (AISI, 1996) a fim de estender sua aplicação para perfis formados a frio sujeitos a elevadas temperaturas; e validaram as alterações comparando com os resultados obtidos nos testes experimentais. Os autores concluíram que os métodos das três normas modificados conseguiram prever valores de carga crítica próximos aos obtidos experimentalmente considerando-se a redução da tensão de escoamento do material baseada na tensão de teste obtida a 0.2% da deformação plástica e a redução do módulo de elasticidade do aço. Concluíram também que o *software* Abaqus pode ser utilizado para simular

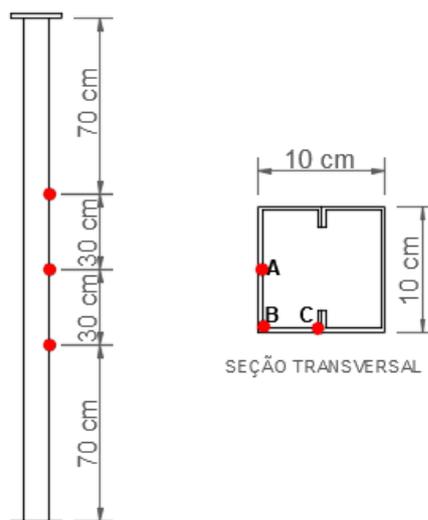
o comportamento de estruturas de chapa fina desde que fornecidas as condições de contorno e as propriedades dos materiais adequadas.

Dorr (2010) desenvolveu modelos numéricos tridimensionais de pilares de aço em situação de incêndio com o software *Ansys*. Realizou análise paramétrica variando as restrições axiais, totais e parciais dos pilares. Seus resultados numéricos foram comparados com ensaios experimentais e outros trabalhos numéricos da literatura. O autor obteve deslocamentos axiais e laterais e gráficos do acréscimo de força axial introduzido no sistema pela restrição axial. O modelo desenvolvido foi capaz de reproduzir os estudos experimentais. Seus resultados apontam que a consideração a inclusão de alvenaria no modelo termo estrutural pode melhorar consideravelmente o desempenho do elemento estrutural em situação de incêndio.

Almeida (2012) ensaiou 12 perfis do tipo C, I e 2R (chamada duplamente reforçada), comprimidos axialmente todos com 3,0 m de comprimento e reproduziu numericamente os resultados obtidos utilizando o *software Ansys*. Embora as simulações não tenham conseguido prescrever as temperaturas resistentes dos elementos investigados, os modelos numéricos foram capazes de prever a força de compressão resistente em temperaturas elevadas e o tempo de falha das colunas com pequena margem de erro. No âmbito normativo o estudo foi capaz de prescrever a força de compressão resistente dos elementos estudados. O máximo tempo de resistência ao fogo foi de 13 min correspondente aos pilares de seção 2R.

Costa (2013) ensaiou 10 exemplares de pilares tubulares de aço formados a frio do tipo caixão, esses compostos por dois perfis U Enrijecidos unidos longitudinalmente por solda contínua, com dimensões de 100 x 100 x 17 x 3 milímetros, cada exemplar com 2,0 m de altura, com aço ASTM A36. Os pilares foram aquecidos segundo a curva de incêndio padronizada pela ISO 834 (1999) com os efeitos de radiação e convecção incidindo apenas em seu metro central. A seção transversal pode ser vista na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Seção transversal dos perfis ensaiados.



Fonte: Adaptado de Costa (2013)

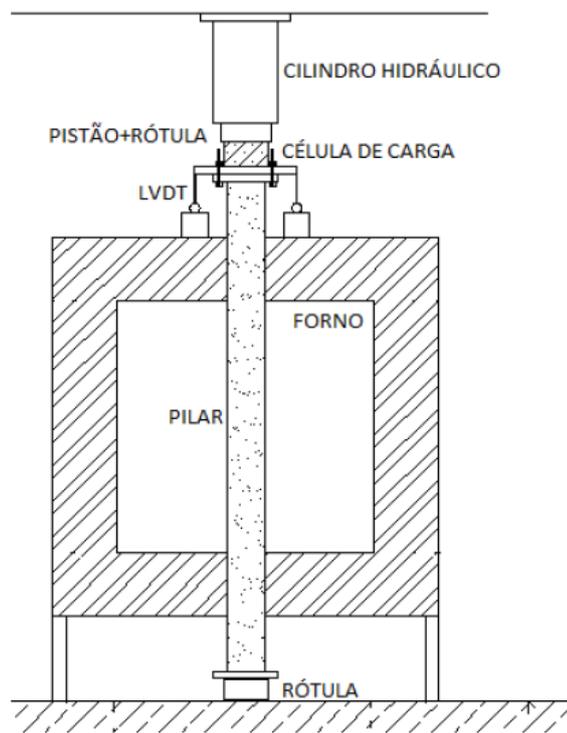
As amostras foram ensaiadas com e sem restrição axial em situação de incêndio, seguindo as prescrições da ISO 834-1999, sendo aquecidos em um forno elétrico capaz de reproduzir as temperaturas previstas pela mesma.

Foram utilizados 8 termopares em cada ensaio, sendo 6 (seis) no pilar (3 distribuídos ao longo do pilar e 3 distribuídos na seção transversal do meio, de acordo com a Figura 2.1), 01 (um) distando 10 cm do pilar para medir a temperatura dos gases e 1 (um) para a temperatura do forno. O aquecimento se deu ao longo do metro central do pilar e a aplicação de carga através de um sistema composto por um pórtico de reação e um cilindro hidráulico acionado por uma bomba a óleo.

Os pilares foram carregados axialmente, com níveis de carregamento de 40 e 80% da resistência característica à compressão das amostras, 110 e 220 kN respectivamente. Para monitorar os deslocamentos no topo dos pilares foram utilizados 2 transdutores de deslocamentos indutivos (LVTD's), posicionados na parte superior do forno, conforme Figura 2.2.

Obteve-se o tempo de resistência ao fogo dos pilares comprimidos através dos critérios fornecidos pela NBR 14323 (2013) e por Pires *et al.* (2012). A Tabela 2.1 resume e as condições de carregamento e restrição das amostras ensaiadas.

Figura 2.2 - Esquema do ensaio realizado por Costa.



Fonte: Costa (2013)

Tabela 2.1 - Amostras utilizadas por Costa (2013).

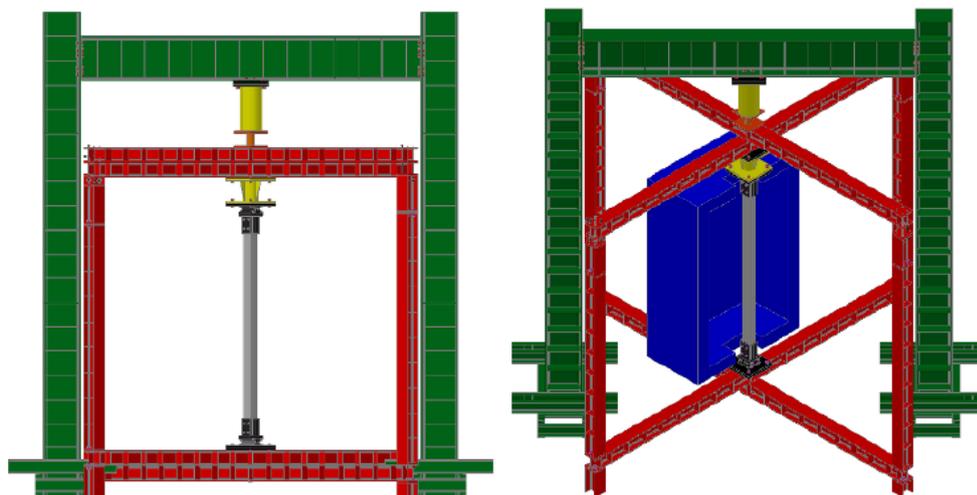
Nº de Exemplares	Carga Aplicada (kN)	Tipo de Restrição	Nomenclatura
2	40% da carga última	Dilatação Livre	PI40 – L
2	40% da carga última	Dilatação Restringida	PI40 – R
2	80% da carga última	Dilatação Livre	PI80 – L
2	80% da carga última	Dilatação Restringida	PI80 – R

Fonte: Adaptado de Costa (2013)

O autor concluiu que a restrição axial à dilatação térmica e o aumento do nível de carregamento reduzem o tempo de falha dos pilares, cujo valor máximo foi de 09 min, alcançado por um pilar sem restrição à dilatação térmica.

Craveiro, Rodrigues e Laim (2015) realizaram um estudo experimental utilizando pórticos bidimensionais e tridimensionais para que as restrições dos pilares tivessem diferentes graus de rigidez, com intuito de reproduzir as condições de contorno de uma coluna de aço formada a frio inserida numa estrutura real. Os esquemas dos pórticos utilizados podem ser vistos na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Pórticos 2D e 3D



Fonte: Adaptado de Craveiro, Rodrigues e Laim (2015)

As estruturas ensaiadas foram aquecidas por um forno elétrico de alta resistência programado para seguir as temperaturas da curva padrão fornecida pela norma internacional ISO 834 (1999). As colunas utilizadas consistiam de seções U enrijecidas com 2,5 mm de espessura e seções I formadas pela composição das anteriores, todos os exemplares com 2950 mm de altura. Para aferição de temperaturas utilizou-se termopares tipo k; os deslocamentos axiais foram verificados com transdutores de deslocamentos (LVDT) e os para deslocamentos laterais transdutores lineares (LWT). No quesito temperatura foi observado que o forno só atingiu as temperaturas da ISO 834 (1999) perto de 6 minutos decorridos do ensaio, os perfis tipo U apresentaram temperaturas uniformes e os perfis tipo I apresentaram uma pequena diferença na temperatura desenvolvida nas mesas e na alma do perfil.

Observou-se que a interação entre o aumento do nível de carga e da rigidez de restrição de ambos os perfis reduziram o tempo de falha dos mesmos. O modo de falha predominante foi a interação entre a flambagem local e distorcional na altura média das colunas. Observou-se também que independentemente do modo de falha, as temperaturas críticas dos perfis foram as mesmas.

Cruz (2015) realizou um estudo numérico com o sobre o fator de resistência ao escoamento do aço para perfis formados a frio, com seção transversal do tipo U enrijecido, em situação de incêndio e validou seus resultados por comparação com os experimentos de Feng, Wang e Davies (2003.a) e Heva (2009). Em suas simulações o autor utilizou fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada, $k_{\sigma,\theta}$ sugerido pela ABNT NBR 14323 (2013). O autor variou o fator de redução em função do índice de esbeltez associado ao modo de falha e desenvolveu um equação para representar o comportamento do fator de redução em função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem do perfil. Como não foi observada diferença significativa entre os modos de falha modos a equação desenvolvida no trabalho é função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local e das dimensões nominais da mesa e da alma do perfil.

Chen *et al.* (2016) realizaram um estudo experimental e numérico com duas estruturas aporticadas em perfis de aço. Foi investigado o colapso de uma coluna quando aquecida e submetida as restrições à dilatação térmica pelo efeito da estrutura adjacente em situação ambiente. A flambagem dos pilares ocorreu em ambos os ensaios para tempos inferiores com 25 min. O modelo numérico feito no *software* Abaqus foi capaz de estimar a temperatura e o tempo crítico de falha da coluna aquecida, mas não reproduziu as consequências do experimento no restante da estrutura. Os autores concluíram que: (i) a flambagem da coluna se caracteriza como um colapso inicial da estrutura; (ii) a flambagem é influenciada pela rigidez de restrição das vigas; (iii) a temperatura de crítica do pilar diminui com o aumento do nível de carregamento.

Abreu (2016) realizou um estudo numérico utilizando os *softwares* Abaqus e Ansys para comparação com resultados experimentais obtidos por Pires (2012) e Costa (2013) e com o estudo numérico realizado por Rocha (2014). Foi feita uma análise termomecânica não acoplada em ambos os *softwares*, conforme recomendações de Almeida (2012) e Pires (2012). Para a discretização dos pilares a autora utilizou o elemento finito DC3D20 no programa Abaqus, já no Ansys utilizou o SOLID45, o SOLID90 e o LINK10. Foi realizada uma análise de convergência de malha tanto para o modelo térmico quanto para o modelo mecânico e conclui-se que dentre as principais conclusões apontadas pela autora pode-se destacar: (i) ambos os pacotes computacionais utilizados na modelagem numérica se mostraram adequados para análises termo-estruturais de elementos de aço em situação de incêndio (ii) os pilares apresentaram pequenos tempos críticos quando comparados ao TRRF requerido pela ABNT

NBR 14432 (2001) (iii) o aumento na rigidez axial da estrutura conduz a um aumento nas forças de restrição dos pilares mas não influencia os tempos críticos das análises (iv) as temperaturas encontradas nos modelos numéricos foram ligeiramente inferiores aos resultados experimentais (v) os modelos já convergiam com a utilização de elementos discretizados em 30 mm.

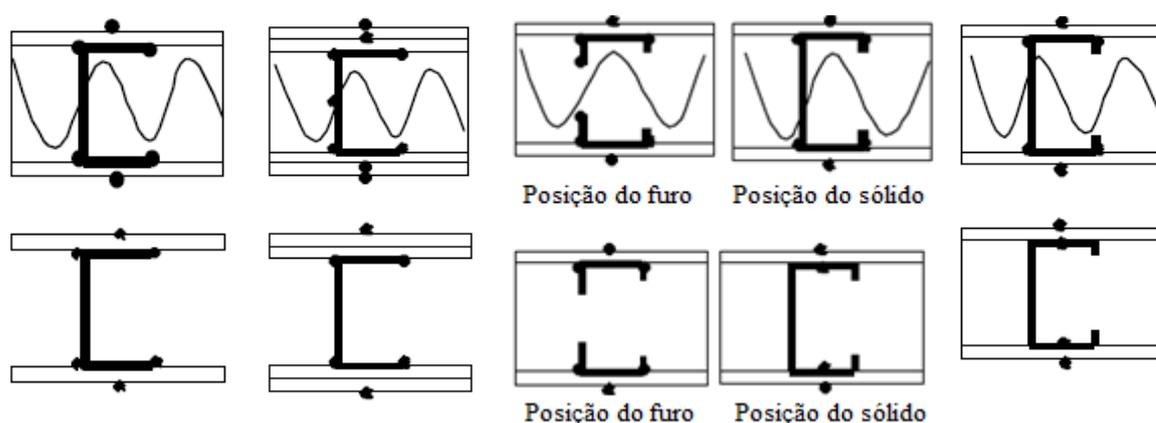
Mota (2016) realizou análise experimental e numérica com o software em colunas de AEF com secção de formato em sigma (Σ) sujeitas a altas temperaturas, com restrição à dilatação térmica. O autor fez considerações sobre a influência da secção transversal e condições de apoio das colunas no seu comportamento estrutural, avaliando ainda o efeito dos reforços presentes na alma dos perfis na sua resistência ao fogo. Concluiu que o aumento da rigidez axial das colunas conduz a um colapso prematuro devido ao desenvolvimento de forças de restrição, e colunas com menor rigidez axial apresentam maior sensibilidade ao aumento de temperatura.

2.2 ESTADO DA ARTE DE ESTRUTURAS DE AÇO COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Feng, Wang e Davies (2003.c) realizaram um estudo experimental em paredes do tipo *Stud Walls*, onde foram ensaiados 8 exemplares com objetivo de entender melhor a distribuição de temperaturas desenvolvidas neste tipo de arranjo estrutural. O ensaio foi feito em um forno a gás com dimensões de 1,5 x 1,5 x 1,5 m seguindo-se a curva de temperatura celulósica da norma BS: 476 - Part 20 e as temperaturas foram controladas e aferidas por termopares.

As paredes tinham dimensões de 300 x 300 mm e foram testadas com e sem material de isolamento. A seção de aço era galvanizada e as placas de gesso do tipo *Fireline Gyproc* com 12,5 mm de espessuras, fabricadas por “*British Gypsum Limited*”. A seção U de 104 x 63 x 1,5 mm podia ser enrijecida ou não. A Figura 2.4 resume os exemplares usados no experimento.

Figura 2.4 - Espécimes testadas por Feng, Wang e Davies (2003.c)



Fonte: Adaptado de Feng, Wang e Davies (2003.c)

Os testes foram reproduzidos no *software* Abaqus utilizando-se um modelo bidimensional. As condições de contorno iniciais nas faces externas foram a incidência de radiação e convecção. A Eq. 1 foi considerada para a incidência destes fenômenos.

$$q = A[(\theta - \theta^z)^4 - (\theta^0 - \theta^z)^4] + h(\theta - \theta^0) \quad \text{Eq. 1}$$

É ainda atribuída a radiação de cavidade, assumindo que as faces são isotérmicas e isoemissivas. No Abaqus, a radiação de cavidade é aplicada segundo mecanismo da Eq.2.

$$q_i^c = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_i}{A_i} \cdot \sum_j \varepsilon_j \sum_k F_{ik} \cdot C_{kj}^{-1} [(\theta_j - \theta^z)^4 - (\theta_i - \theta^z)^4] \quad \text{Eq. 2}$$

sendo a matriz de reflexão dada por:

$$C_{ij} = \delta_{ij} - \frac{(1 - \varepsilon_{ij}) \cdot F_{ij}}{A_i} \quad \text{Eq. 3}$$

Tabela 2.2 - Propriedade dos materiais utilizados por Feng, Wang e Davies (2003.c)

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)
Placa de gesso	727,1	0,2 a 10°C 0,218 a 150 °C 0,103 a 155°C 0,3195 a 1200°C	925,04 a 10°C 941,5 a 95°C 24.572,32 a 125°C 953,14 a 155°C 1097,5 a 900°C
Aço	7850	$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \times \theta$ (20°C ≤ θ ≤ 800°C) $\lambda_a = 27,3$ (800°C ≤ θ ≤ 1200°C)	$Ca = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \times \theta^{-1} - 1,69 \theta^{10^{-3}} \theta^2 + 2,22 \times 10^{-6} \times \theta^3$ (20°C ≤ θ ≤ 600°C) $Ca = 666 + 13.002 / (738 - \theta)$ (600°C ≤ θ ≤ 735°C) $Ca = 545 + 17,82 / (\theta - 731)$ (735°C ≤ θ ≤ 900°C) Ca=650 (900°C ≤ θ ≤ 1200°C)
Lã Mineral	25	0,036	840

Fonte: Adaptado de Feng, Wang e Davies (2003.c)

O modelo desenvolvido foi validado por comparação com os resultados experimentais. Em geral todos os modelos apresentaram bons resultados, e em geral a radiação de cavidade apresentou resultados melhores do que os modelos com isolamento térmico pois existem incertezas na adoção das propriedades deste material. Dois exemplos dos resultados obtidos são mostrados nas Figuras 2.5 e 2.6.

Figura 2.5 - Resultados obtidos por Feng, Wang e Davies (2003.c) para um modelo com isolamento térmico

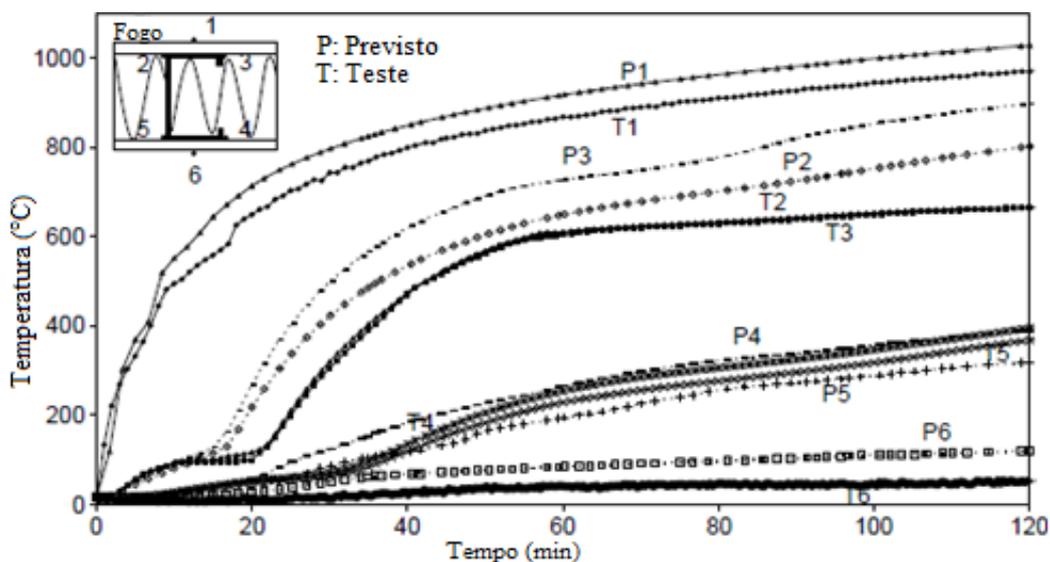
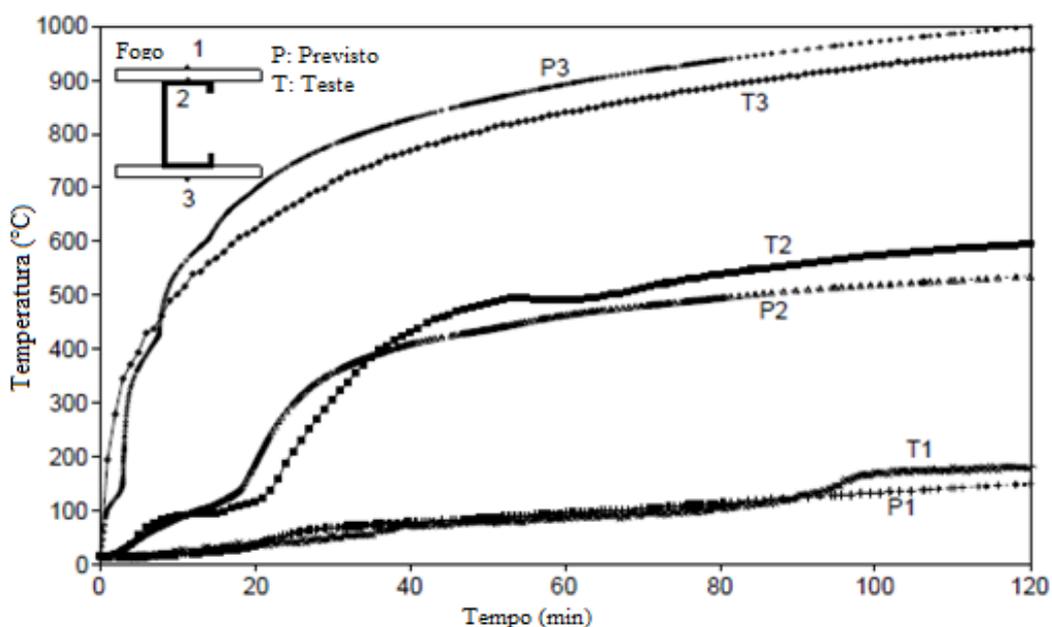


Figura 2.6 - Resultados obtidos por Feng, Wang e Davies (2003.c) para um modelo sem isolamento térmico.



Com a validação do modelo foi desenvolvido um estudo paramétrico no programa Abaqus com objetivo de compreender melhor a distribuição de temperaturas em diferentes estruturas de aço de paredes finas, variando-se a espessura, a presença ou não de enrijecedores, quantidade de camadas de proteção de gesso, tipos de isolamento térmico e painéis, utilizando seções U duplamente enrijecidos, posicionados em outro sentido. Ressaltando-se que foi considerado a integridade do gesso e do isolante térmico nas simulações. Os autores concluíram que:

- a forma da seção transversal dos perfis não possui efeito crítico na distribuição de temperatura dos painéis;
- a temperatura do aço depende principalmente das propriedades térmicas do material na face exposta ao fogo;
- o tipo de isolante térmico utilizado entre as faces não acarreta mudanças significativas no desempenho das placas pois todos possuem uma baixa condutividade térmica.

Silva (2005) desenvolveu uma expressão analítica para cálculo da espessura do material de proteção passiva e validou sua equação através de comparação com outras equações encontradas na literatura, resultados experimentais e resultados obtidos numericamente pelo programa SuperTempCalc (1991), a equação foi inserida na ABNT NBR 14232 (1999). A proteção térmica utilizada na validação foi a argamassa Blaze Shield II, fornecida no Brasil pela Resfrasol/Isolateck. No seu desenvolvimento analítico ele considerou que o calor é transferido do material de proteção para a peça protegida por condução e afirma que os fenômenos de radiação e convecção não tem muita significância no cálculo das temperaturas desenvolvidas no perfil de aço. Chegou-se à conclusão que a equação era satisfatória para prever a temperatura dos elementos de aço protegido, mas para materiais de proteção com umidade os valores obtidos com sua expressão são conservadores.

Alves (2006) reuniu uma série de estudos sobre perfis de AFF com seção transversal em U enrijecido submetidos à elevadas temperaturas, reproduziu o experimento de Feng, Wang e Davies (2003.c) e discutiu seus resultados quanto à: (i) propagação de calor em estruturas AFF; (ii) análise avançada de perfis formados a frio quanto à flambagem e comportamento pós flambagem e, principalmente, (iii) à aplicação do Método da Resistência Direta (MRD), como uma alternativa ao método analítico das larguras efetivas (MLE), para a estimativa da resistência última de perfis de aço sob a ação de distribuição uniforme ou não-uniforme de temperatura. No que diz respeito às simulações numéricas o autor destacou que as paredes com perfis de aço entre placas de gesso sem isolamento interno se mostram bastante satisfatórias; já no caso de presença de isolamento entre as placas mostraram alguns desvios nas previsões de temperatura em pontos onde os valores experimentais de temperatura foram superiores ao computacionais. O autor destaca que as malhas de elementos finitos não necessitam ser muito refinadas pois as estimativas da evolução da temperatura em função do tempo são muito próximas daquelas obtidas com uma malha muito refinada e que as maiores discrepâncias nos resultados computacionais são justificadas devido às calibrações quanto às propriedades

térmicas do gesso. O Autor afirma que as placas de gesso são excelentes para minimizar a transferência de calor entre compartimentos devido à redução de 450 °C a 875 °C graças à presença da água em sua composição, característica evidenciada pela formação de patamares nas curvas de temperatura vs. tempo de suas simulações numéricas.

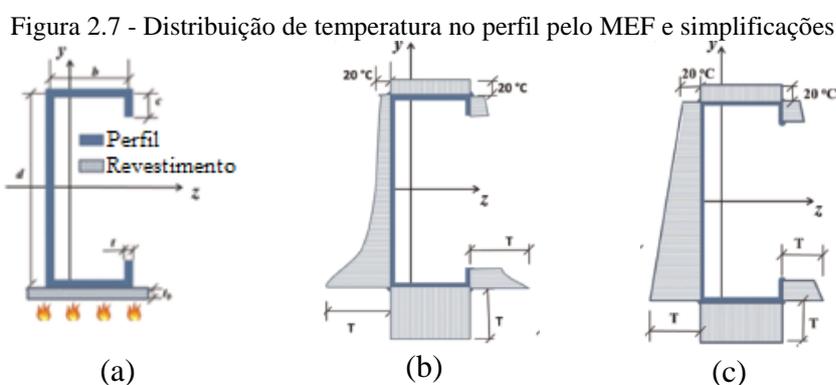
Gerkeen (2007) apresentou vários tipos de proteções passivas utilizadas no país e fez um estudo numérico comparativo, utilizando o programa Thersys, entre o desempenho térmico das mesmas quando aplicadas com espessuras de 10, 15 e 20 mm a fim de obter as temperaturas desenvolvidas em um perfil formado a frio tipo caixa.

As curvas utilizadas para o aquecimento do perfil foram a curva da ISO 834 e uma curva de incêndio natural extraída da simulação de incêndio feita pelo autor em um apartamento popular, utilizando o programa Smartfire. Com ambas as curvas, os materiais de proteção que tiveram um melhor desempenho térmico foram a argamassa de fibra projetada e as placas de gesso. Utilizando a curva ISO 834 (1999) pela redução das propriedades mecânicas do aço fornecidas pela ABNT NBR 14323 (1999) conclui-se que com 10 mm de espessura a argamassa foi possível obter um TRRF de 30 min, já a placa de gesso, para fornecer o mesmo TRRF, necessitou de 15 mm de espessura.

Guimarães (2007) apresentou o método simplificado de dimensionamento de estruturas e aço com e sem revestimento contra fogo para o dimensionamento de perfis do tipo I (W 360 x 32,9 e W 610 x 174); com e sem presença de alvenarias adjacentes ao perfis; com e sem presença da argamassa Blaze Shield II como revestimento contra fogo. Detalhou a aplicação do programa de computador SuperTempCalc (STC) e comparou a força resistente de cálculo entre método analítico e método numérico para o pilar protegido por alvenaria considerando diferentes fatores de massividade. Foi feita a comparação com estudos experimentais desenvolvidos por Underwriters Laboratories (UL), British Loss Prevention Standard (LPS) e pelo Instituto de pesquisas tecnológicas (IPT). A autora concluiu que, para um pilar de aço W 460 x 89, isolado sem revestimento contra fogo, os métodos numérico e analítico conduziram a resultados similares. Já para o pilar isolado com revestimento contra fogo, considerando-se a mesma temperatura crítica, os métodos analítico e experimental apresentam espessuras similares, mas o método numérico forneceu resultados ligeiramente mais econômicos. A autora afirma que, em casos onde que há reserva estrutural à temperatura ambiente, ou seja, a temperatura crítica é mais alta, os métodos teóricos podem levar a resultados muito favoráveis a segurança.

Wakili & Hugi (2009) estudaram as propriedades térmicas de quatro diferentes tipos de placas de gesso para comparação das temperaturas desenvolvidas em uma coluna de aço. Os resultados da simulação numérica mostraram que dependendo da composição química da placa de gesso obtém-se em diferentes temperaturas no perfil de aço. Todas as placas tinham a espessura de 24 mm, portanto a diferença desenvolvida no perfil de aço se deu em função da porcentagem de sulfato de cálcio, carbonato de cálcio e carbonato de magnésio presente nas amostras. Entretanto, a presença do sulfato de cálcio é o principal responsável pela resposta do gesso até os 30 min de aquecimento. Em todos os modelos numéricos a temperatura desenvolvida no perfil de aço foi muito similar até o tempo onde ocorre a desidratação do gesso. Os autores não analisaram a fissuração do gesso.

Cheng *et al.* (2015) conduziram um estudo numérico utilizando o programa Ansys com intuito de investigar o comportamento de flambagem em seções de AFB submetidas a carregamento de compressão em situação de incêndio. O perfil analisado foi o mesmo utilizado por Feng, Wang e Davies (2003.c), considerando-se a incidência do fogo em apenas uma placa de gesso com 12,5 mm de espessura, o que gera uma não uniformidade de temperaturas no perfil, conforme Figura 2.7.



Fonte: Adaptado de Cheng *et al.* (2014)

Foi elaborada uma aplicação do método da resistência direta (MRD) com resolução por séries de Fourier utilizando as simplificações da distribuição de temperatura, considerando-a parabólica e linear conforme a Figura 2.7 (b) e Figura 2.7(c). Os resultados comparativos podem ser vistos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Comparação da carga crítica de flambagem pelo MRD e MEF

Tamanho das colunas (mm)	Distribuição de temperatura linear		Distribuição de temperatura não linear	
	MEF	MRD	MEF	MRD
500	67.453	69.340	77.589	84.093
1000	68.408	69.459	73.637	81.215
2000	68.232	69.393	72.038	84.359
3000	68.388	69.514	71.249	84.837
4000	55.391	58.070	58.188	57.908
5000	37.226	36.298	39.141	36.303

Fonte: Adptada de Cheng *et al.* (2014)

Observou-se que o MRD adaptado fornece resultados muito próximos aos obtidos pelo MEF exceto para as colunas com comprimentos intermediários, onde o MRD se mostrou um pouco mais conservador que o MEF. Observou-se também que para membros com comprimento superiores a 2,00 m, a utilização de uma distribuição de temperaturas lineares leva a resultados não confiáveis. No que diz respeito à flambagem devido a temperatura, os autores concluíram que é importante utilizar uma distribuição precisa das temperaturas na seção transversal.

Por fim, conclui-se que a distribuição de temperaturas na seção transversal protegida tem grande influência no comportamento de AFF e que essa distribuição é fundamental para se prever o modo de flambagem da seção.

Guo-Qiang *et al.* (2015) estudaram a aplicabilidade de se utilizar um coeficiente constante para condutividade térmica de tintas intumescentes para aço, comparando o modelo analítico do EN 1991-1-2 (1993) com resultados experimentais. Um coeficiente de condutividade térmica efetivo foi obtido com base na espessura de tinta intumescente e no fator de massividade da seção analisada. A concordância entre valores calculados e medidos foi muito boa para temperaturas do aço na faixa de 400 a 600 °C e bastante próximas para temperaturas superiores a 600 °C. Apesar de não terem sido realizados testes com estruturas de chapa fina, os autores acreditam que um aumento na espessura do revestimento compensa o aumento do fator de massividade, resultando em taxas de aquecimento similares às obtidas no estudo e sugerem a eficácia da adoção de uma condutividade térmica constante.

2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Estão disponíveis no mercado mundial vários tipos de materiais de proteção passiva para revestimento contra fogo. Os principais materiais e fabricantes brasileiros podem ser vistos em Silva *et al.* (2008).

Segundo Gerkeen (2007), os materiais de revestimento contra fogo devem apresentar baixa massa específica, baixa condutividade térmica e alto calor específico, mantendo a integridade durante o incêndio, sem causar aumento considerável no peso próprio na estrutura.

Ainda sobre as proteções, o referido autor afirma que devem apresentar as seguintes características:

- não devem apresentar em sua composição materiais agressivos à saúde, como os asbestos, em função da presença do amianto na sua composição química;
- devem ter a durabilidade compatível com a vida útil da estrutura, sem que haja necessidade de manutenção, porém deve possibilitar pequenos reparos manuais, garantindo adequada aderência; e
- ser constituídas de material não higroscópico, afim do aço não receber umidade, ainda que seja necessário o uso de produtos anticorrosivos nas estruturas internas para evitar a corrosão.

Segundo Mendes (2004), os materiais de proteção térmica podem ser classificados segundo três fatores:

- quanto ao material constituinte: alvenaria, concreto de cimento portland, concreto leve, argamassas à base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso, mantas de fibras cerâmicas, de fibras minerais ou de lã de rocha, tintas intumescentes, entre outros;
- quanto à morfologia: dos tipos contorno, caixa com vãos e caixa sem vãos;
- quanto à técnica de colocação: moldados com o uso de formas, aplicados manualmente, aplicados por jateamento, fixados por dispositivos específicos ou montados.

2.4 CUSTO DOS MATERIAIS DE REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Os custos dos materiais de proteção são bastante variados, dependem da espessura, da constituição, do fabricante, do tempo requerido de resistência ao fogo, entre outros. Piquer & Figuerido (2016) afirmaram que na Espanha o material mais econômico a ser empregado em de perfis laminados para TRRF's de 120 min é o concreto como estrutura mista. Já para TRRF's superiores a 120 min, o material mais econômico é a argamassa de vermiculita. No Brasil alguns fornecedores trazem em seus sites tabelas com custos comparativos entre os sistemas de proteção, conforme a Figura 2.8.

Figura 2.8 - Comparativo entre custos unitários de materiais de revestimento contra fogo



Fonte: PCF do Brasil (2017)

Piquer & Figuerido (2016) fizeram um estudo econômico comparando seções laminadas desprotegidas, com revestimento contra fogo e mistas de aço e concreto. As proteções utilizadas podem ser vistas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Materiais de proteção utilizados por Piquer & Figuerido (2016)

Materiais de revestimento contra fogo	Espessura (cm)	Densidade (kg/m³)	λ_p (W/(m K))	C_p (J/(kg K))
Argamassa de Concreto	5; 10	2300	1,3	1000
Tijolo	11,5; 14	1450	1,15	1000
Argamassa de Perlita e Vermiculita	2,0; 2,5; 3,0; 4,0;5,0	450	0,12	1100
Painéis de Silicato de Cálcio	1,2; 1,5; 1,8; 2,0 2,5; 3,0; 4,0; 5,0	600	0,15	1200
Argamassa de Lã de Rocha	2,0; 2,5; 3,0; 4,0;5,0	300	0,12	1200
Painéis de Lã de Rocha	2,0; 2,5; 3,0; 4,0;5,0	150	0,2	1200
Argamassa de Gesso	2,0; 2,5; 3,0; 4,0;5,0	650	0,12	1100
Painéis de Gesso	1,3; 2,5; 3,8; 5,0	800	0,2	1700

Fonte: Adaptado de Piquer & Figuerido (2016)

O método escolhido pelos autores citados foi o Pareto frontier, que faz uma análise de otimização multicritério, com base em dados financeiros da Espanha. Escolheu-se então a função custo para ser minimizada através de um algoritmo matemático. Os autores fazem uma retomada do método de dimensionamento do EN 1993-1-2 (2005) para os perfis com e sem proteção e do EN 1994-1-2 (2005) para os perfis mistos. O número de perfis analisados pode ser visto na Tabela 2.5.

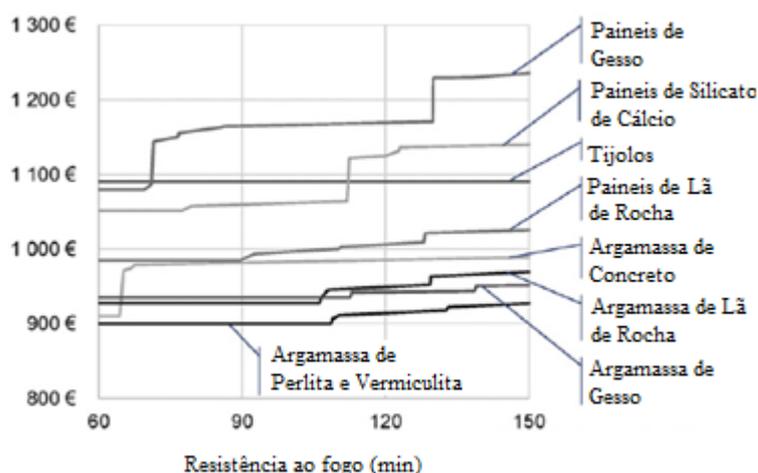
Tabela 2.5 - Quantidade de seções estudadas

Tipo de coluna	Variáveis	Quantidade de casos avaliados
Coluna de aço	Seção transversal, f_{ya}	3735
Coluna de aço com proteção	Seção transversal, f_{ya} , tipo de proteção ao fogo	130725
Coluna parcialmente encapsulada	Seção transversal, f_{ya} , f_{ck} , f_{ys} , Φ , $\eta\Phi_y$, $\eta\Phi_z$	62120520

Fonte: Adaptado de Piquet & Figuerido (2016)

Os autores chegaram à conclusão que para tempos de resistência ao fogo inferiores a 120 min o mais econômico seria a utilização de colunas mistas de aço e concreto; para tempos superiores a 120 minutos a proteção mais econômica foi a argamassa de perlita-vermiculita, seguida pela argamassa de gesso, conforme Figura 2.9. Esta é a inspiração principal da seção para a escolha do gesso como material de revestimento contra fogo desta dissertação.

Figura 2.9 - Custos obtidos pela análise Pareto frontier para diferentes tipos de proteção



Fonte: Adaptado de Piquer e Figuerido (2016)

No trabalho descrito a forma de proteção mais econômica foi a utilização de pilares mistos. Entretanto os autores destacam que, a seleção de um material de proteção que se adeque ao local e as práticas de projeto é importante pois, variando-se com a configuração estrutural, o custo de um pilar misto pode ser 7 vezes mais elevado do que o custo apresentado no estudo.

2.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades térmicas necessárias para estudos de dimensionamento da espessura do material de revestimento térmico são: calor específico, condutividade térmica e massa específica. Nos estudos realizados por Mendes (2004), Silva (2005), Gerkeen (2007), Guimarães (2007), Guo-Quiang *et al.* (2015), Piquet & Figuerido (2016), as propriedades térmicas dos materiais de proteção não sofreram alterações em função do aumento de temperatura e não é analisada a fissuração do material. Esses estudos serviram como embasamento para a utilização das propriedades nas simulações numéricas deste trabalho, a serem apresentadas no Capítulo 5. A Tabela 2.6 traz alguns exemplos de valores adotados para diversos tipos de proteção passiva.

Tabela 2.6 - Propriedades dos materiais de proteção passiva.

Material	Massa Específica (kg/m³)	Condutividade Térmica (W/m²°C)	Calor Específico (J/kg °C)
Fibra mineral projetada	250 - 300	0,1	1100
Placas de perlita ou vermiculita	300 - 800	0,15	1100
Folhas de silicato de amianto	800	0,15	1100
Folhas de silicato fibroso	450 - 900	0,15	1100
Placas de gesso	800	0,2	1700
Placas de lã mineral	120 - 150	0,25	1100
Concreto celular	600	0,3	1200
Concreto celular	1000	0,45	1200
Concreto celular	1300	0,65	1200
Concreto leve	1600	0,8	1200
Tijolo cerâmico	2000	1,2	1200
Concreto de densidade normal (de agregado predominantemente amorfo)	2200 - 2400	1,3	1200
Concreto de densidade normal (de agregado predominantemente amorfo)	2200 - 2400	1,7	1200
Mantas de fibras minerais	100 - 500	0,23 - 0,25	1500
Mantas cerâmicas	61 - 92	0,10 - 0,25	1067
Argamassa de fibras minerais	200 - 350	0,08 - 0,10	1050
Argamassa de gesso	500 - 800	0,20 - 0,23	1700

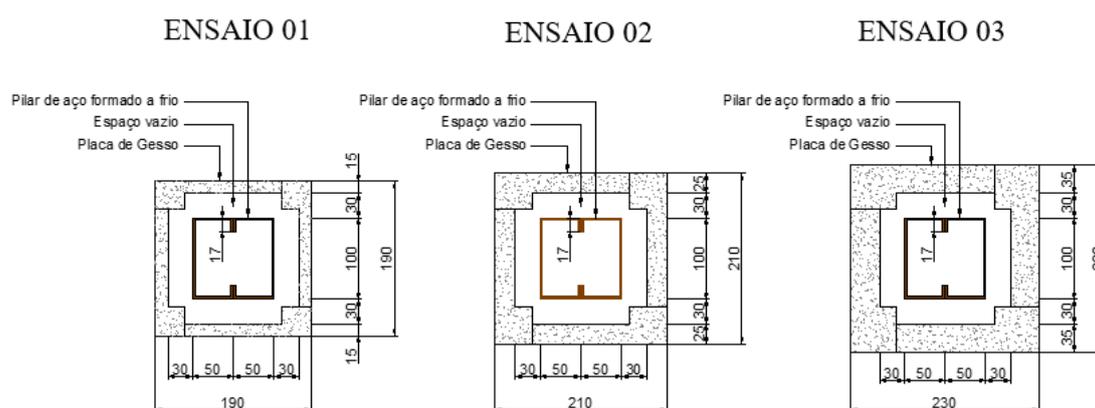
Fonte: Gerkeen (2007) apud Soares (2002)

3 ESTUDO EXPERIMENTAL DO PILAR REVESTIDO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo apresentam-se os testes realizados para os pilares de aço com revestimento de placas de gesso em situação de incêndio. Estes testes foram realizados no galpão do departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco. O plano experimental montado para o ensaio previa a simulação de 03 (três) colunas de aço formadas a frio com seção transversal, composta por dois perfis soldado do tipo U enrijecidos, idêntica à utilizada por Costa (2013). A intenção inicial era realizar ensaios variando a espessura das placas de gesso em 15, 25 e 35 mm, conforme Figura 3.1. Todos os pilares teriam o nível considerado de carga de 40% (110 kN) da capacidade resistente do pilar em situação ambiente ($N_{r,d}$) e mantendo-se a dilatação térmica restringida.

Figura 3.1 - Seções transversais com proteção de gesso



No primeiro experimento optou-se pela utilização das placas de gesso com 25 mm de espessura; No segundo utilizou-se as placas de gesso de 15 mm. Em função das forças de restrição impostas pela dilatação do primeiro pilar, efetuou-se a troca da célula de carga com capacidade de medição de 300 kN por outra com capacidade de medição de 500 kN. Entretanto, devido a quedas de energia ocorridas na universidade, o aparelho não foi capaz de medir corretamente a carga aplicada na hora do ensaio e a segunda coluna acabou por flambar em situação ambiente. Por este motivo, no terceiro experimento, com placas de gesso com 35 mm, optou-se por medir apenas o fluxo de temperaturas entre o forno e coluna de aço. Os resultados obtidos mostram que com 25 mm o gesso é eficiente para proteger o perfil de aço, aumentando o TRRF da coluna em mais de 900%, quando são comparados com os resultados obtidos por Costa (2013). No que diz respeito às temperaturas, essas são reduzidas em mais de 800 °C para a espessura de 25 mm e mais de 900 °C para a espessura de 35 mm.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS

Os exemplares do estudo experimental possuíam a mesma geometria dos pilares utilizados por Costa (2013). A seção transversal foi composta por 2 perfis do tipo U enrijecido (100 x 50 x 17 x 3 mm) soldados pela parte superior dos enrijecedores de modo a formar uma seção fechada de 100 x 100 x 17 x 3 mm todas com 2 m de comprimento, conforme pode ser visto na Figura 3.1. Como citado anteriormente foram realizados apenas dois ensaios com a Tabela 3.1 resumindo a condição dos mesmos.

Tabela 3.1 - Programa experimental

Ensaio	Tipo de análise	Espessura da proteção (mm)
01	Termomecânica	25
02	--	15
03	Térmica	35

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

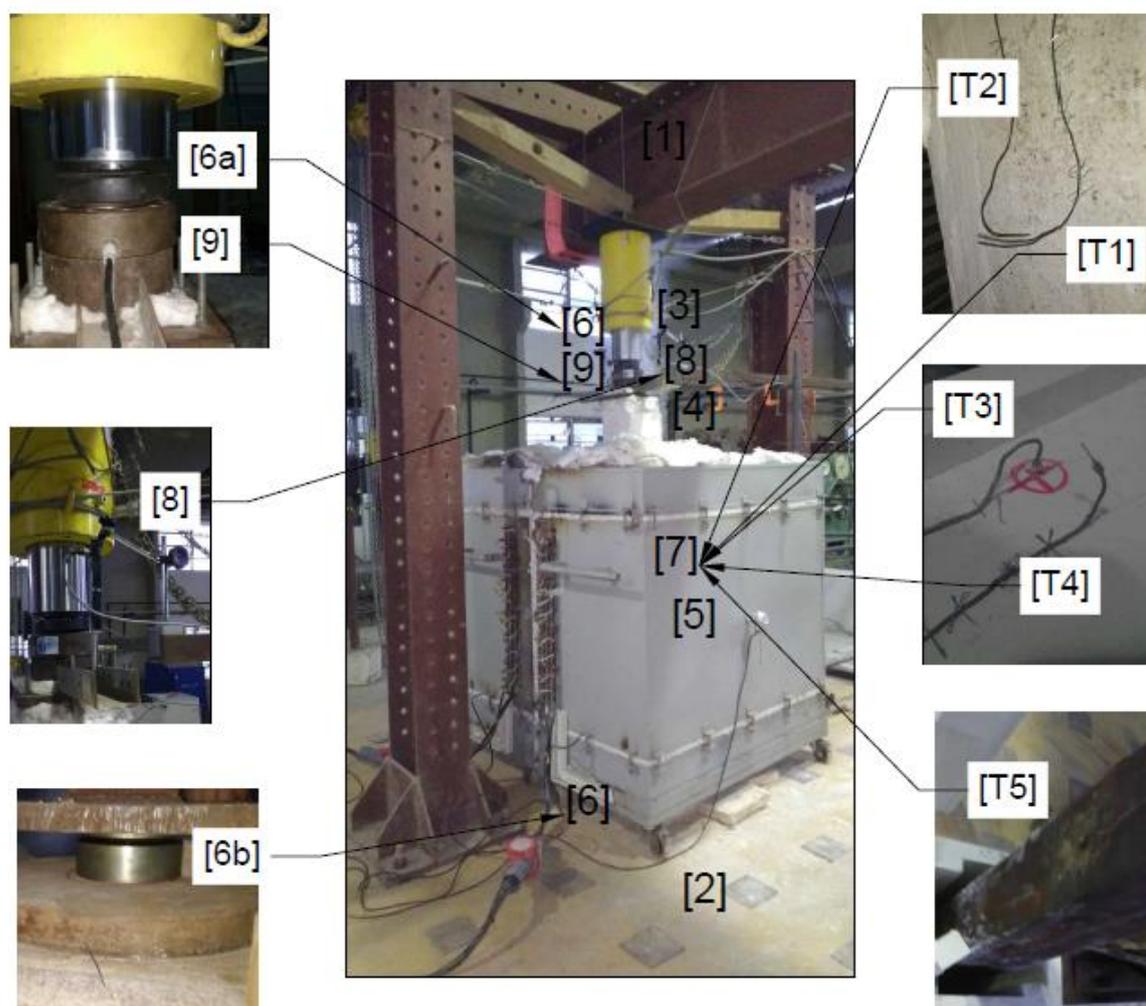
A aplicação da carga axial no pilar foi feita com um sistema composto por um cilindro hidráulico com capacidade de aplicação de carga de 250 toneladas e pistão rotulado com curso de 300 mm. O conjunto motor-bomba capaz de acionar o pistão, controlando avanço e recuo do mesmo, é composto por válvulas reguladoras de vazão e pressão, além de manômetro glicerinado com indicação máxima de 400 bar.

O pistão hidráulico está instalado em um pórtico que permite a aplicação de diferentes níveis de rigidez axial aos pilares, pois em uma situação real de incêndio a estrutura que compõe a edificação exerce forças de restrição à dilatação em seus componentes.

O pórtico de reação presente no laboratório foi analisado por Costa (2013). Para aferição das cargas aplicadas ao exemplar do Ensaio 01 foi utilizada uma célula de carga com capacidade de aferir até 300 kN.

A Figura 3.2 mostra os aparelhos utilizados no ensaio.

Figura 3.2 - Aparelhos utilizados nos ensaios



A descrição da numeração utilizada na Figura 3.2 é dada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Numeração dos aparelhos utilizados nos ensaios na Figura 3.2.

N ^o	Aparelho
1	Pórtico de reação
2	Laje de reação
3	Conjunto hidráulico
4	Pilar de teste
5	Forno
6	Apoios rotulados
7	Termopares
8	Trandutores de deslocamento
9	Célula de carga

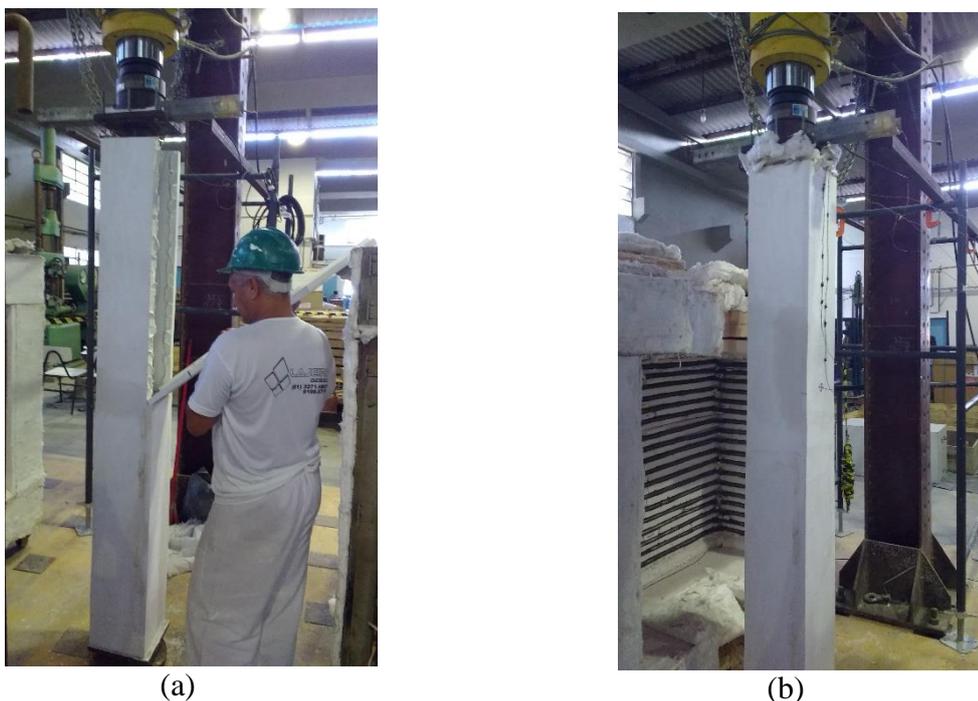
O aquecimento do conjunto gesso-pilar foi aplicado por um forno elétrico capaz de reproduzir a curva padrão de incêndio padrão da norma internacional ISO 834 (2014). As características do forno, adaptadas de Costa (2013), são listadas abaixo:

- uma base estruturada foi fabricada para suportar seu peso e movimentá-lo através de 8 rodas com 15 cm de diâmetro;
- dimensões externas: 1,5 x 1,5 x 1,5 m; dimensões internas: 1,0 x 1,0 x 1,0 m;
- estrutura em chapas finas de 3 mm, de aço A36;
- quadro industrial composto por tomada industrial de sobrepôr 200A IP67 3P+T 380V; quadro para fixação da tomada industrial de sobrepôr 200A; plugue 200A IP67 3P+T 380V; cabo de cobre flexível 70mm² com isolamento XLPE 90° 0,6/1kV e disjuntor tripolar 200A 10kA;
- quadro de comando capaz de produzir curvas através de patamares programados com as variáveis temperatura e tempo, controlando resistências elétricas de liga Kanthal A-1 com capacidade até 1400°C .
- o isolamento térmico do forno foi feito com manta cerâmica de capacidade de isolamento de 1400 °C, densidade de 128kg/m³ e placas refratárias.

Por fim, a condição de apoio do pilar foi bi-rotulada. Na parte inferior utilizou-se uma rótula que permite a rotação da coluna em todas as direções e na parte superior a rótula já vem acoplada ao pistão que aplica a carga no pilar.

Para a montagem da placa de gesso ser realizada foi necessário proceder com o alinhamento da coluna embaixo do pistão até que o mesmo descesse e encostasse na célula de carga. Com a aplicação de uma carga inicial da ordem de 10 kN, os pilares ficaram estáveis para ser feita a montagem da proteção de gesso. As placas de gesso foram feitas com seção transversal conforme a Figura 3.1, e altura de 90 cm. A junção das placas foi feita com a utilização do material gesso-cola, tomando-se o devido cuidado com o alinhamento e perpendicularidade das mesmas. O conjunto pilar-proteção pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Conjunto pilar-revestimento de gesso



3.4 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Para a aferição do desenvolvimento das temperaturas foram utilizadas 5 termopares tipo K (*alumel-cromel*).

Os termopares foram posicionados de forma a medir o fluxo de temperaturas entre a parte interior do forno e a superfície do pilar de aço. A Figura 3.4 indica como esses termopares foram posicionados. O esquema representativo da instrumentação utilizada pode ser vista nas Figuras 3.5 e 3.6.

Figura 3.4 - Esquema representativo da instrumentação do ensaio

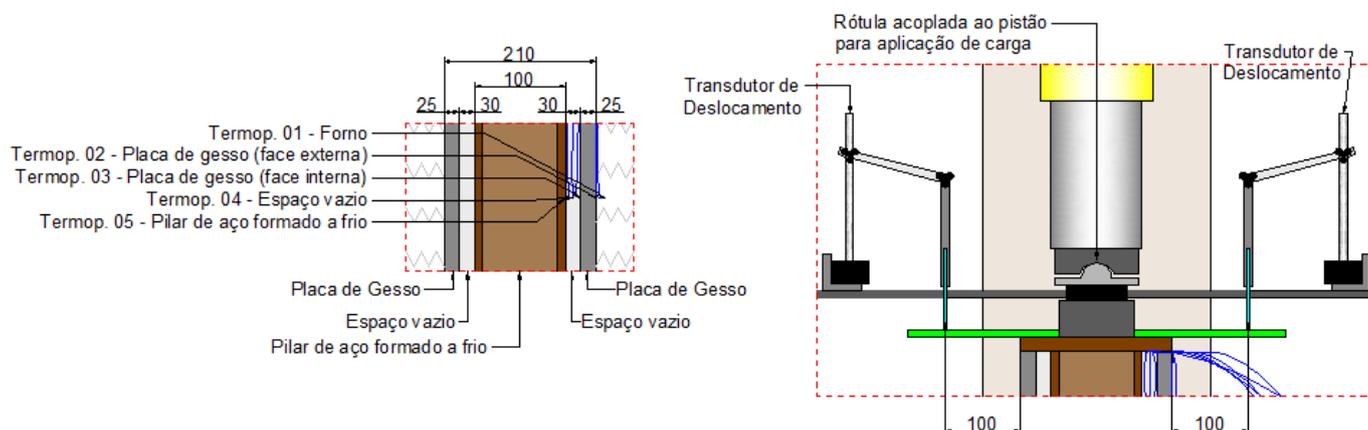


Figura 3.5 - Posicionamento dos LVDT's e seção transversal do ensaio

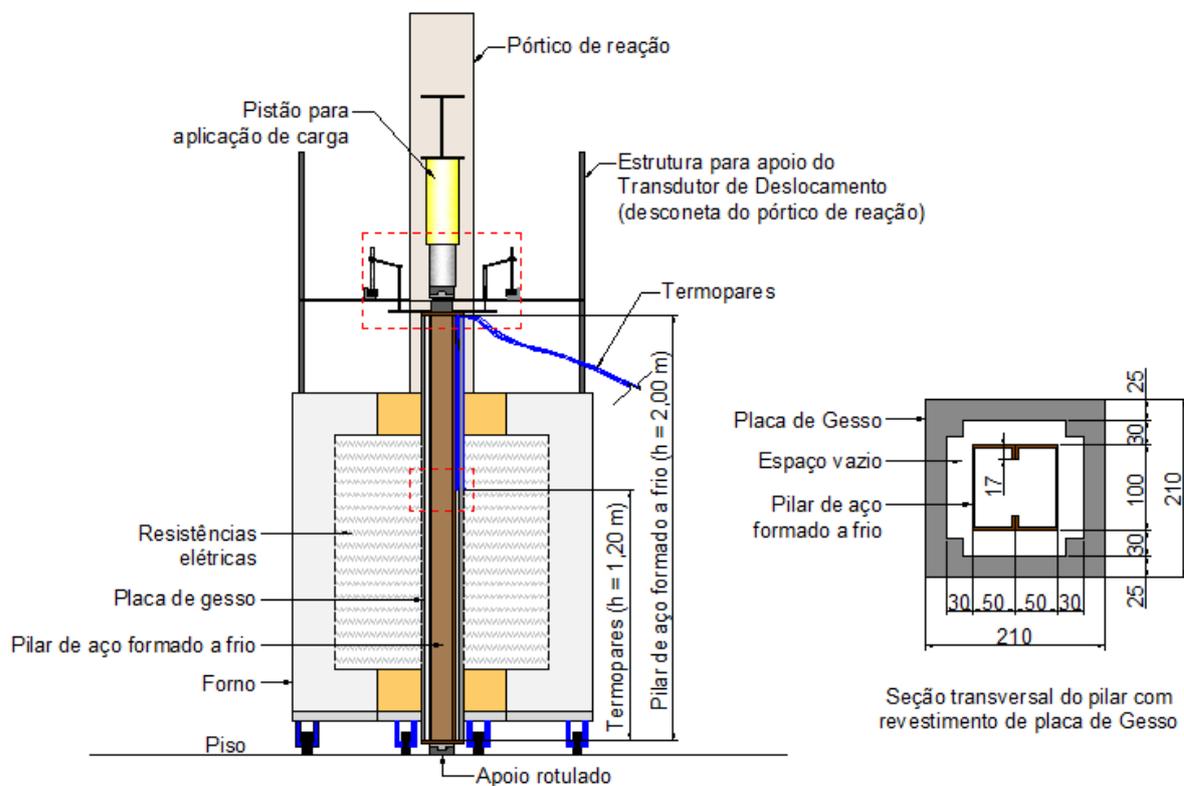
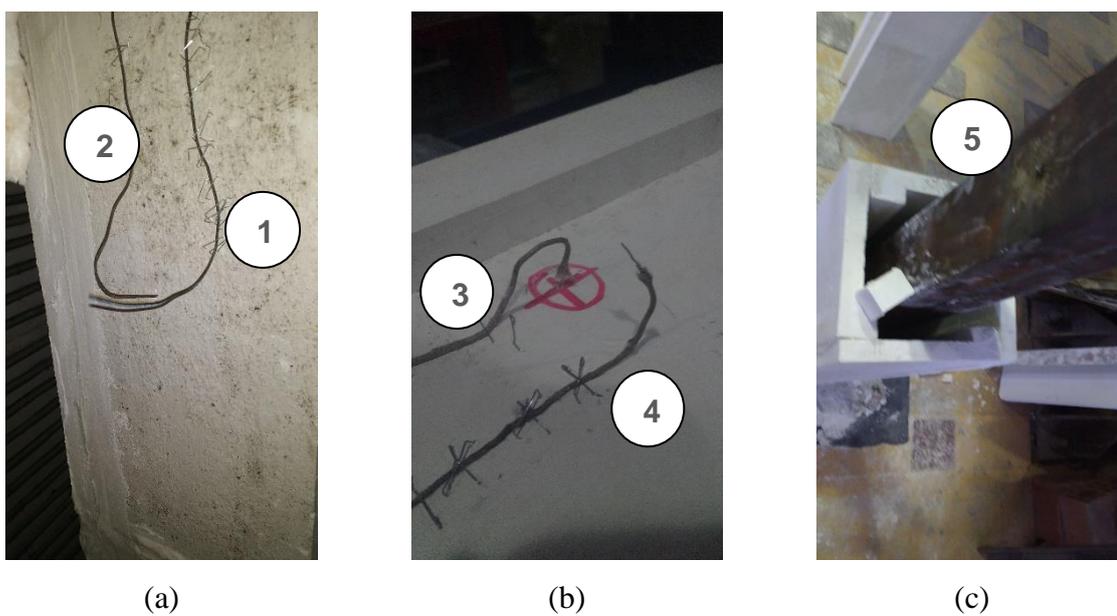


Figura 3.6 - Posicionamento dos termopares para o ensaio



A Tabela 3.3 resume a condição da instrumentação utilizada.

Tabela 3.3 - Resumo da instrumentação utilizada nos ensaios

Nº	Tipo	Medição
1	Haste flexível	Temperaturas do forno
2	Haste flexível	Temperaturas da face externa do gesso
3	Fio	Temperaturas da face interior do gesso
4	Fio	Temperaturas do espaço vazio entre a placa de gesso e o pilar de aço
5	Fio	Temperaturas do pilar de aço
--	LVDT	Deslocamentos do pilar de aço
--	LVDT	Deslocamentos do pilar de aço

Os deslocamentos axiais foram aferidos por 02 transdutores de deslocamento (LVDT) com capacidade de aferir até 50 mm, posicionados em cantoneiras fixadas na parte superior do pilar a 10 cm da extremidade da placa soldada, conforme pode ser observado na Figura 3.7. De modo que os deslocamentos do pórtico de reação não interferissem nas medidas, foi utilizado um andaime externo à estrutura apoiando duas cantoneiras que por sua vez serviram de suporte para as bases magnéticas que fixaram os LVDT's.

Figura 3.7 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento utilizados no ensaio (LVDT's)



3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.5.1 Evolução de temperaturas

O forno utilizado no teste é programado por patamares de temperatura de forma a reproduzir a curva da ISO 834 (2014). A programação inserida no controlador do forno pode ser vista na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Programação do forno

Tempo (min)	Temperatura ISO 834 (°C)
0	25
5	581
10	683
30	846
60	950
120	1054
240	1157
480	1260

O forno funciona com variação da corrente elétrica que aciona as resistências até que ele atinja a temperatura programada. Quando se atinge a temperatura da curva, o controlador para o fluxo de corrente para que a temperatura não supere o valor programado. Por este motivo é visto na Figura 4.8 que as temperaturas sofrem variações em torno da curva ISO 834 (2014). Tal variação é permitida pela norma ABNT NBR 5628 (2001) desde que as diferenças percentuais entre a área embaixo de ambas as curvas não sejam maiores que:

- $\pm 15\%$ durante os primeiros 10 minutos;
- $\pm 10\%$ durante os primeiros 15 minutos;
- $\pm 5\%$ após os primeiros 30 minutos.

As temperaturas desenvolvidas no forno nos dois ensaios realizados podem ser vistas na Figura 3.8 e as comparações percentuais das áreas são apresentadas na Tabela 3.5. Percebe-se pelas e Tabela 3.5 e 3.6, que o forno foi eficiente, segundo os critérios da norma brasileira, na reprodução da curva da norma ISO 834, após os 10 minutos. Antes deste tempo o forno não tem a taxa de aquecimento adequada.

Figura 3.8 - Temperaturas da Curva ISO vs temperaturas desenvolvidas no forno

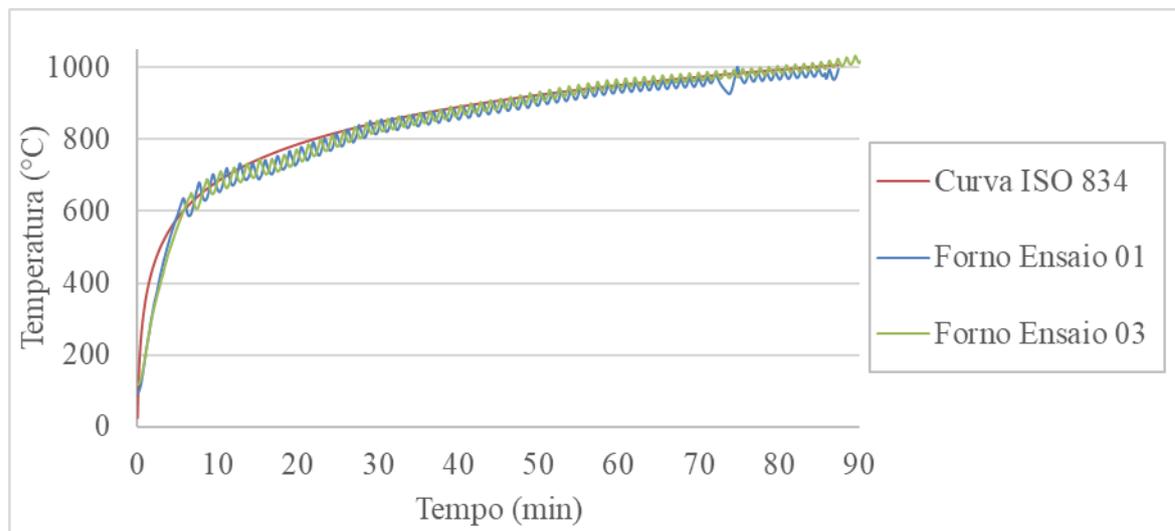


Tabela 3.5 - Diferença percentual entre as áreas abaixo das curvas no Ensaio 01

Tempo (min)	Temperaturas da ISO 834 (°C)	Temperaturas do Forno Ensaio 01 (°C)	Erro percentual
1	352.0	199.7	44.5%
2	448.3	332.9	37.7%
3	506.5	436.4	30.0%
4	548.3	521.6	23.3%
5	580.9	589.5	17.7%
6	607.7	615.1	13.1%
7	630.4	619.4	11.4%
8	650.1	653.4	9.2%
9	667.6	666.2	8.3%
10	683.2	660.6	7.1%
20	786.2	739.9	5.3%
30	846.7	823.4	4.4%
40	889.7	856.2	3.7%
50	923.0	894.8	3.4%
60	950.3	949.7	3.0%
70	973.4	970.9	2.7%
80	993.3	968.2	2.6%

Tabela 3.6 - Diferença percentual entre as áreas abaixo das curvas no Ensaio 03

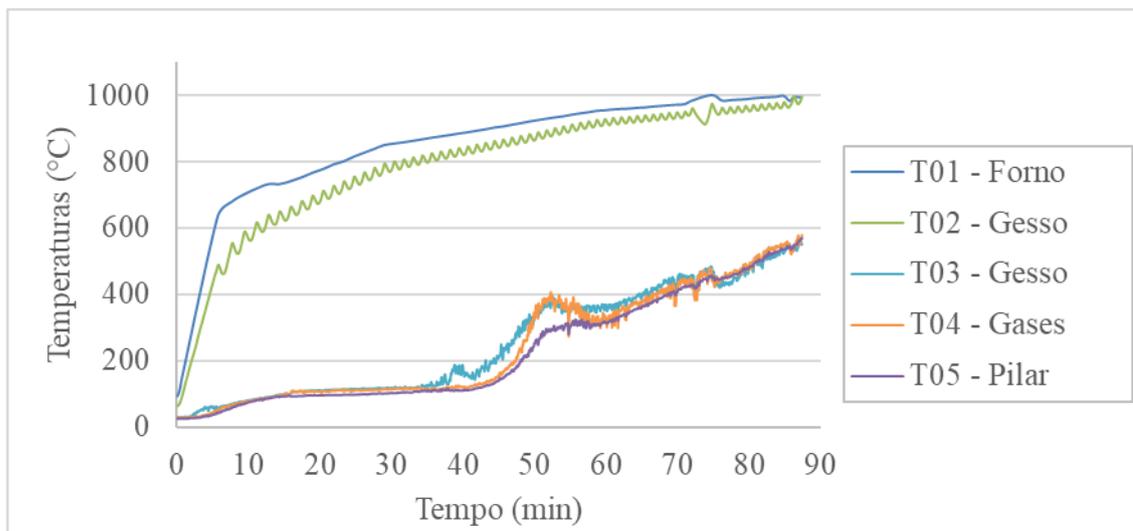
Tempo (min)	Temperaturas da ISO 834 (°C)	Temperaturas do Forno Ensaio 03(°C)	Erro percentual
1	352.0	200.4	39.2%
2	448.3	323.9	36.2%
3	506.5	412.2	30.6%
4	548.3	491.8	25.4%
5	580.9	557.2	20.8%
6	607.7	614.5	16.7%
7	630.4	627.4	13.2%
8	650.1	641.9	11.7%
9	667.6	665.8	9.8%
10	683.2	684.9	8.9%
20	786.2	764.6	5.8%
30	846.7	848.2	4.7%
40	889.7	874.2	3.8%
50	923.0	921.0	3.2%
60	950.3	952.5	2.6%
70	973.4	984.3	2.1%
80	993.3	996.4	1.9%

A norma ISO 834 (2014) traz critérios diferentes ao da norma brasileira para o cálculo dos erros percentuais (*de*) entre as áreas abaixo das curvas em função do tempo (*t*) em minutos, são eles:

- $de \leq 15 \%$ para $5 < t \leq 10$;
- $de = 15 - 0,5 (t - 10) \%$ para $10 < t \leq 30$;
- $de = 5 - 0,083 (t - 30) \%$ para $30 < t \leq 60$;
- $de = 2,5 \%$ para $t > 60$;

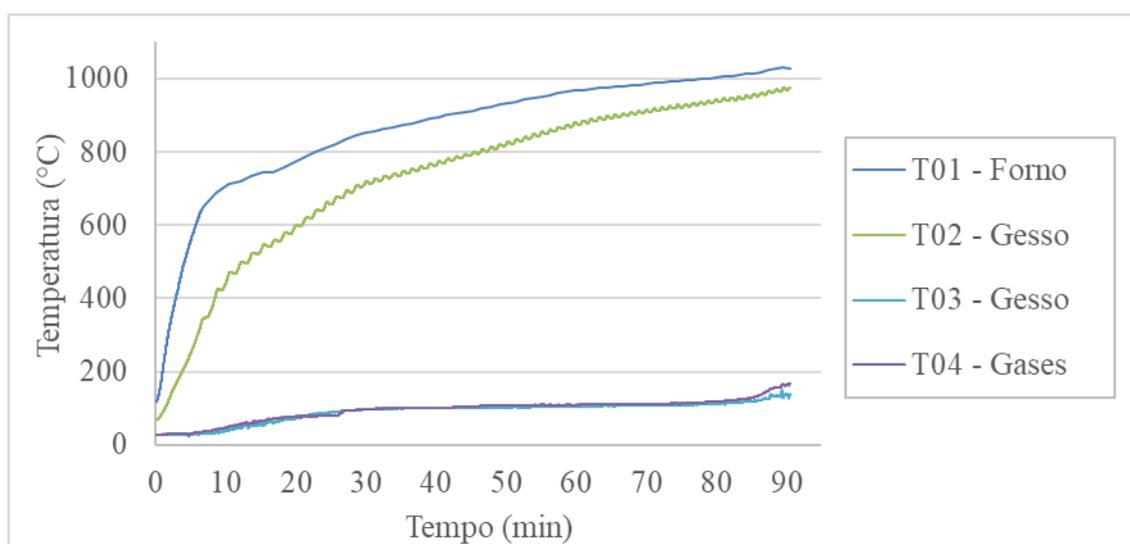
As curvas desenvolvidas pelo forno só atendem aos critérios ISO 834 (2014) no tempo entre 10 e 50 minutos de ensaio. A Figura 3.9 apresenta as temperaturas desenvolvidas no pilar de aço no Ensaio 01. A Figura 3.10 apresenta as temperaturas desenvolvidas no pilar de aço no Ensaio 03.

Figura 3.9 - Temperaturas desenvolvidas no Ensaio 01



Observa-se que a temperatura da parte interna do gesso se mantém abaixo dos 200 °C no período de tempo compreendido entre 0 e 40 minutos. A partir do momento em que o gesso começa a fissurar, as temperaturas internas à proteção sofrem um ganho mais acentuado até que haja a ruptura da coluna de aço. A Figura 3.9 também indica que as temperaturas aferidas com os termopares 03, 04 e 05 são próximas o suficiente para uma consideração aproximada de fluxo de calor por condução.

Figura 3.10 - Temperaturas desenvolvidas no Ensaio 03



Observa-se que a temperatura da parte interna do gesso se mantém abaixo dos 200 °C durante todo o ensaio.

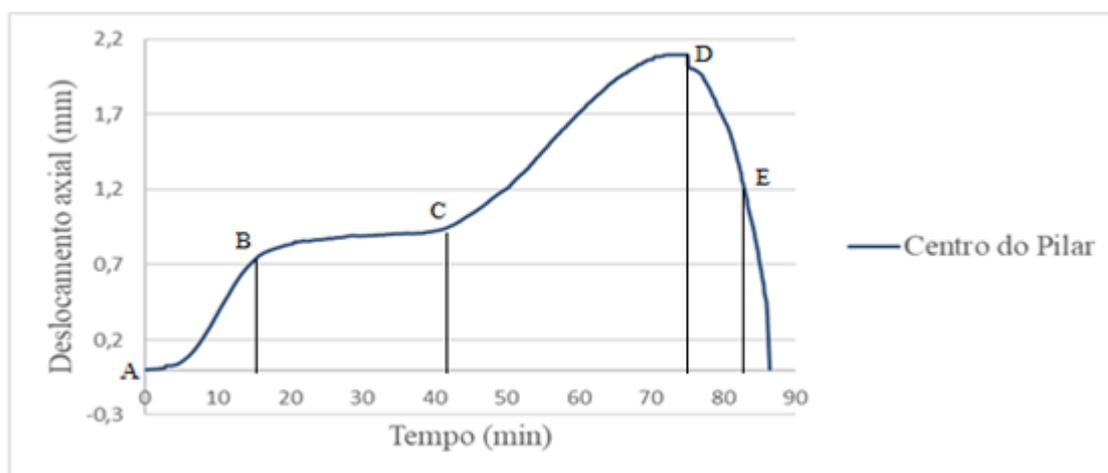
A partir do momento em que o gesso começa a fissurar, as temperaturas internas às proteções sofrem um ganho mais acentuado, entretanto foi necessário interromper o experimento devido aos problemas ocorridos no forno em ensaios anteriores quando o mesmo atingiu a temperatura de 1000 °C. O termopar que aferiu as temperaturas da coluna de aço (“T05”) apresentou problemas durante o Ensaio 03, por isto, da Figura 3.10, foram apresentadas apenas as temperaturas do termopar T04.

3.5.2 Deslocamento axial

Os deslocamentos axiais aferidos durante o Ensaio 01 são apresentados na Figura 3.11.

Observa-se que: devido ao aumento da temperatura da parte interior do gesso, o pilar sofre uma dilatação inicial (trecho A-B); o valor do deslocamento se mantém constante (trecho B-C); até o momento em que o gesso começa a fissurar (ponto C); o pilar de aço é aquecido mais rapidamente (trecho C-D); a dilatação ocorre até o momento em que o aço começa a perder suas propriedades mecânicas (ponto D); e sofre o encurtamento até o instante de falha (ponto E). Os deslocamentos foram obtidos pela média dos deslocamentos aferidos pelos dos dois LVDT’s posicionados nas placas conforme Figura 3.7.

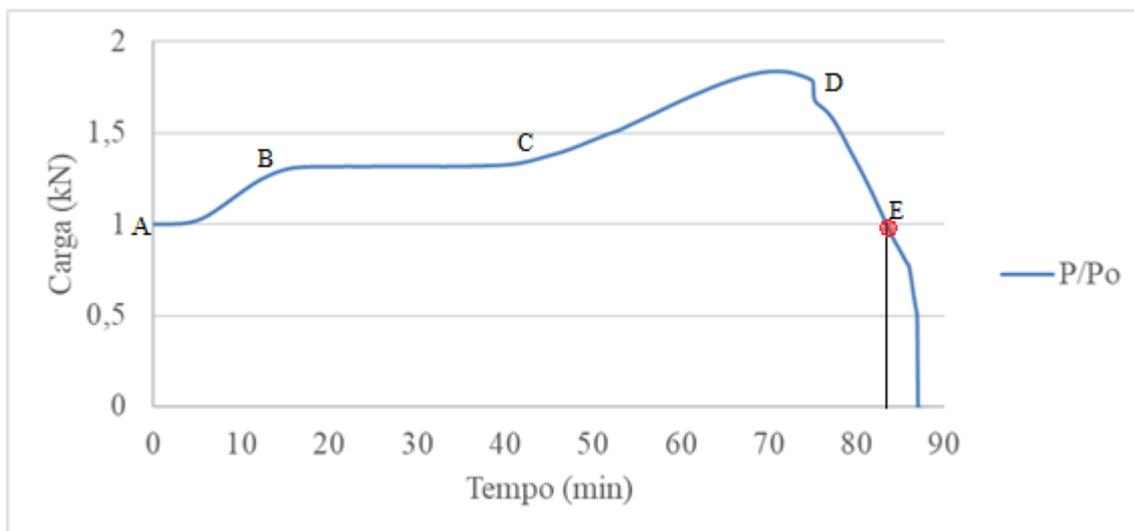
Figura 3.11 - Deslocamentos axiais do centro do Pilar



3.5.3 Forças de restrição

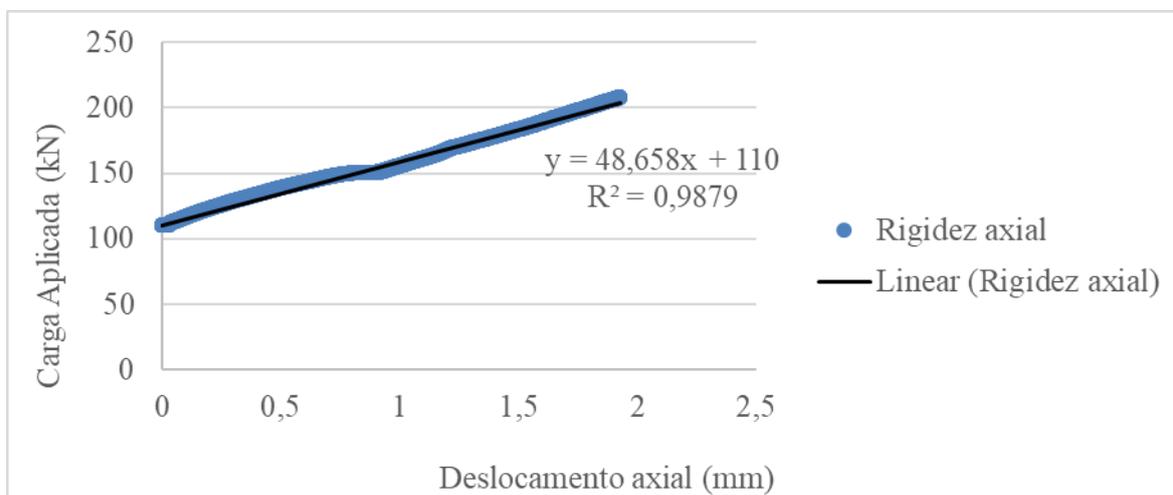
As forças de restrição (P/P_0) observadas no Ensaio 01 são apresentadas na Figura 3.11. Considera-se que o pilar restringido à dilatação térmica falha quando o valor adimensional de P/P_0 volta a ser igual a 1, mesmo critério adotado por Pires *et al.* (2012). A força inicial aplicada no pilar (P_0) foi de 110kN, valor correspondente à 40% da resistência do pilar ($N_{r,d}$) em situação ambiente segundo critérios de dimensionamento da ABNT NBR 14762 (2010).

Figura 3.12 - Forças de restrição desenvolvidas durante o Ensaio 01



A variação da carga aplicada no pilar em função do deslocamento axial permite o cálculo da constante de restrição através de uma aproximação linear. A constante elástica de restrição vale 48.6 kN/mm conforme Figura 3.13.

Figura 3.13 - Constante de rigidez axial observada no Ensaio 01



As forças de restrição se mantêm constantes enquanto a temperatura da parte interna do gesso não sofre grandes alterações, como pode ser visto na Figura 3.12. A partir do momento em que a parte interna do gesso, e conseqüentemente o pilar, começam a aquecer, há um aumento das forças de restrição, onde atinge o a razão máxima de 1,83. A partir desse fato aconteceu a degradação das propriedades mecânicas do aço e a força de compressão inicial é alcançada. Comportamento similar é observado para pilares sem revestimento de proteção contra fogo, como relatado em Costa (2013) e Pires *et al.* (2012).

Ressalta-se que o maior valor encontrado por Costa para razão P/P_0 para o pilar com nas mesmas condições de carga e de restrição foi de 1,76.

3.5.4 Tempo de falha

Segundo critério utilizado na literatura para pilares restringidos, um pilar falha quando a razão P/P_0 , advinda das forças de restrição à dilatação térmica, volta a valer 01 (PIRES, 2013; COSTA, 2013; CRAVEIRO, RODRIGUES e LAIM, 2015). Dos resultados obtidos no Ensaio 01, observou-se que este valor foi atingido no tempo de 83 min, conforme Figura 3.12. Segundo os critérios de falha sugeridos pela ISO 834 (2014), onde o pilar falha quando a deformação axial atinge o valor de $L/100$ ou a taxa de deslocamento axial atinge o valor de $3L/1000$, tempo de falha foi de 87 min, quando a taxa de deslocamento axial máxima foi alcançada.

3.5.5 Modo de flambagem

Verificou-se que ocorreu a flambagem local do perfil associada à global. Fato coerente com o dimensionamento feito pelo método da resistência direta (MRD), onde a carga de crítica para a ocorrência dos dois nodos de flambagem é a mesma.

Figura 3.14 - Pilar na configuração deformada após o Ensaio 01



(a)



(b)

4 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO SEM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

O modelo numérico desenvolvido tem por objetivo reproduzir os pilares avaliados por Costa (2013) em seu programa experimental. Com a validação dos resultados o modelo será aplicado aos pilares revestidos contra fogo.

No experimento, os exemplares ensaiados tinham 2,00 m de comprimento. A seção transversal composta por dois perfis do tipo U enrijecido 100 x 50 x 17 x 3 mm soldados formando uma seção fechada, conforme Figura 2.1. Decidiu-se por calibrar o modelo com os pilares que receberam o carregamento de 110 kN, correspondente a 40% da resistência característica do pilar a compressão em situação ambiente, e sem dilatação restringida. Os experimentos realizados por Costa (2013) foram mostrados na Tabela 2.1.

O *software* Abaqus permite que a modelagem numérica seja feita com elementos finitos bidimensionais (tipo casca) ou tridimensionais (tipo sólido). O mesmo permite uma análise termomecânica sequencial, da mesma forma que foi feito por Pires *et al.* (2012). Esta estratégia apresenta resultados muito semelhantes à análise acoplada com a vantagem de ter um menor tempo de processamento. Primeiramente o problema térmico é resolvido. As temperaturas no perfil de aço obtidas nesta etapa, são utilizadas na etapa subsequente onde o problema mecânico é analisado. Ou seja, as temperaturas no perfil são saídas no modelo térmico e entrada do modelo mecânico.

As propriedades térmicas do aço usadas na simulação foram: coeficiente de dilatação térmica, condutividade e calor específico. As propriedades mecânicas introduzidas no *software* foram: densidade, comportamento elástico e comportamento plástico variando segundo a ABNT NBR 14323 (2013). Para a redução das propriedades mecânicas, a norma brasileira traz dois coeficientes, um considerando que o perfil não é sujeito à flambagem local e outro para perfis sujeitos à flambagem local, nomeados respectivamente de $k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$.

O método da resistência direta apresentado na norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço de chapa fina em situação ambiente ANBT NBR 14762 (2010) sugere que o perfil de seção fechada está sujeito à flambagem local, entretanto, durante os ensaios conduzidos por Costa (2013) não foi possível distinguir qual modo de falha ocorreu primeiro, e foi relatado que o modo de flambagem principal foi a flambagem global. Por esse motivo, na modelagem numérica, os dois coeficientes de redução das propriedades mecânicas foram analisados.

4.1 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

O modelo térmico consiste em uma análise de transferência de calor através dos mecanismos da radiação, convecção e da condução. Para esses mecanismos foram adotados os valores sugeridos pela ABNT NBR 14313 (2013), apresentados na Tabela 4.1.

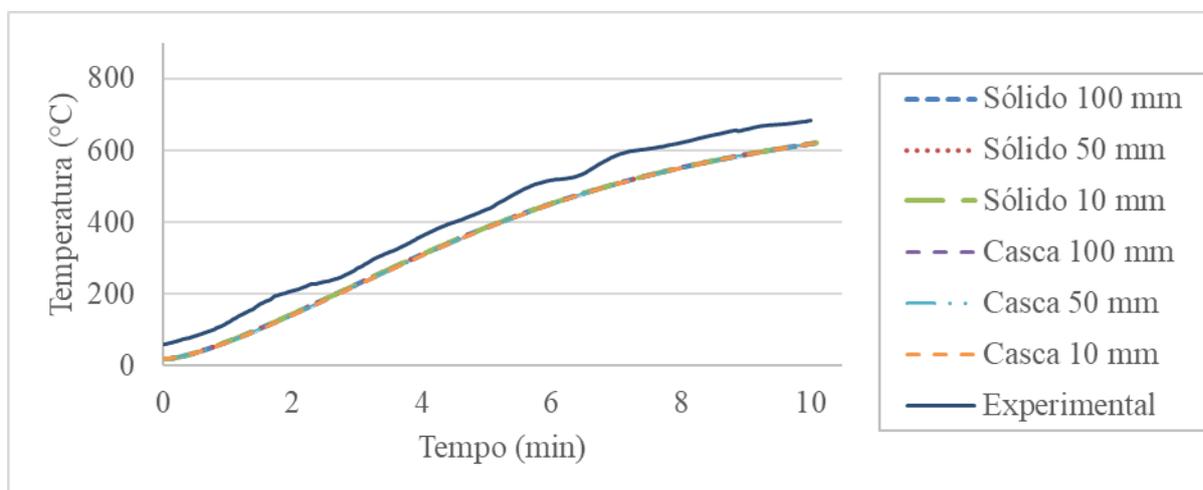
Tabela 4.1 - Parâmetros do modelo térmico

Parâmetro	Valor	Unidade
Coefficiente de transferência de calor por convecção (h_c)	25	W/m ² K
Fator de configuração da radiação (ϕ_r)	1	-
Constante de Stephan-Boltzman (σ)	5.64x10 ⁴	W/m ² K ⁴
Temperatura do Zero absoluto (θ^z)	-273	°C
Emissividade do Aço (ϵ_m)	0.7	-
Emissividade do Fogo (ϵ_f)	1	-
Temperatura Inicial (θ^0)	20	°C

Fonte: Adaptado de Pires (2013)

Na análise térmica, tanto para os modelos do tipo casca quanto os do tipo sólido o pilar foi discretizado em elementos finitos com a maior dimensão medindo 10, 50 e 100 mm. Os elementos tipo casca utilizados foram paralelogramos com interpolação quadrática com 8 nós, (chamado de DS8 pelo programa). Os elementos sólidos utilizados foram prismáticos, também de ordem quadrática com 20 nós (chamado de SR8 pelo programa). As temperaturas desenvolvidas no pilar mostraram resultados com diferenças de resultados inferiores a 10% para as diversas malhas analisadas, como pode ser visto na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Análise da convergência de malha na simulação térmica.



As temperaturas desenvolvidas nos modelos numéricos e experimentais mostraram uma boa correlação, a diferença entre eles não excedeu 100°C sendo e a diferença entre as análises se mantendo constante ao longo do tempo. As temperaturas aferidas experimentalmente se mostraram maiores que as obtidas na simulação numérica, analogamente ao comportamento descrito por Pires *et al.* (2012).

Da mesma forma que na análise térmica, na análise mecânica foram utilizados elementos com 10, 50 e 100 mm. Os elementos do tipo casca foram paralelogramos com interpolação de ordem quadrática de 8 nós (chamado de C3D20 pelo programa). Os elementos sólidos utilizados foram prismáticos também de ordem quadrática de 20 nós (chamado de C3D20 pelo programa). A convergência das malhas utilizadas pode ser vista nas Figuras 4.2 e 4.3, onde é feita a comparação com resultado experimental.

Figura 4.2 - Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo sólido.

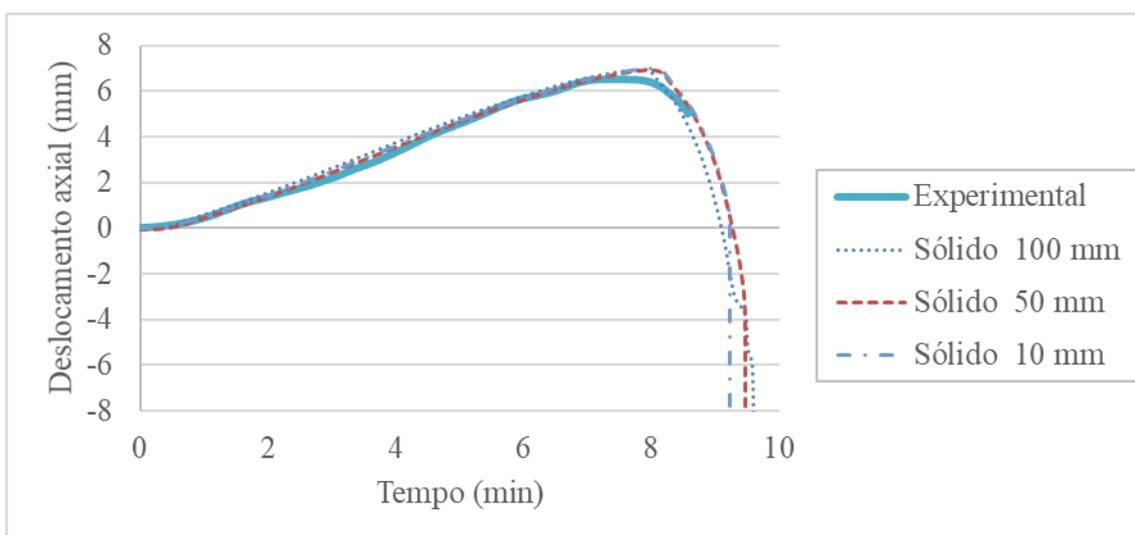
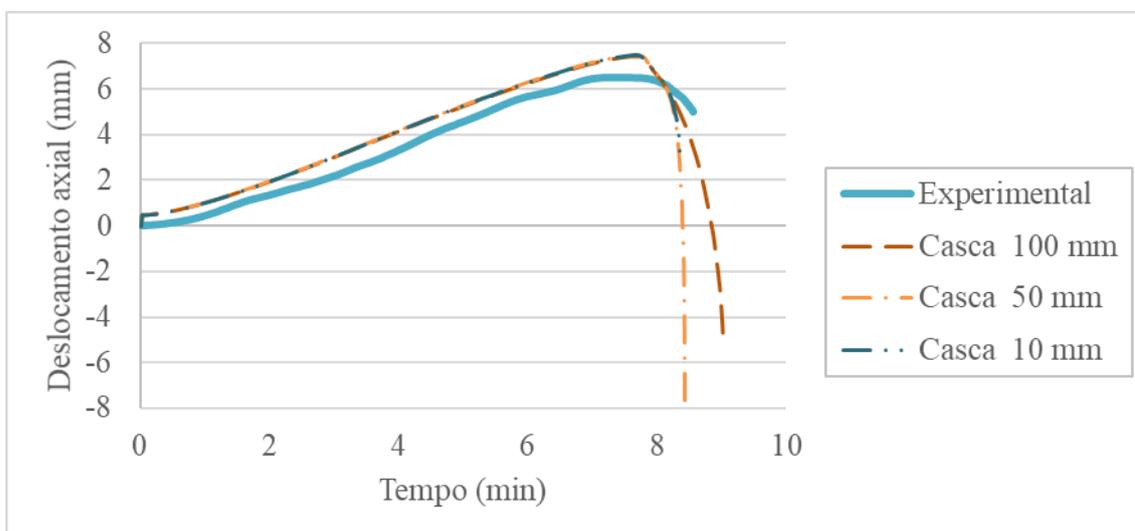


Figura 4.3 - Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo casca



Ao se utilizar as temperaturas do modelo térmico no modelo mecânico, obtém-se a resistência ao fogo, seguindo-se o critério proposto pela ISO 834 (2014), onde o pilar falha quando a deformação axial atinge o valor de $L/100$ (2 mm) ou a taxa de deslocamento axial atinge o valor de $3L/1000$, onde L é o comprimento do pilar, em metros.

Para propósitos práticos, comparando a convergência mecânica com o resultado experimental, mesmo a discretização com elementos de 100 mm mostrou um resultado acurado. Também se percebeu que tanto os elementos do tipo sólido quanto os elementos do tipo casca representaram bem o comportamento do pilar. Como resultado desta convergência, a partir deste ponto, decidiu-se por utilizar a malha de 50 mm para os demais estudos deste trabalho, pois o tempo de processamento foi satisfatório e os resultados já convergiram quando comparados com a discretização em elementos de 10 mm. A quantidade de elementos, de nós e o tempo total de processamento de cada modelo pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados numéricos dos modelos testados

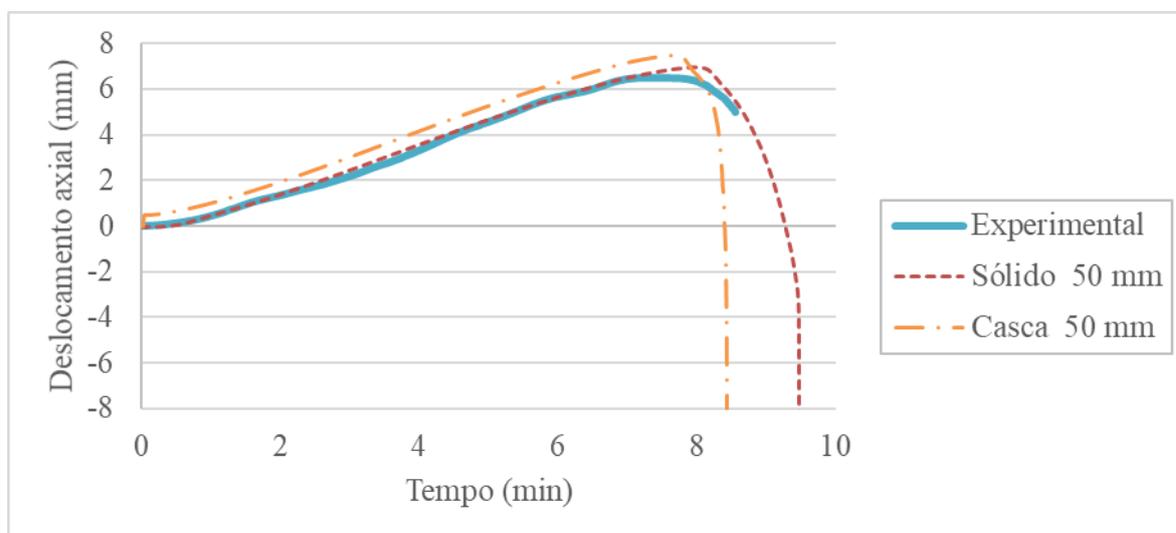
Análise		Malha					
		Casca			Sólido		
		10 mm	50 mm	100 mm	10 mm	50 mm	100 mm
Térmica	Número de elementos	10305	570	320	10630	720	400
	Número de nós	30917	1625	880	7899	4830	2710
	Tempo de processamento (s)	17759	2644	2829	2724	2271	2257
Mecânica	Número de elementos	10467	601	320	10630	720	400
	Número de nós	31307	1751	880	70899	4830	2710
	Tempo de processamento (s)	24578	1432	322	14461	791	355

4.2 ELEMENTO CASCA VS ELEMENTO SÓLIDO

A comparação entre os resultados obtidos com o elemento tipo casca e o elemento tipo sólido pode ser vista na Figura 3.4. A interpolação de ambos os elementos foi de ordem quadrática, o elemento casca foi um paralelogramo de 8 nós e o elemento sólido foi um prisma de 20 nós.

O elemento tipo casca pode ser utilizado nesta análise pois a espessura do perfil modelado é de 3 mm, fino o suficiente para se fazer a hipótese simplificadora de utilização de um elemento bidimensional. A diferença entre estes dois elementos é que como o elemento tipo casca é bidimensional, o usuário deve informar a espessura desejada para a análise, já o tipo sólido, por ser tridimensional tem a espessura de acordo com a discretização da malha. Como o elemento sólido é mais simples de ser modelado, gerando menos erros na geração de malha e se aproximando mais da curva de resultados experimentais, segue-se o estudo com a utilização de elementos do tipo sólido.

Figura 4.4 - Comparação elemento casca vs elemento sólido



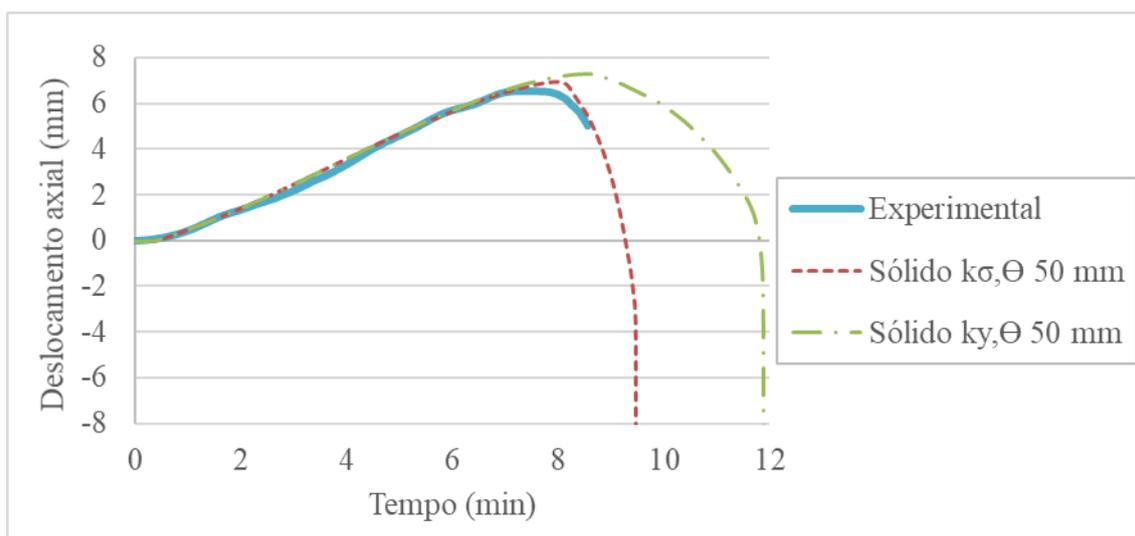
4.3 VERIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE REDUÇÃO PROPOSTOS PELA NORMA BRASILEIRA

A norma brasileira de perfis de aço ABNT NBR 14762 (2010) utilizada para verificar perfis de aço formados a frio recomenda o uso do MRD para a definição do modo de flambagem que pode ocorrer primeiro, se é o modo de flambagem local, global ou distorcional. Para as seções fechadas deste estudo, a carga para ocorrência da flambagem local e global foi a mesma, não ocorrendo flambagem distorcional.

Nos experimentos conduzidos por Costa (2013) não foi possível distinguir qual o primeiro modo de falha ocorrido. Por esse motivo verificou-se numericamente qual coeficiente de redução de propriedades mecânicas apresentado pela norma ANBT NBR 14323 (2013) se aproximava mais dos resultados experimentais: $k_{y,\theta}$ ou $k_{\sigma,\theta}$.

Os dois coeficientes apresentados pela norma estão relacionados com o modo de falha do elemento estrutural, ou seja, $k_{y,\theta}$ é recomendado para seções não sujeitas à flambagem local enquanto que $k_{\sigma,\theta}$ é recomendado para perfis sujeitos à flambagem local. Os resultados observados com a variação deste coeficiente podem ser vistos na Figura 4.5. Observa-se que o modelo com o coeficiente $k_{\sigma,\theta}$, para perfis sujeitos à flambagem local foi o que mais se aproximou do resultado experimental.

Figura 4.5 - Resultados obtidos numericamente com os fatores de redução para flambagem local e global propostos pela ABNT NBR 14323:3013

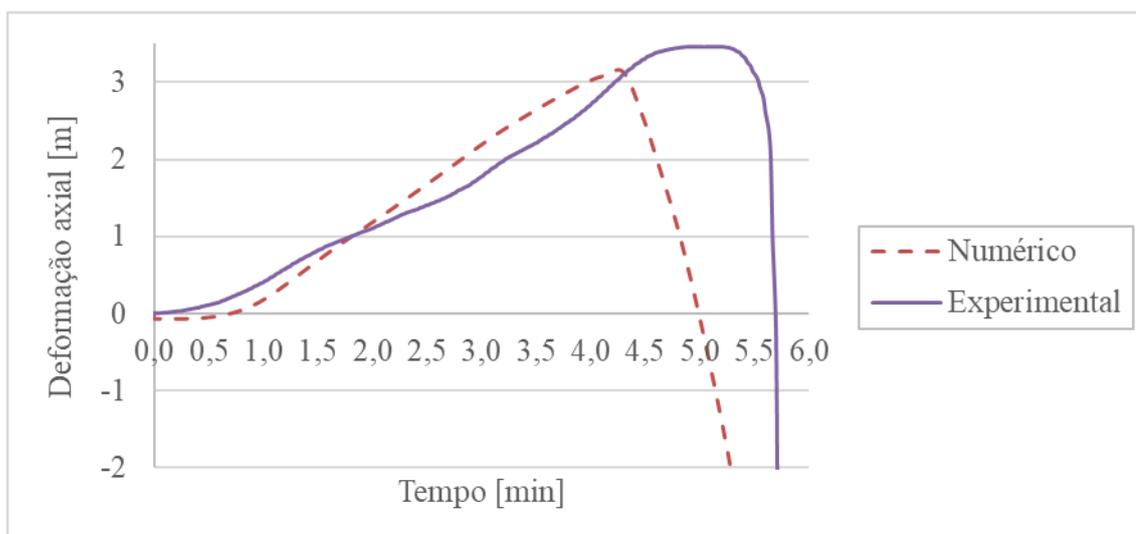


Ressalta-se que nas análises de convergência de malha e na comparação entre o elementos tipo casca com o elemento tipo sólido anteriormente apresentadas neste trabalho foi utilizado o coeficiente de redução $k_{\sigma,\theta}$, para perfis sujeitos à flambagem local.

4.4 CASO COM CARREGAMENTO DE 80% DA CAPACIDADE RESISTENTE

Utilizando-se o mesmo modelo desenvolvido neste Capítulo, foi feita a comparação com os ensaios realizados por Costa (2013) aplicando-se 80% da carga do perfil (220kN). O tempo de falha obtido no modelo numérico pelo critério da ISO 834 (2014) foi de 5,6 min, já no experimento o tempo de falha apresentado por Costa (2013) foi de 5,0 min, conforme Figura 4.6.

Figura 4.6 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o pilar carregado com 220 kN



O modelo numérico prevê com boa precisão o tempo de falha dos resultados experimentais, mas o comportamento não é tão bom quanto o caso com 40% da capacidade de carga (110kN), mostrado na Figura 4.5, provavelmente devido ao carregamento elevado ser aplicado em um curto período de tempo, gerando esforços muito elevados no pilar de aço.

4.5 MODO DE FLAMBAGEM

O modo de flambagem do pilar é predominantemente local, mesmo modo observado no modelo experimental retratado por Costa (2013), conforme Figura 4.7, e na simulação numérica, conforme Figura 4.8.

Figura 4.7 - Pilar na configuração deformada após experimento.
Fonte: Costa (2013)

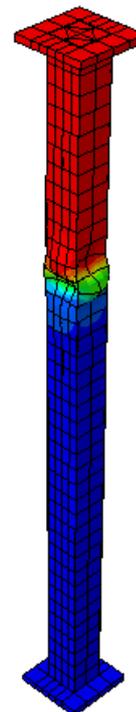


(a)



(b)

Figura 4.8 - Pilar na configuração deformada após simulação numérica.



5 ESTUDO NUMÉRICO DOS PILARES COM REVESTIMENTO TÉRMICO

Esta seção apresenta o modelo tridimensional, desenvolvido via Abaqus (2011), calibrado a partir da comparação dos resultados obtidos por Costa (2013), para reproduzir os ensaios envolvendo os pilares com revestimento térmico de placas de gesso, apresentados no Capítulo 3. Da mesma forma que apresentado no Capítulo 4 a análise termo mecânica é feita de forma sequencial não acoplada a fim de evitar problemas de convergência. (PIRES, 2013). O elemento finito utilizado foi o sólido de 50 mm com 20 nós. O coeficiente para redução das propriedades mecânicas do aço foi o $k_{\sigma,\theta}$, coeficiente indicado para perfis sujeitos à flambagem local.

5.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O modelo térmico foi desenvolvido a fim de reproduzir as temperaturas obtidas no Ensaio 01. O fluxo de térmico entre a parte externa do gesso e o pilar de aço foi aferido com os termopares indicados na Figura 3.7. O modelo foi criado no *software* Abaqus no modo *Standard*, onde são utilizadas equações para solução de problemas estáticos ou de baixa velocidade. Não foi utilizado o pacote computacional *capa* do *software* de aplicar a análise *Computational Fluid Dynamics* (CFD) de operação, onde são empregadas equações para solução de problemas em fluidos.

O fluxo de temperaturas no gesso foi modelado de três formas:

- MODELO 01: onde as temperaturas na face interna do gesso foram obtidas com a modelagem a que representa a situação real do ensaio, conforme Figura 5.1.
- MODELO 02: onde placa de gesso foi analisada isoladamente, conforme Figura 5.2.
- MODELO 03: onde considerou-se a placa de gesso encostada no pilar para que o fluxo de calor entre a proteção e o perfil de aço fosse feito por meio da condução térmica, conforme sugerido por Silva (2005).

Foi feita ainda outra hipótese de transferência de calor, com a mesma configuração do MODELO 01 onde se utilizou a ferramenta “*cavity radiation*” do Abaqus, mas a temperatura do pilar não sofreu variação e esses resultados não serão apresentados.

Figura 5.1 - MODELO 01

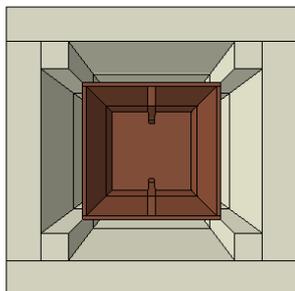
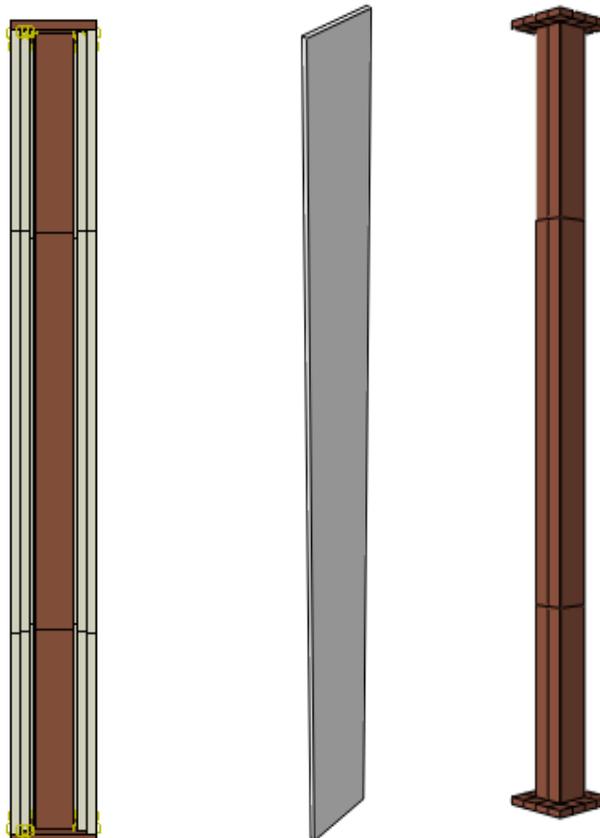


Figura 5.2 - MODELO 02



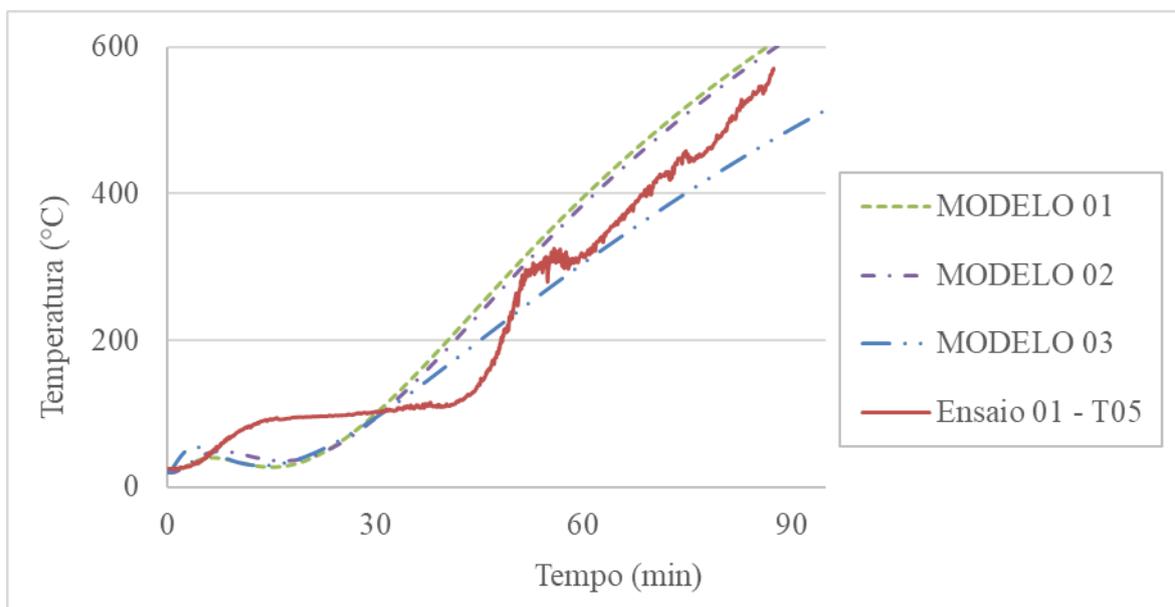
Quando o *software* é operado no modo *Standard*, ele não é capaz de transmitir as temperaturas no espaço vazio entre o gesso e o pilar, por isso as temperaturas da face interna do gesso foram aplicadas manualmente no pilar de aço. Como existe um espaço entre o pilar de aço e a parte interna do gesso no MODELO 01 e 02, a estratégia adotada foi dividir o modelo térmico em duas etapas:

- (i) incidência dos fenômenos de radiação e convecção na parte externa do gesso, com esses fenômenos sendo aplicados seguindo-se a curva do incêndio padrão da norma ISO 834 (2014); e
- (ii) incidência dos fenômenos de radiação e convecção das temperaturas obtidas na face interna do gesso no pilar de aço.

Na etapa (ii), a radiação e a convecção foram aplicadas diretamente no pilar, entretanto o aquecimento da coluna por esses fenômenos é feita através da leitura das temperaturas da face interna do gesso na etapa (i). Como a placa de gesso não está em contato com o mesmo e a condutividade térmica do ar é muito inferior quando ao de um meio sólido, o fenômeno da condução foi desprezado.

Após o processamento da etapa (ii) foi feita a leitura da temperatura no centro da coluna, onde a distribuição de temperaturas ao longo da seção transversal é constante. Observou-se que para os modelos 01 e 02 as temperaturas foram iguais ao longo do tempo, não sendo influenciadas na simulação dos *softwares* pelo fato do pilar estar confinado dentro do gesso no MODELO 01. A comparação entre as temperaturas obtidas no pilar de aço para os três modelos e o resultado experimental pode ser vista na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Comparação das temperaturas do centro do pilar nos modelos numéricos



Observa-se que para a mesma propriedade do gesso empregada nos três modelos, os resultados obtidos com o MODELO 01 e MODELO 02 são praticamente os mesmos. Os resultados obtidos com o MODELO 03, onde a transferência de calor é feita por condução, são ligeiramente inferiores ao resultado experimental, fato que pode indicar que a consideração, na simulação numérica, da placa encostada no pilar está contra a segurança.

A partir da observação desta análise, as demais simulações do trabalho foram feitas conforme o MODELO 02 pelo fato deste ter a modelagem mais simples e gerar menos erros de convergência na análise mecânica.

5.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

As propriedades térmicas e mecânicas utilizadas para o aço seguem as recomendações da ABNT NBR 14323 (2013).

Os dados para as propriedades dos materiais de revestimento contra fogo geralmente são encontrados na literatura por faixas de valores (Tabela 2.6), entretanto devido a grande variação na produção do gesso, o ideal é que se tenha a caracterização do mesmo antes da sua utilização como revestimento contra fogo.

Como o gesso utilizado no programa experimental não tinha suas propriedades caracterizadas pelo fabricante, no modelo numérico utilizou-se as propriedades sugeridas por Feng, Wang e Davies (2003.c) e por Gerkeen (2007).

Foi também feita uma calibração com base nos estudos de Wakili & Hugi (2009), variando-se a densidade, a condutividade térmica e a emissividade do gesso, de forma a encontrar as propriedades que mais se aproximassem do resultado experimental. As propriedades utilizadas nas simulações numéricas estão resumidas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades do gesso utilizadas nos modelos numéricos

Referência	Densidade (kg / m³)	Condutividade Térmica (W / m °C)	Calor específico (J / Kg °C)	Emissividade
[CA] Wakili & Hugi (2009)	1000	0,15	2000	0,8
[GE] Gerkeen (2007)	800	0,20	1700	0,8
[FE] Feng, Wang e Davies. (2003.c)	727,1	0,200 a 10°C 0,218 a 150 °C 0,103 a 155°C 0,3195 a 1200°C	925,04 a 10°C 941,50 a 95°C 24572,32 a 125°C 953,14 a 155°C 1097,5 a 900°C	0,8

5.3 RESULTADOS TÉRMICOS

Nas figuras apresentadas nesta seção, [GE] representa os resultados obtidos com as propriedades do gesso conforme Gerkeen (2007), [CA] caracteriza aos resultados obtidos com as propriedades do gesso obtidas por meio de calibração com os resultados experimentais segundo estudo de Wakili & Hugi (2009). [FE] representa os resultados obtidos com as propriedades do gesso fornecidas por Feng, Wang e Davies (2003.c).

5.3.1 Face externa do gesso

Esta seção mostra a comparação entre os resultados obtidas na face externa da placa de gesso onde incidiram diretamente os fenômenos de radiação e convecção segundo a curva da ISO 834 (2014). Nesta etapa é fundamental que as características do material fornecidas ao software sejam compatíveis com o material utilizado no experimento.

A Figura 5.4 mostras a comparação entre os resultados numéricos e o Ensaio 01, a Figura 5.5 apresenta a comparação com os resultados do Ensaio 03.

Figura 5.4 - Comparação das temperaturas da face externa do gesso para o Ensaio 01

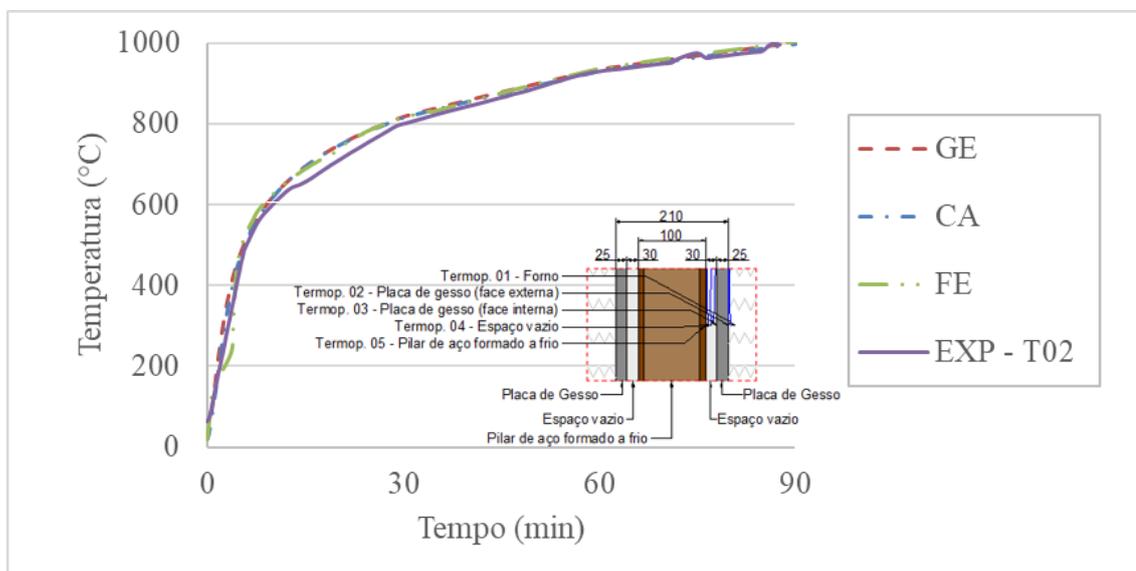
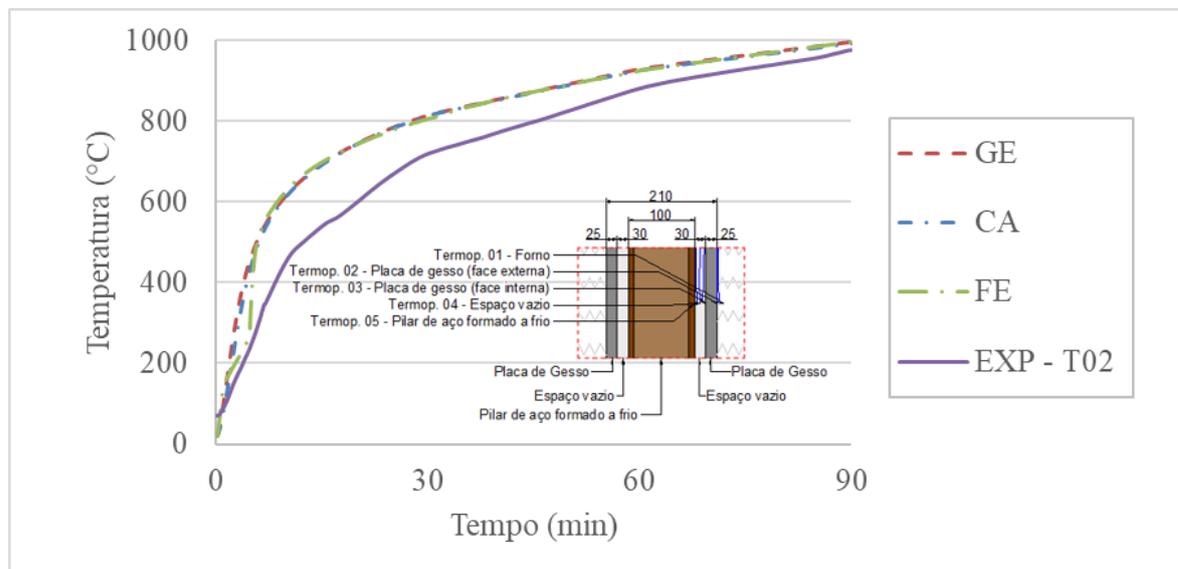


Figura 5.5 - Comparação das temperaturas da face externa do gesso para o Ensaio 03



Da análise dos resultados apresentados nas figuras anteriores, observa-se que:

- todas as propriedades consideradas no modelo numérico têm resultados muito semelhantes e são capazes de reproduzir o comportamento experimental das temperaturas da face externa da placa de gesso;
- as temperaturas do modelo numérico são superiores às observadas experimentalmente, possivelmente devido a umidade da placa de gesso que não é considerada no modelo numérico; e
- a diferença de temperaturas não é superior à 100°C para o Ensaio 01 e não superior à 200 °C para o Ensaio 03. A diferença é mais acentuada no Ensaio 03 possivelmente pelo fato da placa do Ensaio 03 ser mais espessa e acumular mais água.

5.3.2 Face interna do gesso

Esta seção mostra a comparação entre os resultados obtidas na face interna da placa de gesso. A transferência do calor da face externa para a face interna é feita automaticamente pelo *software* considerando-se o mecanismo da condução de calor num meio sólido. A Figura 5.6 mostra a comparação entre os resultados numéricos e o Ensaio 01, já a Figura 5.7 apresenta a comparação com os resultados do Ensaio 03.

Figura 5.6 - Comparação das temperaturas da face interna do gesso para o Ensaio 01

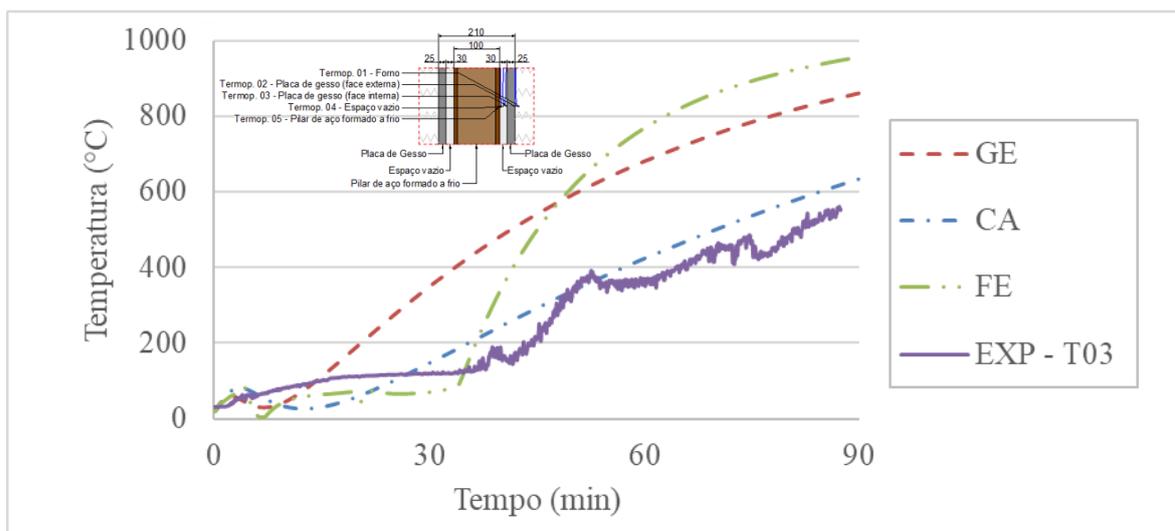
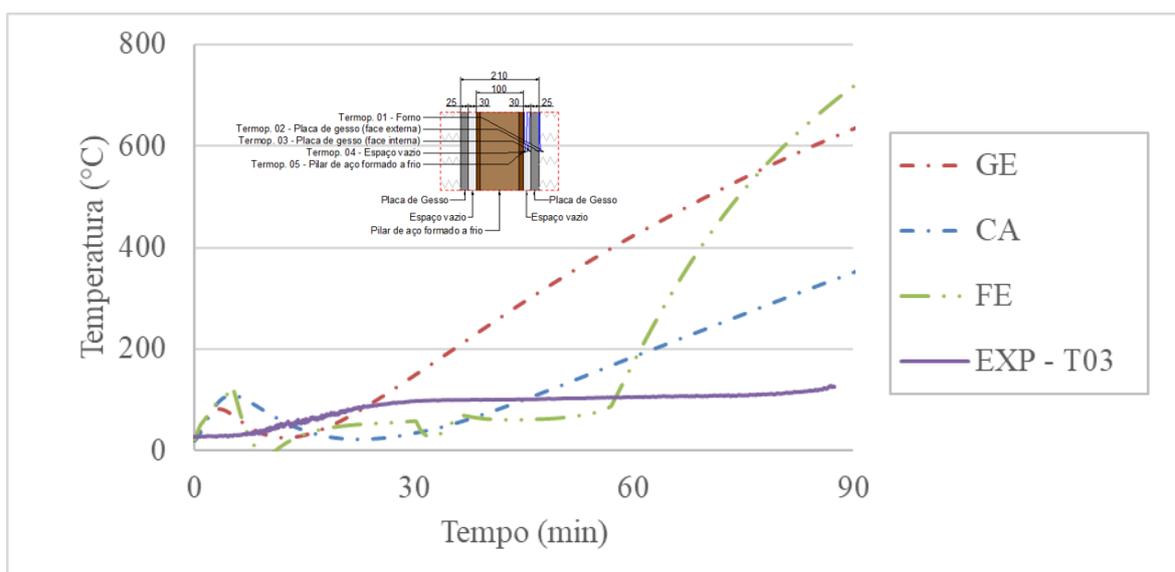


Figura 5.7 - Comparação das temperaturas da face interna do gesso para o Ensaio 03



Observa-se que:

- as propriedades [GE] não reproduziram bem as temperaturas desenvolvidas nos Ensaio 01 e Ensaio 03;
- com as propriedades [CA] foi possível obter uma melhor aproximação com o Ensaio 01; já para o ensaio 03 as temperaturas obtidas numericamente se afastam dos resultados experimentais; Tal fato indica que a adoção de propriedades térmicas constantes para a placa de gesso não é adequada para a reprodução do fluxo de calor por condução em um material com umidade.
- ao se adotar as propriedades térmicas do gesso sugeridas por Feng, Wang e Davies (2003.c), que variam conforme a temperatura do material, as temperaturas da face

interna do gesso se mantiveram aproximadamente constantes até o tempo de 30 minutos, da mesma forma que observado no Ensaio 01, entretanto após a fissuração do gesso foi observado um aumento gradativo das temperaturas traduzidas numericamente, mas com um comportamento que se distanciou bastante do experimento;

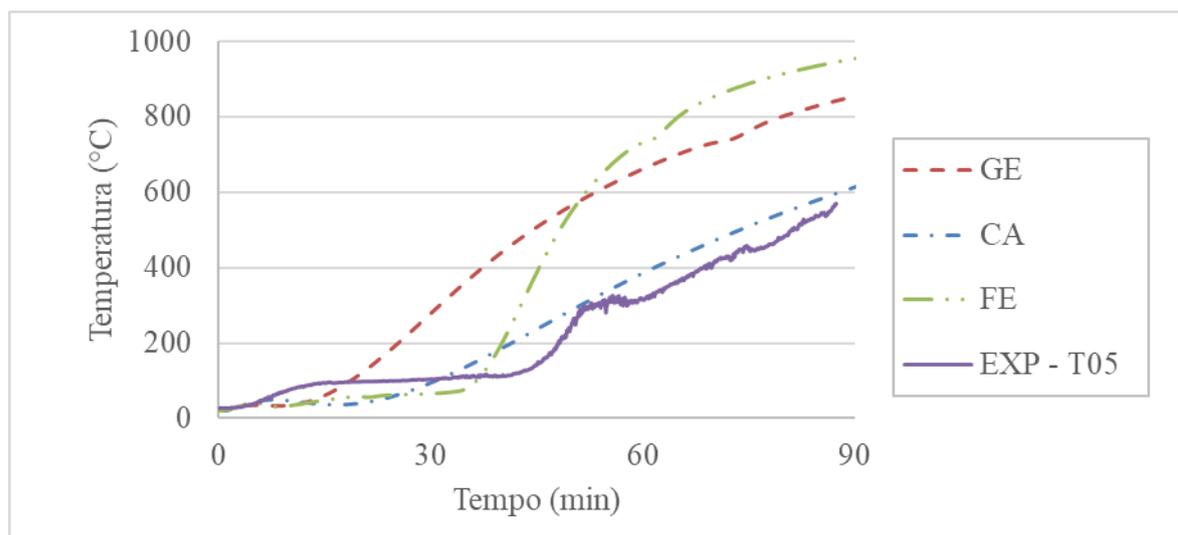
- na comparação com o Ensaio 03, as temperaturas do modelo numérico começaram a aumentar a partir dos 60 minutos, fato observado apenas após 90 minutos no Ensaio 03.

Essas observações levam a crer que simulações realizadas com as propriedades sugeridas por Feng, Wang e Davies (2003.c) estariam a favor da segurança, entretanto o dimensionamento da espessura da proteção de gesso não é econômico. Neste ponto se reafirma a importância da caracterização do material de revestimento para uma maior economia de projeto de revestimento de pilares de aço em situação de incêndio.

5.3.3 Pilar de aço

Através dos fenômenos da radiação e da convecção as temperaturas da face interna da placa de gesso foram aplicadas no pilar na etapa (ii). As comparações entre as temperaturas aferidas no Ensaio 01 e os modelos numéricos com as propriedades [GE], [CA] e [FE] podem ser vistas na Figura 5.8.

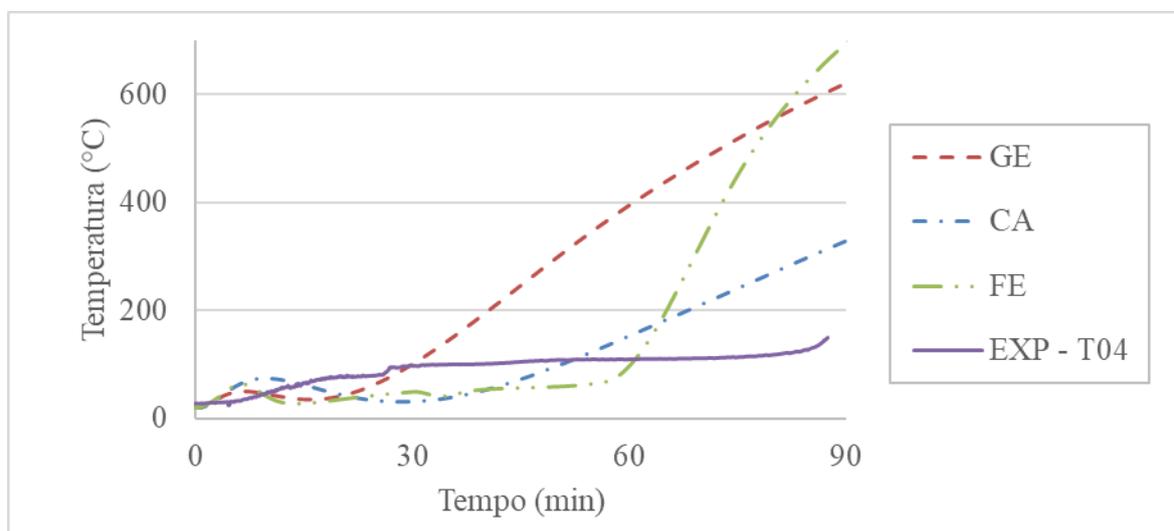
Figura 5.8 - Comparação das temperaturas no centro do pilar de aço para o Ensaio 01



Conforme afirmado no Capítulo 3, o termopar T05, soldado ao pilar, não funcionou perfeitamente durante a realização do Ensaio 03, entretanto a observação feita com a análise da Figura 3.9 nos permite utilizar o termopar 04 localizado no espaço vazio entre o a placa de

gesso e o pilar de aço para a comparação entre os resultados obtidos nos modelos numéricos e as temperaturas aferidas experimentalmente.

Figura 5.9 - Comparação das temperaturas do pilar de aço para o Ensaio 03



As observações da análise das Figura 5.8 e Figura 5.9 são semelhantes às observações feitas para as Figura 5.6 e Figura 5.7, ou seja:

- as propriedades térmicas [GE] não foram adequadas para a reprodução das temperaturas no Ensaio 01 nem no Ensaio 03;
- as propriedades [CA] conseguiram se aproximar bem dos resultados experimentais do Ensaio 01; já para o ensaio 03 as temperaturas obtidas numericamente se afastam dos resultados experimentais;
- as propriedades térmicas do gesso sugeridas por Feng, Wang e Davies (2003.c) se mantiveram aproximadamente constantes até o tempo de 30 minutos, da mesma forma que observado no Ensaio 01; e
- na comparação com o Ensaio 03, as temperaturas do modelo numérico começaram a aumentar a partir dos 60 minutos, divergindo do resultado experimental onde o aumento acontece somente após 90 minutos.

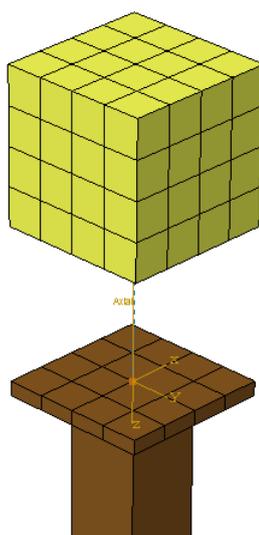
5.4 RESULTADOS MECÂNICOS

O modelo numérico desenvolvido para pilares sem revestimento contra fogo foi apresentado no Capítulo 4 deste trabalho e validado através da comparação com os resultados de Costa (2013). Neste Capítulo, o modelo numérico foi alterado através da inserção do revestimento para simular o Ensaio 01 do estudo experimental apresentado no Capítulo 3. A comparação entre o modelo numérico e o resultado experimental foi realizada apenas com o Ensaio 01, pois por falha da célula de carga, o Ensaio 03 foi feito apenas com o carregamento térmico.

A análise mecânica do pilar protegido foi feita da seguinte forma:

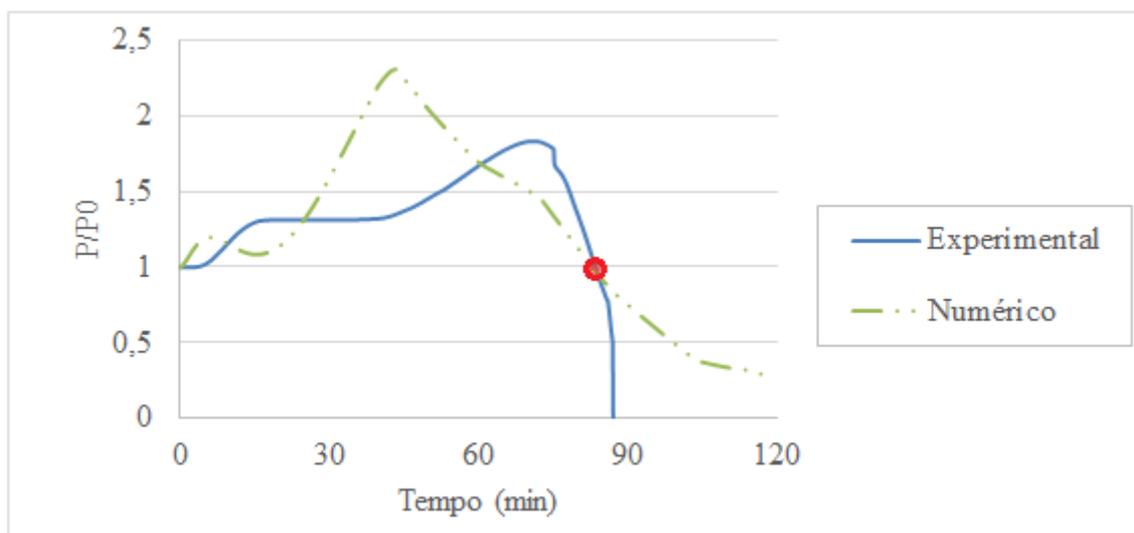
- o carregamento de 110 kN, correspondente à 40% da capacidade resistente do perfil em situação ambiente, foi aplicado no tempo de 1 segundo na placa de topo e se manteve constante durante toda a simulação;
- procede-se com a análise sequencial termomecânica, através da leitura dos *outputs* de temperatura do modelo térmico, que são dados de entrada do modelo mecânico
- as forças de restrição são aplicadas com a utilização de conectores, elementos do tipo barra apenas com liberdade no sentido axial, aos quais foi atribuída a constante de restrição observada no Ensaio 01, sendo a constante de restrição axial foi calculada pela aproximação linear apresentada na Figura 3.13.

Figura 5.10 - Aplicação da restrição axial no modelo numérico



O comportamento da variação das forças de restrição não foi o similar ao observado no Ensaio 01, conforme pode ser visto na Figura 5.11. Verifica-se, portanto, que o modelo mecânico para o pilar protegido com restrição à dilatação térmica ainda precisa ser aprimorado. Entretanto, é possível observar que o modelo numérico atingiu o critério de falha $P/P_0 = 1$ no mesmo tempo do modelo experimental. O tempo igual pode ser explicado pela variação das propriedades mecânicas do aço, já que as temperaturas encontradas no modelo numérico foram condizentes com os resultados experimentais.

Figura 5.11 - Comparação entre forças de restrição desenvolvidas no modelo experimental e numérico



6 VALIDAÇÃO DE MÉTODO NUMÉRICO POR COMPARAÇÃO COM MÉTODOS ANALÍTICOS

A fim de validar os resultados do modelo numérico desenvolvido para perfis com revestimento, nesta seção será feita uma análise do comportamento em situação de incêndio dos pilares de aço formados a frio com revestimento contra fogo de placas de gesso e de argamassa projetada. Esses materiais são comumente adotados na proteção de estruturas sujeitas ao fogo. Dessa forma, será apresentada uma comparação entre o modelo numérico proposto e o método simplificado da ABNT NBR 14323 (2013) e do EN 1993-1-2 (2005).

6.1 ANÁLISE TÉRMICA

As propriedades térmicas adotadas no modelo numérico proposto para os materiais de proteção estão na Tabela 6.1 e seguem as recomendações de Silva (2005) para a argamassa e Gerkeen (2007) para o gesso. Para que os resultados pudessem ser comparados com os métodos simplificados, considerou-se que as propriedades térmicas da proteção se mantiveram constantes ao longo do aquecimento e que entre a proteção e o perfil de aço não há perda de calor. As espessuras dos revestimentos analisados foram 10, 20, 30, 40 e 50 mm, para ambos materiais. Esse intervalo de valores contempla as espessuras comercialmente utilizadas para proteção de estruturas.

Tabela 6.1 - Propriedades térmicas dos materiais de proteção passiva

Material	Densidade (kg/m³)	Condutividade (J/kg°C)	Calor Específico (J/kg°C)
Gesso	800	0,20	1200
Blaze Shield II	240	0,15	2300

As Figuras 6.1 a 6.3 ilustram o modelo numérico aos 7200 segundos de simulação, com espessuras de revestimento adjacentes ao perfil de aço, respectivamente de 10, 30 e 50 mm. No modelo numérico, o contato entre os elementos da proteção e o perfil foi considerado do tipo “TIE”, simulando o contato perfeito, para que não houvesse perda de calor e a radiação e a convecção incidentes na proteção térmica fossem transferidas por condução para o aço (SILVA, 2005).

Figura 6.1 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 10 mm de espessura

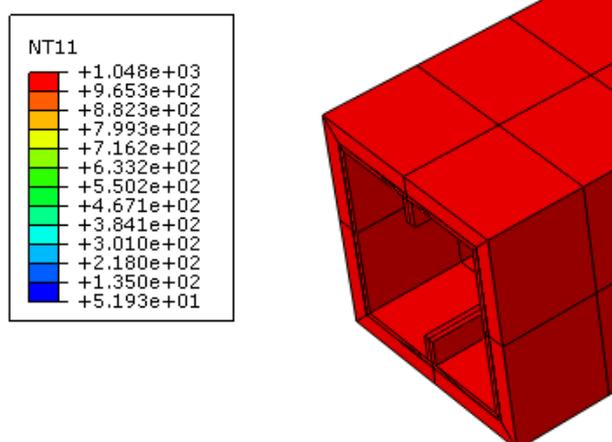


Figura 6.2 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 30 mm de espessura

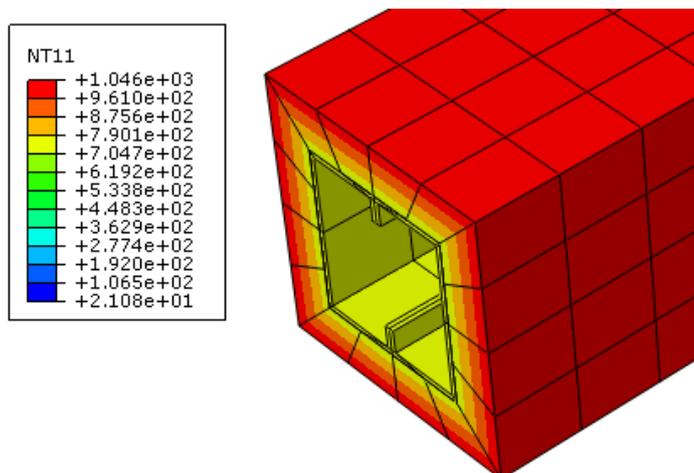
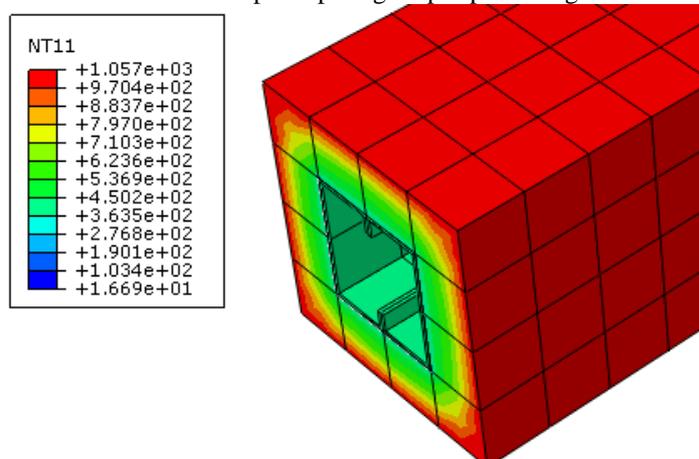


Figura 6.3 - Modelo numérico do perfil protegido por placa de gesso com 50 mm de espessura



As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam a comparação da evolução das temperaturas na parte central do pilar obtidas pelo modelo numérico e pelo método simplificado das normas. As temperaturas ao longo da seção transversal são constantes devido a pequena espessura do perfil de aço.

Figura 6.4 – Temperaturas na sessão central do pilar de aço com revestimento de placas de gesso

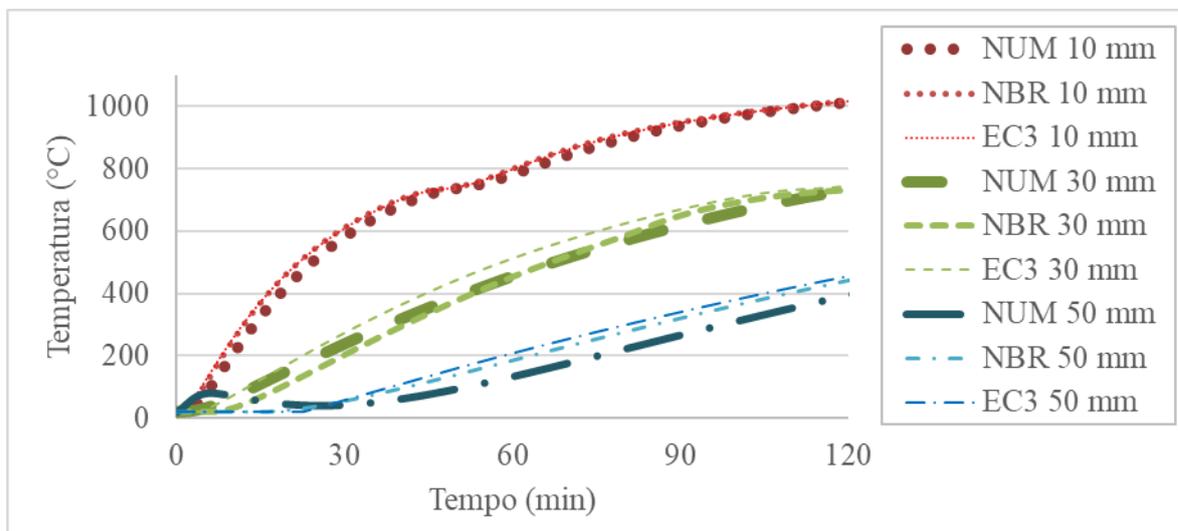
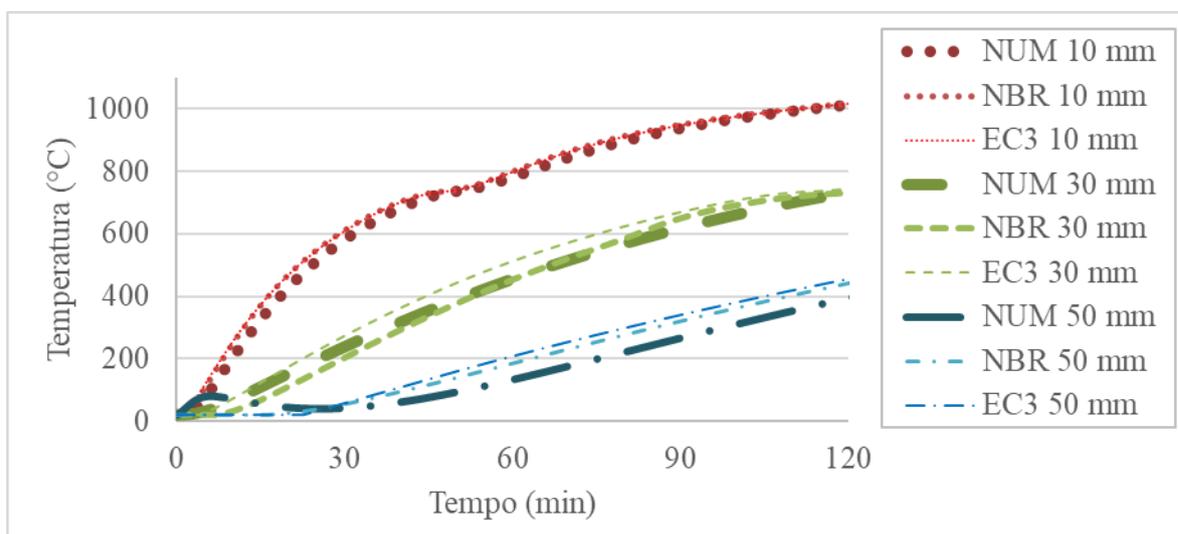


Figura 6.5 - Temperaturas na seção central do pilares de aço com revestimento de argamassa.



Observa-se que, para ambos os materiais, o desenvolvimento da temperatura do aço obtido numericamente tende a divergir dos métodos simplificados com o aumento da espessura do material de proteção. A divergência se acentua para o caso de 50 mm. Simplificações adotadas na dedução das equações do método simplificado podem justificar esta divergência para maiores espessuras. Essa observação leva ao questionamento da precisão do método simplificado para espessuras maiores de revestimentos contra fogo.

6.2 COMPARAÇÃO MECÂNICA

As Figuras 6.6 e 6.7 apresentam respectivamente o deslocamento axial dos pilares com revestimento de gesso e argamassa para as diferentes espessuras analisadas no modelo numérico. Os deslocamentos são da parte central da placa de topo do pilar. A análise do resultado mecânico, obtida pelo modelo numérico, permite, facilmente, a determinação da resistência ao fogo dos pilares através dos critérios de falha da ISO 834 (2014). Ou seja, o pilar falha quando ao deslocamento axial atinge o valor de $L/100$ ou a taxa de deslocamento axial atinge o valor de $3L/1000$, onde L é o comprimento do pilar. O modelo numérico não apresentou problemas de convergência para simular a parte mecânica.

Figura 6.6 - Deslocamento axial do modelo numérico para o pilar de aço com revestimento de placas de gesso

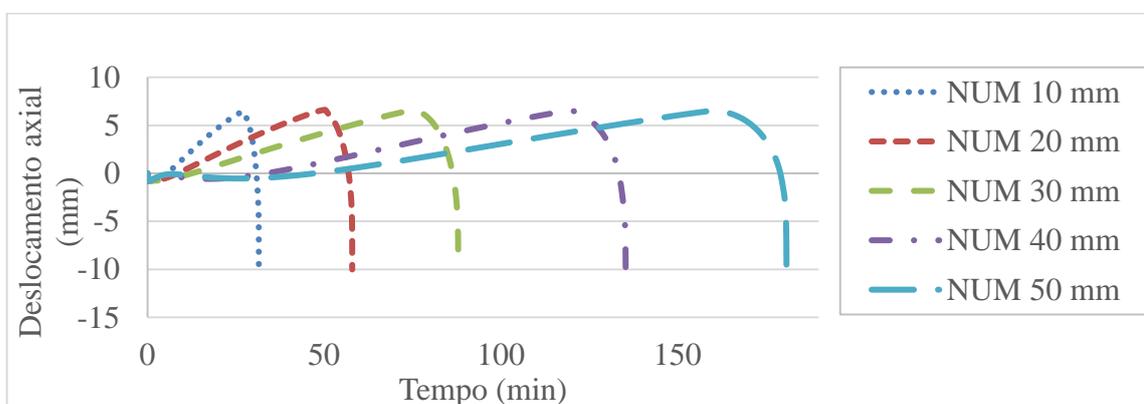
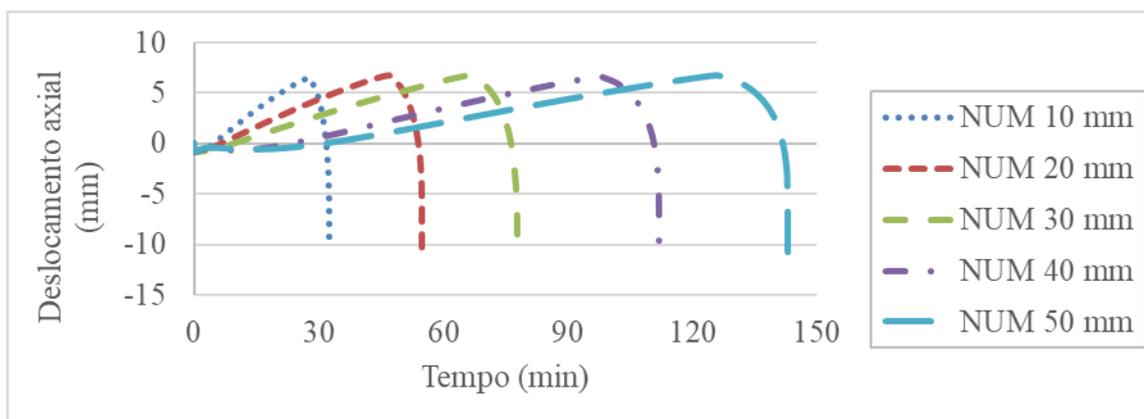


Figura 6.7 - Deslocamento axial do modelo numérico axial para o pilar de aço revestimento de argamassa



No anexo “E” do EN 1993-1-2 (2005) estão os critérios para determinação da RF para aços classe 04. Para estruturas de aço formadas a frio essa norma apresenta a temperatura crítica de 350°C , que para os casos apresentados na Tabela 6.2 acabou sendo o critério determinante do tempo de RF. Esse critério quando comparado com os outros métodos se mostrou extremamente conservador, assim como descrito também em Craveiro, Rodrigues e Laim (2015).

A resistência ao fogo tende a crescer consideravelmente com o aumento da espessura do revestimento contra fogo, tanto para o gesso quanto para a argamassa.

Os métodos simplificados não possibilitam a determinação da resistência ao fogo conforme a ISO 834 (2014), pois os critérios da referida norma se adequam apenas às análises experimentais. O método normativo permite apenas a determinação da força axial resistente ($N_{fi,rd}$). Nesse sentido, é possível determinar a falha do pilar quando esta se igualar ao esforço solicitante ($S = R$); as Figuras 6.8 e 6.9 mostram a redução da força resistente ($N_{fi,rd}$) segundo a ABNT NBR 14323 (2013) para o pilar de aço com diferentes espessuras de revestimento de placas de gesso e argamassa. A força solicitante ($N_{fi,sd}$) vale 110 kN (40% da capacidade resistente do pilar em situação ambiente).

Figura 6.8 - Força resistente ($N_{fi,rd}$) determinada segundo o método simplificado para o pilar de aço com diferentes espessuras de revestimento de placas de Gesso

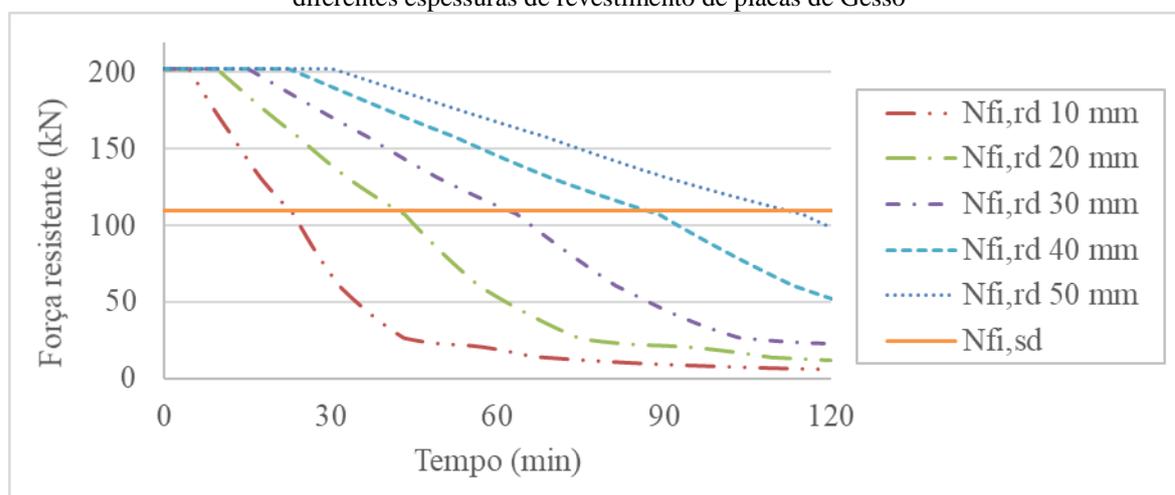
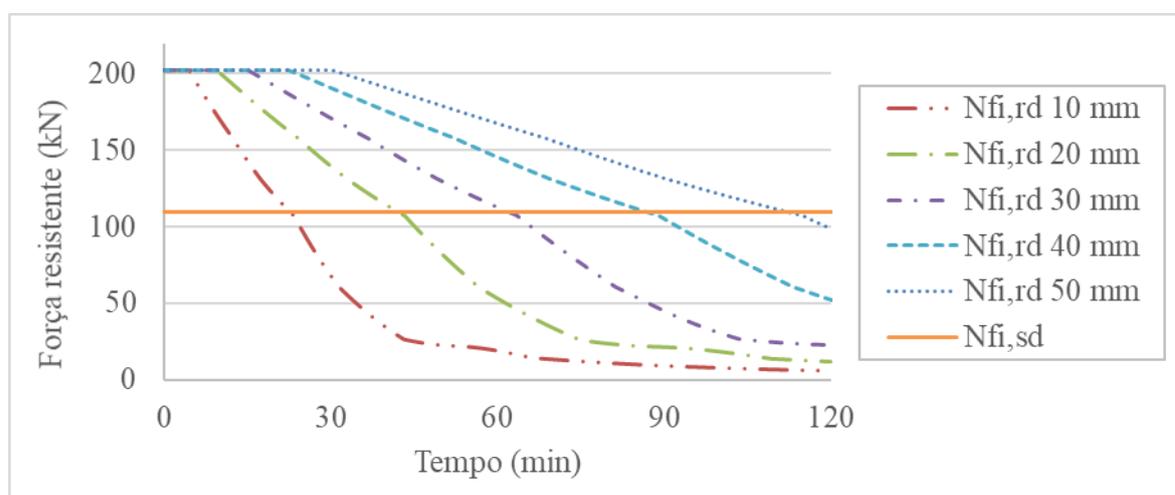


Figura 6.9 - Força resistente ($N_{fi,rd}$) determinada segundo o método simplificado para o pilar de aço com diferentes espessuras de revestimento de placas de Argamassa



Através dos resultados apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7, tanto a proteção com argamassa quanto a proteção com placas de gesso aumentam significativamente o tempo crítico de falha dos pilares. A configuração deformada dos pilares após a simulação numérica pode ser vista na Figura 6.10

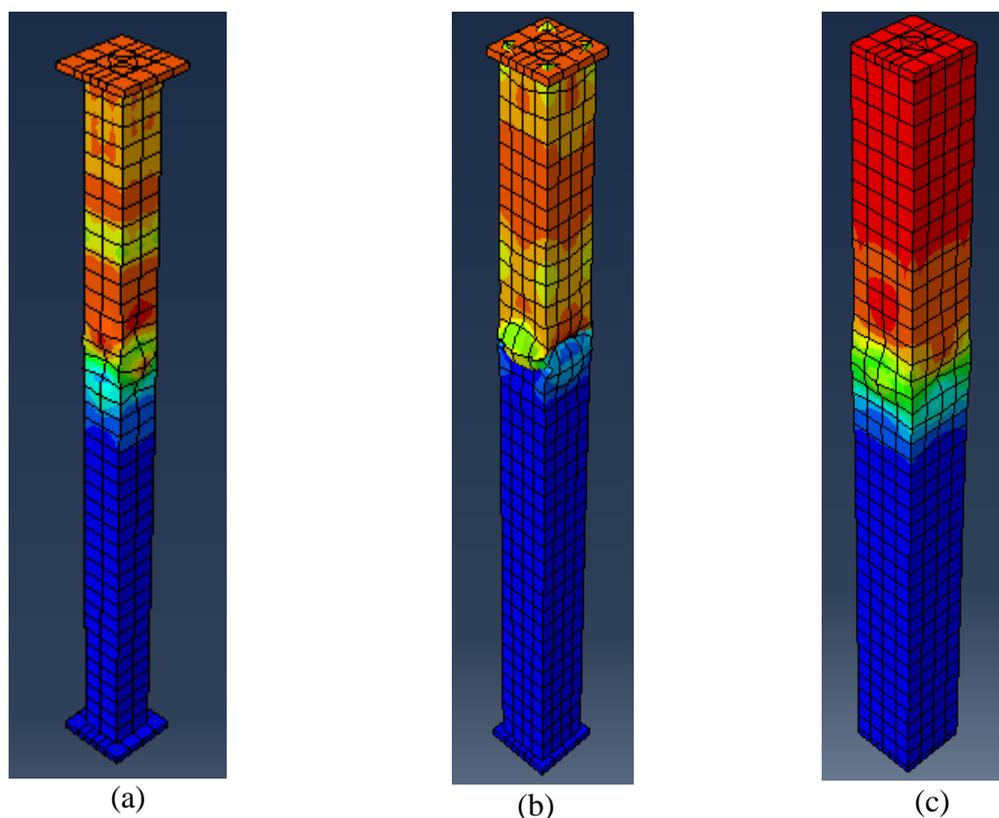


Figura 6.10 - Modelo numérico no momento do colapso para perfil protegido por espessuras de 10 (a), 30 (b) e 50 (c) mm

Os valores de resistência ao fogo, estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resistências ao fogo dos pilares de aço com revestimento contra fogo

Esp. de proteção (mm)	Gesso			Argamassa		
	TRRF ABAQUS (min)	TRRF ABNT NBR (min)	TRRF EN 3-2 (min)	TRRF ABAQUS (min)	TRRF ABNT NBR (min)	TRRF EN 3 (min)
0	9	7	5	9	7	5
10	32	21	14	32	23	14
20	58	43	23	55	42	24
30	88	65	39	78	62	38
40	135	99	82	112	87	51
50	181	133	92	143	112	70

Conforme os resultados apresentados, a cada 10 mm acrescidos na espessura da proteção, tem-se ganhos superiores a 30% na resistência ao fogo nos três dimensionamentos.

Embora os critérios de falha empregados sejam diferentes, a resistência ao fogo, determinada pelo critério da ISO 834 (2014) através das simulações numéricas, e o tempo crítico, determinado pelo critério da ABNT NBR 14323 (2013) são comparados na Figura 6.11. A comparação não é feita com o EN 1993-1-2 (2005), pois como citado anteriormente, o critério de falha foi a temperatura crítica.

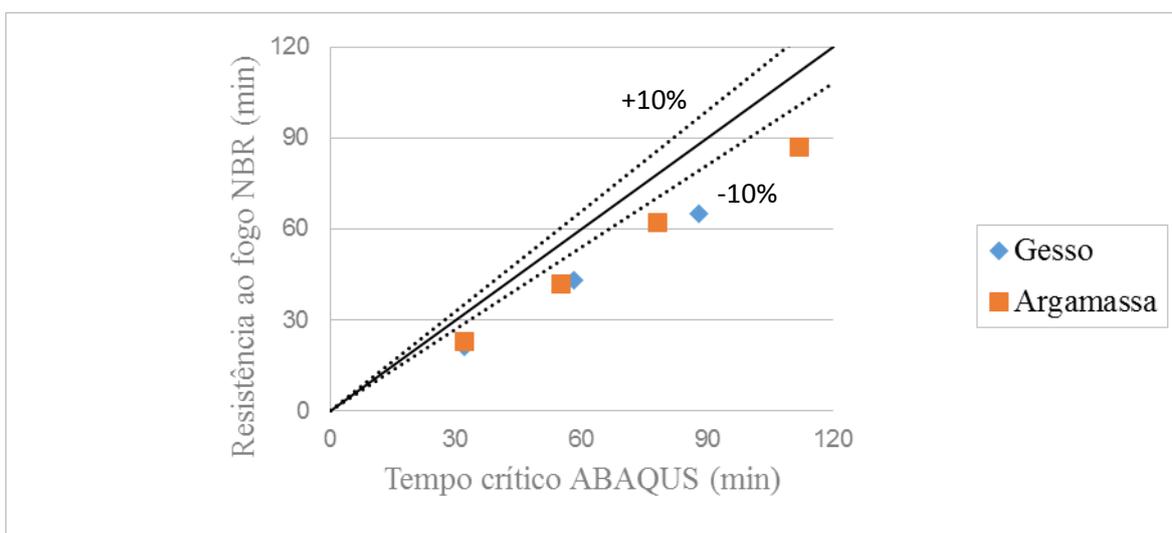


Figura 6.11 - Falha dos pilares de aço com revestimento, método simplificado vs modelo numérico

Observa-se que os diferentes critérios de falha podem induzir divergências na determinação do desempenho (falha) do pilar em situação de incêndio. Dentre os casos analisados, a resistência ao fogo e o tempo crítico foram semelhantes; já o método simplificado se mostrou mais conservador. Na Figura 6.11 todos os resultados encontram-se posicionados abaixo da margem de -10%. Ressalta-se que tanto no modelo numérico quanto no método simplificado não são considerados fenômenos que podem ocorrer quando o gesso e a argamassa são expostos à altas temperaturas, como fissuração da placa de gesso ou descolamento da argamassa.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As análises feitas neste trabalho tiveram por objetivo a identificação dos parâmetros a serem utilizados na simulação de perfis de aço formados a frio em situação de incêndio, através de simulações numéricas com o *software* Abaqus (2011) em elementos finitos. O modelo foi aplicado para pilares com revestimento de gesso e os resultados numéricos foram comparados com o experimento conduzido neste trabalho. A partir disso dois tipos de revestimentos (argamassa projetada e placas de gesso), de espessuras 10, 20, 30, 40 e 50 mm foram simulados e comparados com o método simplificado da norma europeia EN 1993-1-2 (2005) e da norma brasileira ABNT NBR 14323 (2013). Os resultados foram discutidos através da análise das temperaturas desenvolvidas, das deformações axiais e da resistência ao fogo dos pilares analisados. Com o estudo, pode-se concluir que:

- a malha de 50 mm foi a mais adequada para a simulação numérica, convergindo com a malha mais refinada de 10 mm;
- o elemento sólido conseguiu representar melhor o comportamento experimental observado por Costa (2013) para o pilar em situação de incêndio quando comparado com o elemento tipo casca, apesar dos resultados obtidos com o elemento tipo casca serem aceitáveis;
- o coeficiente de redução proposto pela ABNT NBR 14323 (2013) mais adequado para o pilar em estudo foi o $k_{\sigma,\theta}$, proposto para perfis sujeitos à flambagem local;
- o modelo desenvolvido pode ser aplicado para a simulação de pilares com revestimento contra fogo de placas de gesso, pois o tempo de falha obtido numericamente foi o mesmo que observado no experimento;
- a utilização da proteção de gesso proporcionou ganhos na resistência ao fogo dos pilares em mais de 900% quando comparado com o pilar sem revestimento;
- para proteções com afastamento do perfil, simplificar os fenômenos de radiação e convecção pelo mecanismo da condução pode levar a resultados contra a segurança estrutural;
- o modelo não apresentou problemas de convergência para simular os pilares de aço com revestimento contra fogo (argamassa projetada ou placas de gesso);
- o aumento da espessura de proteção apresentou ganhos significativos na resistência ao fogo dos pilares. Por exemplo, a placa de 10 mm mais do que triplica a resistência ao fogo do pilar sem proteção;

- para os pilares com proteção, à medida que a espessura do revestimento aumenta, a divergência entre as temperaturas obtidas pelo modelo numérico e pelo método simplificado também aumenta;
- tanto a proteção com argamassa projetada quanto a com placas de gesso aumentaram consideravelmente o tempo de resistência ao fogo dos pilares. Nos casos analisados, a cada 10 mm acrescido na espessura, aproximadamente, dobra-se o tempo de resistência ao fogo;
- o método simplificado da ABNT NBR 14323 (2013) mostrou-se levemente conservador, em relação ao método numérico, para espessuras maiores de revestimento, mantendo-se a favor da segurança e perfeitamente adequados à prática de projeto;
- o critério de temperatura crítica proposto pelo EN 1993-1-2 (2005) para perfis de aço formados à frio se mostrou extremamente conservador quando comparado com o método numérico e com o critério de falha da ABNT NBR 14323 (2013).

Para a continuidade desta pesquisa recomenda-se que em trabalhos futuros sejam abordados os seguintes tópicos:

- realização de ensaios experimentais no âmbito térmico, com amostras reduzidas variando-se a distância entre a seção transversal do perfil e a placa de proteção a fim de avaliar o fluxo de transferência de calor e comparar com a hipótese simplificadora de condução feita pela ABNT NBR 14323 (2013);
- caracterização do gesso e ou outros materiais de proteção para melhor parametrizar o modelo numérico no ABAQUS;
- utilização de software do tipo CFD para análise da transferência de fluxo de calor entre a proteção e o perfil de aço a fim de validar a hipótese do MODELO 02 feita no software ABAQUS;
- aperfeiçoamento do modelo mecânico para que o comportamento das forças de restrições seja mais próximo do resultado experimental e não apenas o tempo de falha;
- ensaios experimentais com outros tipos de proteção passiva de revestimento contra fogo, com mais exemplares de estudo para representação estatística e comparação com o modelo numérico desenvolvido neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14323:2013 - **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT NBR 14432:2000 - **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT NBR 14762:2010 - **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT NBR 15575:2013 - **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- Abreu, M. S. D. – **Análise Pilar tubular em aço em situação de incêndio: Uma análise com Abaqus e com Ansys**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – PE, 2016.
- Almeida, S. J. C. – **Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando a restrição ao alongamento térmico**. Tese de Doutorado, Escola de engenharia de São Carlos – EESC/USP, Universidade de Coimbra (UFPE), São Carlos – SP, 2012.
- Alves, M. C. – **Análise avançada de perfis formados a frio sob ação de incêndio**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2006.
- Anderberg - Y. **SUPER-TEMPCALC. A commercial and user friendly computer program with automatic FEM - generation for temperature analysis of structures exposed to heat**. Fire Safety Design. Lund; 1991.
- BRASIL. **Lei no 13.425, de 30 de Março de 2017**. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público; altera as Leis nºs 8.078, de 11 de setembro de 1990, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 – Código Civil; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13425.htm>. Acesso em: 19 out. 2017.
- Centro Brasileiro da Construção em Aço CBCA. **Perfil dos Fabricantes de Estruturas de Aço no ano de 2015**. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-estrutura-de-aco.php>> Acesso em: 06 jul. 2016
- Chen, S., Zhang, Y., Weiming Y., Kim K-S. - **Experimental study and analysis on the collapse behavior of an interior column in a steel structure under local fire**. Advances in Structural Engineering. v.19. p. 173 – 186. 2016.
- Cheng, S.; Li, L-Y., Kim B. – **Buckling analysis of partially protected cold-formed steel channel-section columns at elevated temperatures**. Fire Safety Journal. v.72. p. 7 – 15. 2015.

Craveiro, H.D., Rodrigues, J.P., Laím, L. **Experimental investigation on the behaviour of cold-formed steel columns subjected to fire**. International fire safety symposium – IFireSS. Coimbra– Portugal, 2015.

Costa, L.M – **Análise experimental de pilares em aço formado a frio submetidos a altas temperaturas com restrição à dilatação axial livre e restringida**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – PE, 2013.

Cruz A.A.S.N - **Estudo do Fator de Redução da Resistência ao Escoamento do Aço de Perfis U Enrijecido em Situação de Incêndio**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo-Horizonte-MG, 2015.

Dorr, J. B. - **Modelos numéricos de pilares de aço em situação de incêndio considerando a influência da restrição axial** - Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP-SC), São Carlos – SP, 2010.

EN 1993-1-2 - **EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design**. European Committee for Standardization, Belgium. 2005.

Feng, M., Wang, Y. C., Davies, J. M. - **Structural Behaviour of Cold-Formed Thin-Walled Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part 1: Experiments**. Thin-Walled Structures, v. 41, 543-570, 2003a.

Feng, M., Wang, Y. C., Davies, J. M. - **Structural Behaviour of Cold-Formed Thin-Walled Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part 2: Design Calculation and Numerical Analysis**. Thin-Walled Structures. v. 41, 571-594, 2003b.

Feng, M., Wang, Y. C., Davies, J. M. - **Thermal performance of cold-formed thinwalled steel panel system in fire**. Fire Safety Journal, v.38, 365-394, 2003c.

Gerkeen, A.L.R. - **Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade de São Paulo (EP-USP), São Paulo – SP, 2007.

Guimarães, P.P.O. - **Sobre o dimensionamento do revestimento contra fogo de estruturas de aço**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte – MG, 2007.

Heva Y. B. - **Behavior and Design of Cold-formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures**. Tede de Doutorado, Queensland University of Technology, School of Urban Developments, Queensland – AU, 2009.

Instituto Sprinkler Brasil. **Estatísticas de Incêndio no Brasil**. Disponível em: <<http://www.sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/>>. Acesso em: 08 ago. 2017

International standard. ISO 834:2014 - **Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements**. International Organization of Standarization, Genève, 2014.

Mendes, L.C. – **Estudo teórico sobre peris formados a frio em situação de incêndio**
Dissertação de mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos – SP, 2004.

Mota, A.S. - **Resistência ao fogo de colunas de aço enformado a frio com secção em sigma**
- Faculdade de Ciências e Tecnologia da universidade de Coimbra. Coimbra 2016.

PCF do Brasil. **Proteção contra fogo de estruturas na construção**. Disponível em: <
http://www.pcf.com.br/PCF_Solucoes/Argamassas_CCivil.html/>. Acesso em: 15 jul. 2017

Piquer, A., Figueirido D. H.; **Protected steel columns vs partially encased columns: Fire resistance economic considerations**. Journal of Constructional Steel Research, v. 124, pp. 47-56. 2016.

Pires, T.A.C. -**Fire resistance of composite columns made of concrete filled circular hollow sections and with restrained thermal elongation**. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da universidade de Coimbra. Coimbra 2013.

Pires, T.A.C.; Rodrigues, J.P.C.; Rêgo Silva, J.J; - **Fire resistance of concrete filled circular hollow columns with restrained thermal elongation**. Journal of Constructional Steel Research, v. 77, pp. 82-94. 2012.

Pawtucket, R.I; Hibbit; Carlsson and Sorensson Inc. – **ABAQUS/standard 6.11 user´s manual**. volume I-III. v. 6.11. USA. 2011.

Rocha, W. C. **Estudo numérico de pilar em aço formado a frio com seção tubular quadrada em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – PE, 2014.

Silva, T., Couto. C., Real P. V., Lopes. N., Bezerra. L. - **Comprimentos de flambagem de pórticos de aço em situação de incêndio**. Revista da Estrutura de Aço. v.6. p.21-45. Rio de Janeiro - RJ 2017.

Silva, V.P., Pannoni F.D., Pinto, E. M., Silva A. A. - Segurança das estruturas em situação de Incêndio. In: Seito, A. I.; Gill, A. A.; Pannoni, F. D.; Ono, R.; Silva, S. B.; Carlo, U. D.; Silva, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo – SP (Brasil): Projeto Editora, p.135-167, 2008.

Silva, V.P. – **Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process - a simple derivation**. Engineering Structures. V. 27. p. 2036–2043. 2005.

Wakili. K.G, Hugi E. – **Four types of gypsum plaster boards and their thermos-physical properties under fire condition**. Journal of Fire Sciences. V.27. p.27-43. 2009.