

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO JOSÉ DE ALMEIDA TORRES FILHO

**ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZADAS NO
SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING***

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA
2017

RODRIGO JOSÉ DE ALMEIDA TORRES FILHO

**ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZADAS NO
SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING***

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ph.D. João Elias Abdalla Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Erica Fernanda Aiko Kimura

CURITIBA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

T693a
2017 Torres Filho, Rodrigo José de Almeida
Análise térmica de estruturas de aço utilizadas no sistema light steel framing / Rodrigo José de Almeida Torres Filho.-- 2017.
114 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês
Disponível também via [World Wide Web](#)
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2017
Bibliografia: f. 103-114

1. Análise térmica. 2. Vigamento em aço (Construção civil). 3. Construção metálica. 4. Aço – Estruturas. 5. Edifícios – Propriedades térmicas. 6. Tensões térmicas. 7. Engenharia civil – Dissertações. I. Abdala Filho, João Elias. II. Kimura, Erica Fernanda Aiko. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624



TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º

ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZADAS NO SISTEMA "LIGHT STEEL FRAMING"

POR

RODRIGO JOSE DE ALMEIDA TORRES FILHO

Esta dissertação foi apresentada às 16h00min do dia 18 de abril de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Construção Civil, linha de pesquisa de Estruturas e Geotecnia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____.

(aprovado / reprovado)

Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho
(Orientador - UTFPR)

Profa. Dra. Erica Fernanda Aiko Kimura
(UTFPR)

Prof. Dr. Marcos Arndt
(UFPR)

Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado
(UFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Coordenador do PPGEC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas oportunidades que me são concedidas.

Aos meus pais e ao seu amor incondicional.

A minha esposa Vanessa, meu porto seguro e fonte da minha felicidade.

Aos meus orientadores professor João Elias e professora Erica, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e pela disponibilidade.

RESUMO

TORRES FILHO, R. J. A. **Análise térmica de estruturas de aço utilizadas no sistema *light steel framing***. 2017. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O presente trabalho apresenta uma análise numérica do desempenho térmico de painéis construídos utilizando o sistema *light steel framing* (LSF) submetido a ação térmica decorrente de um incêndio. O objeto de estudo foram painéis utilizados na construção de duas casas modelo localizadas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Curitiba, construídas com materiais disponíveis comercialmente no Brasil e as análises utilizaram propriedades disponibilizadas pelos fabricantes e pela norma brasileira. A análise numérica foi realizada no *software* ANSYS, com base no método dos elementos finitos em análise térmica transiente. O modelo foi validado com base em comparação com análises experimentais pesquisadas na literatura. Quatro painéis obtidos das casas modelo foram analisados. Os painéis que utilizaram lã de PET para preenchimento da cavidade foram também analisados com preenchimento de lã de vidro. Um painel simples, com a cavidade preenchida por ar foi analisado para ser usado como referência. Por fim, com a utilização de coeficientes de redução da resistência ao escoamento propostos pela ABNT NBR 14323:2001, determinou-se a redução da resistência do aço do perfil de acordo com o tempo de exposição ao incêndio e o tempo de resistência ao fogo dos perfis. Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que mesmo para os painéis com pior desempenho, a proteção obtida pode ser suficiente, a depender do carregamento aplicado ao montante e do Tempo requerido de resistência ao fogo necessário. O presente trabalho apresenta informação relevante sobre o desempenho térmico em situação de incêndio do sistema LSF constituído com materiais brasileiros.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Análise térmica, Situação de incêndio. Transferência de calor. TRRF. *Light steel framing*.

ABSTRACT

TORRES FILHO, R. J. A. **Thermal analysis of light steel framing structures**. 2017. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2017.

The thermal performance of light steel framing (LSF) panels was the objective of this study. The study subject was panels used in the construction of two model houses located at Federal Technology University – Parana, built with materials commercially available in Brazil. The analysis was set with material properties from the manufacturer and in compliance with the Brazilian regulation, using the finite element method for a transient thermal analysis. The model validation was based on experimental tests available in the literature. Based on the validated model, the four panels have been analyzed. Two of the panels used PET wool in the cavity for insulation and the analysis was repeated with them replacing it for glass wool. A panel with no insulation was also analyzed to be used as reference. Based on the analysis results and the resistance reduction coefficients proposed by ABNT NBR 14323:2001, the resistance decrease of the studs due to the fire exposure and the panels resistance to fire were determined. Based on the obtained results, it can be affirmed that, depending on the applied load and the required Equivalent time of fire exposure, even the less protective configuration of the panels presented can be viable. The current study presented relevant information about the performance of LSF manufactured in Brazil when exposed to fire.

Keywords: Thermal performance, Thermal analysis. Fire test. Heat transfer. TRRF. Light steel framing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Chapas para <i>drywall</i> , média histórica do consumo por região – 2004 a 2013	14
Figura 2.2 – Instalação das guias e dos montantes	14
Figura 2.3 – Instalação das chapas do primeiro lado e colocação do isolamento.....	15
Figura 2.4 – Instalação das chapas do segundo lado e acabamento.....	15
Figura 2.6 - Método offset para determinação da tensão de escoamento	24
Figura 2.7 - Método da deformação total arbitraria para determinação da tensão de escoamento.....	24
Figura 2.9 – Gráfico do calor específico em função da temperatura	27
Figura 2.10 – Gráfico da condutividade térmica em função da temperatura	27
Figura 2.11 – Calor específico de uma placa de gesso pela temperatura.....	28
Figura 2.12 – Condutividade térmica do painel de gesso.....	30
Figura 2.13 – Calor específico do painel de gesso.....	30
Figura 2.14 – Densidade relativa do painel de gesso.....	30
Figura 2.17 – ARQUITROP x modelo real	36
Figura 2.19 – Modelo de incêndio natural	41
Figura 2.21 – Dimensionamento de elemento estrutural em situação de incêndio ...	49
Figura 2.23 – Variação do módulo de elasticidade com a temperatura.....	53
Figura 3.2 – Fundos da Casa 1 (direita) e da Casa 2 (esquerda)	58
Figura 3.3 – Perfis U 92x38x0,80 e Ue 90x40x12x0,80, dimensões em mm	58
Figura 3.4 – Esquema genérico de painel utilizado nas Casas 1 e 2	59
Figura 3.6 – Painel P2.....	60
Figura 3.7 – Painel P3.....	60
Figura 3.8 – Painel P4.....	60
Figura 3.10 – Elementos tridimensionais SOLID70 E SOLID90.....	64
Figura 3.11 – Modelos com placa dupla de gesso acartonado, com e sem presença de manta	65
Figura 3.12 – Vista isométrica do modelo geométrico.....	66
Figura 3.13 – Vista superior do modelo geométrico	66
Figura 3.14 – Curva de incêndio padrão – ISO 834	67
Figura 3.15 – Malha de elementos finitos – vista isométrica	69
Figura 3.16 – Malha de elementos finitos – plano xy	70

Figura 3.17 – Pontos de comparação do modelo numérico com o modelo experimental de referência.	71
Figura 3.18 – Comparação entre o ensaio de referência e o modelo de validação ..	72
Figura 3.19 - Esquema genérico de painel utilizado no modelo, dimensões em cm.	73
Figura 3.20 – Modelo geométrico do painel P1, dimensões em mm.	74
Figura 3.21 – Modelo geométrico do painel P2. dimensões em mm.	74
Figura 3.22 – Modelo geométrico do painel P3, dimensões em mm.	75
Figura 3.23 – Modelo geométrico do painel P4, dimensões em mm.	75
Figura 3.24 – Malha de elementos finitos do painel P1	76
Figura 3.25 – Malha de elementos finitos do painel P2	76
Figura 3.26 – Malha de elementos finitos do painel P3	77
Figura 3.27 – Malha de elementos finitos do painel P4	77
Figura 4.1 – Pontos de obtenção das temperaturas	80
Figura 4.2 – Painel P1 - Temperatura x Tempo	80
Figura 4.3 – Painel P2a - Temperatura x Tempo	81
Figura 4.4 – Painel P2b - Temperatura x Tempo	81
Figura 4.5 – Painel P3 - Temperatura x Tempo	82
Figura 4.6 – Painel P4a - Temperatura x Tempo	83
Figura 4.7 – Painel P4b - Temperatura x Tempo	83
Figura 4.8 – Painel P5a - Temperatura x Tempo	84
Figura 4.9 – Painel P5b - Temperatura x Tempo	84
Figura 4.10 – Painel P6 - Temperatura x Tempo	85
Figura 4.12 - Ponto 3 - Temperatura x Tempo	87
Figura 4.13 - Ponto 4 - Temperatura x Tempo	88
Figura 4.14 - Ponto 5 - Temperatura x Tempo	89
Figura 4.15 – Painel P1 – Resistencia ao escoamento x Tempo	90
Figura 4.16– Painel P2a – Resistencia ao escoamento x Tempo	91
Figura 4.17 – Painel P2b – Resistencia ao escoamento x Tempo	91
Figura 4.18 – Painel P3 – Resistencia ao escoamento x Tempo	92
Figura 4.19 – Painel P4a – Resistencia ao escoamento x Tempo	92
Figura 4.20 – Painel P4b – Resistencia ao escoamento x Tempo	93
Figura 4.21 – Painel P5a – Resistencia ao escoamento x Tempo	93

Figura 4.22 – Painel P5b – Resistencia ao escoamento x Tempo	94
Figura 4.23 – Painel P6 – Resistencia ao escoamento x Tempo	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Determinação dos parâmetros constitutivos da curva tensão-deformação – Aço carbono	22
Tabela 2.2 – Fatores de redução do aço.....	25
Tabela 2.3 – Propriedades Térmicas	29
Tabela 2.4 – Emissividade e coeficiente de convecção de painéis de gesso	29
Tabela 2.5 – Propriedades físicas do OSB.....	32
Tabela 2.6 – Propriedades físicas da placa de fibrocimento	34
Tabela 2.7 - Propriedades físicas da lã de vidro	38
Tabela 2.8 – Curva “ <i>temperatura x tempo</i> ” discretizada	42
Tabela 2.9 - TRRF painéis de drywall com gesso acartonado	50
Tabela 2.10 – Comparação de resultados da literatura.....	55
Tabela 3.1 – Descrição dos diferentes painéis utilizados nas edificações	59
Tabela 3.2 – Propriedades térmicas dos materiais	62
Tabela 3.3 - Curva de incêndio padrão discretizada – ISO 834	68
Tabela 3.4 – Propriedades térmicas dos materiais – Modelo de validação.....	69
Tabela 3.5 - Comparação entre o ensaio de referência e o modelo de validação.....	71
Tabela 3.6 - Razão entre o ensaio de referência e o modelo de validação.....	71
Tabela 4.1 – Referência dos painéis em análise.....	86
Tabela 4.2 – Temperatura média do perfil	95

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	1
RESUMO	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	13
2.1 ESTRUTURAS EM STEEL FRAMING.....	13
2.1.1 <i>Drywall</i>	13
2.1.2 <i>Light Steel Framing (LSF)</i>	15
2.2 ANÁLISE TÉRMICA	17
2.2.1 Transferência de Calor.....	18
2.2.2 Propriedades Físicas do Aço sob Ação Térmica.....	22
2.2.3 Propriedades físicas dos materiais de isolamento e fechamento.....	28
2.2.4 Modelos de Incêndio	38
2.2.5 Análise Simplificada	44
2.2.6 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)	48
2.2.7 Análise Numérica	51
2.2.8 Resultados obtidos da literatura	52
3. METODOLOGIA	57
3.1 OBJETO DO ESTUDO.....	57
3.2 PROPRIEDADE DOS MATERIAIS	61
3.3 MODELO NUMÉRICO	62
3.4 VALIDAÇÃO.....	65
3.5 MODELAGEM DO SISTEMA <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	73
4. RESULTADOS	79

4.1 ANÁLISE TÉRMICA.....	80
4.2 CAPACIDADE RESISTENTE DA ESTRUTURA DE AÇO.....	89
5. CONCLUSÃO	98
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

No período compreendido entre o início de 2010 e o final de 2014 o Brasil passou por um desenvolvimento acelerado no setor da construção civil. Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC 2016), o auge foi o ano de 2010, quando a variação do produto interno bruto (PIB) da construção civil alcançou 13,1% e, mesmo nos anos subsequentes em que a variação não foi tão alta, o PIB da construção civil se manteve maior que o PIB brasileiro até o final do ano de 2014. Esse crescimento acelerado do mercado levou ao aumento do custo da construção civil e, como consequência, o custo médio por metro quadrado brasileiro quase dobrou no período entre 2009 e 2016 (CBIC, 2016).

Segundo Resende e Souza (2014), esse aumento se deu em parte devido a mão de obra, que não só ficou mais cara, com um aumento de 169% entre 2001 e 2014, como também mais escassa. Um estudo feito com empresas que representavam 23% do PIB brasileiro indicou que 91% delas encontravam dificuldades em encontrar mão de obra adequada. Isso levou as empresas a abrirem mão da capacidade técnica do contratado para garantir a manutenção do serviço.

Neste cenário, muitas empresas buscaram alternativas para melhorar a eficiência de seus processos, capacitando profissionais, reduzindo a dependência de mão de obra pela mecanização, economia de material e implantação de novos sistemas produtivos.

Dentre os novos sistemas, o Light Steel Framing (LSF), amplamente usado nos Estados Unidos, vem ganhando alguma relevância no Brasil nos últimos anos. No Brasil esse sistema é usado principalmente como divisória interna dos empreendimentos. Nesta situação, o LSF consiste apenas em uma divisória sem função estrutural, mas muitos países, como por exemplo os Estados Unidos, utilizam o LSF como sistema estrutural em edificações sujeitas a carregamentos menores, como as obras residenciais, o que lhes proporciona uma obra limpa, rápida, dependente de número reduzido de profissionais e com menor desperdício.

O dimensionamento estrutural do *light steel framing* é feito verificando-se suas peças submetidas aos carregamentos de projeto de forma semelhante ao projeto estrutural convencional. As barras com função estrutural no sistema LSF consistem em perfis de aço formados a frio. Este tipo de perfil, diferente dos laminados e

soldados, têm tendência a apresentar colapso por instabilidade local, devido a elevada relação entre a largura e a espessura das chapas que o compõem.

No Brasil, a norma técnica que trata do projeto e dimensionamento dos perfis formados a frio, apresentando as verificações necessárias para as diversas solicitações é a ABNT NBR 14762:2010, intitulada “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”.

As seções, espessuras usuais e as propriedades geométricas dos perfis formados a frio são abordados pela a ABNT NBR 6355:2012. “Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio: Padronização”. A ABNT NBR 15253:2014 “Perfis de Aço Formados a Frio, com Revestimento Metálico, para Painéis Reticulados em Edificações: Requisitos Gerais” trata de perfis galvanizados.

As estruturas metálicas, quando comparadas ao concreto armado, que é o sistema mais difundido no Brasil (SANTOS, 2008) são vantajosas no tocante a viabilidade de industrialização do canteiro e agilidade de execução. Apesar de o concreto ser conhecido pela boa resistência ao incêndio se comparado ao aço (COSTA; SILVA, 2002), a estrutura metálica, com sistemas de proteção adequadamente projetados, alcança os níveis normatizados de resistência ao fogo com tranquilidade.

Ao serem submetidos a um aumento drástico de temperatura, os materiais têm suas características físico-químicas e propriedades mecânicas alteradas. As características de interesse estrutural, como a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade, sofrem redução com o aumento da temperatura, o que pode levar a estrutura ao colapso precoce, em solicitações inferiores ao previsto em projeto.

A variação dos parâmetros físicos do aço e do concreto sujeitos a um gradiente de temperatura é descrita pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio”.

O procedimento simplificado apresentado pela norma supracitada foi desenvolvido para casos de aquecimento uniforme e por todos os lados do perfil. No caso do *light steel framing* isso dificilmente ocorre, uma vez que os perfis formam um quadro metálico com placas de fechamento em ambas as faces e são usados para separar ambientes. Assim, seja em um incêndio localizado em um ambiente ou em um incêndio generalizado, o perfil não é exposto diretamente, por estar revestido por

placas de fechamento. O método construtivo resulta, portanto, em um gradiente de temperatura na espessura da parede, ou seja, na alma do perfil de aço formado a frio.

Para análise de problemas como esses, lança-se mão dos métodos experimentais e métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos. A utilização dos métodos numéricos se tornou uma alternativa viável com o avanço tecnológico acompanhado da redução de custo dos computadores.

A solução pelo método dos elementos finitos permite calcular as temperaturas nodais e com elas obter as grandezas térmicas de interesse para dada situação (REGOBELLO, 2007). Diversos pacotes computacionais comerciais têm incluídos códigos que permitem a análise térmica da estrutura, a exemplo do ANSYS, ABAQUS, ADINA e DIANA.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar campos térmicos em regime transiente por meio de análise numérica em estruturas de aço utilizadas para construção no sistema *light steel framing* em situação de incêndio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Validar um modelo numérico, com base no método dos elementos finitos, capaz de prever a variação térmica de uma estrutura sob ação de incêndio;
- Gerar modelos geométricos representativos das estruturas a serem estudadas e utilizar o modelo validado para obter o campo térmico por meio de análise térmica transiente;
- Determinar o efeito da variação térmica decorrente do incêndio na resistência das estruturas, de forma a determinar a eficiência de cada sistema em resistir ao fogo.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos e pesquisas relevantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 ESTRUTURAS EM STEEL FRAMING

O *Steel Framing* é um sistema construtivo composto por perfis de aço galvanizado formado a frio que podem ser projetados para suportar cargas da edificação.

A utilização de sistemas de chapas sobre perfis metálicos leves, preenchidos ou não por material isolante, de modo a substituir a alvenaria convencional reduz a necessidade de mão de obra, tempo de execução e desperdícios. As estruturas em Steel Framing podem ser divididas em duas categorias, a citar nos subitens 2.1.1 e 2.1.2.

2.1.1 *Drywall*

Conforme comentado em Condeixa (2013), o *drywall* foi introduzido no Brasil na década de 1990. Trata-se de um sistema construtivo a seco de vedações internas, cuja vantagem é propiciar uma construção limpa, rápida e com mínima geração de resíduos.

Nos últimos anos, este sistema teve crescimento em todo país, mas a taxa mais expressiva ocorreu nas regiões de maior desenvolvimento da construção civil. O gráfico da figura 2.1 ilustra esse contexto, ao indicar a região de São Paulo (SP) como a que apresentou o índice de crescimento de consumo mais acentuado em comparação com a região Sul (S), Sudeste (SE), Centro Oeste (CO) e Nordeste (NE) ao das demais regiões.

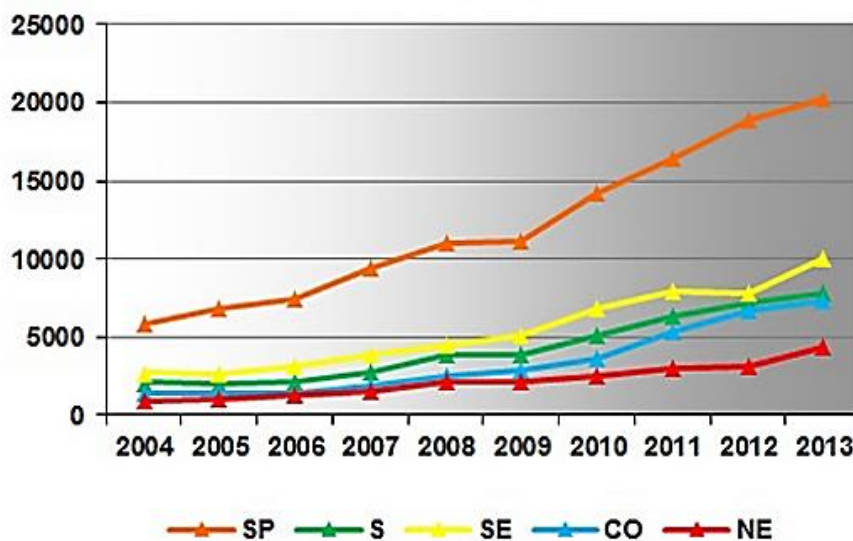


Figura 2.1 - Chapas para *drywall*, média histórica do consumo por região – 2004 a 2013
Fonte: Associação Brasileira de *Drywall* (2016).

O sistema *drywall* utiliza perfis metálicos revestidos de placas de gesso acartonado para execução das divisórias da construção sem função estrutural. Este sistema é compatível com qualquer obra de alvenaria não estrutural, já que a substituição do sistema de fechamento não tem efeito na resistência da edificação. Na realidade, ao se optar pelo *drywall*, por ser mais leve que o sistema convencional, a estrutura pode ser reduzida, seja ela de concreto armado ou metálica.

A instalação segue um procedimento simples, mas que requer mão de obra qualificada. Inicia-se fixando as guias e montantes metálicos, respeitando locação e espaçamento indicados no projeto conforme Figura 2.2.

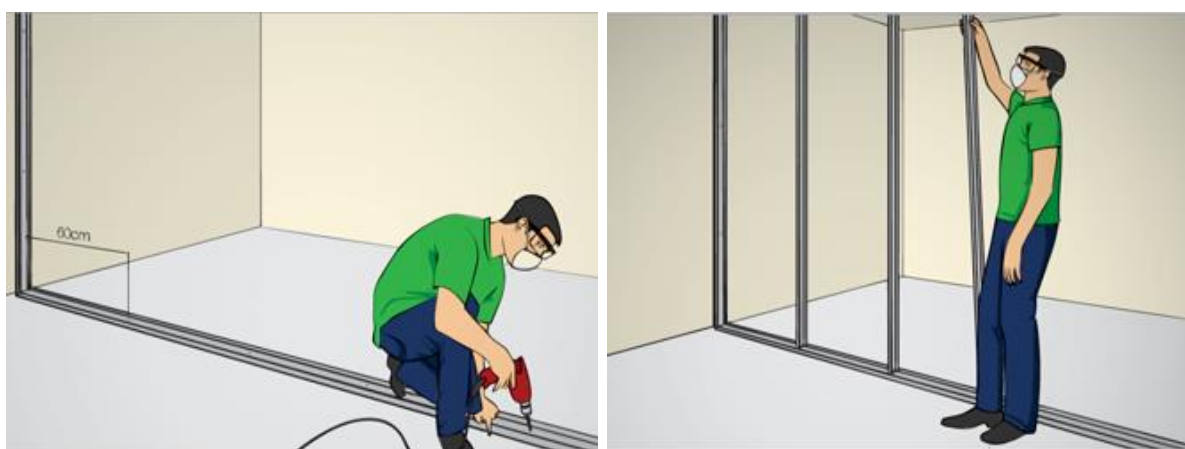


Figura 2.2 – Instalação das guias e dos montantes
Fonte: Leroy Merlin, 2016.

Na sequência, como visto na Figura 2.3, instala-se o primeiro lado das chapas e aplica-se o isolamento térmico. Também é neste momento que se faz a instalação elétrica e hidráulica caso haja.



Figura 2.3 – Instalação das chapas do primeiro lado e colocação do isolamento
Fonte: Leroy Merlin, 2016.

Por fim, instala-se as chapas do segundo lado e aplica-se o acabamento com massa e fita de papel microperfurado, como visto na Figura 2.4 a seguir.



Figura 2.4 – Instalação das chapas do segundo lado e acabamento
Fonte: Leroy Merlin, 2016.

2.1.2 *Light Steel Framing* (LSF)

O *Light Steel Framing*, ou LSF, em contrapartida ao *drywall*, é um sistema construtivo completo, onde os perfis metálicos formados a frio são dimensionados para resistirem aos esforços solicitantes da edificação.

O *Steel Framing* tem sua origem em meados do século XIX. Com o acelerado crescimento demográfico americano, os colonizadores necessitavam de um método construtivo rápido e eficiente para a execução de suas habitações, utilizando materiais de fácil acesso (CASTRO; FREITAS, 2006). Esta prática deu origem ao sistema construtivo conhecido como *wood framing*, que se tornou o sistema residencial mais utilizado nos Estados Unidos.

Em 1933, foi apresentado na Feira Mundial de Chicago um protótipo de residência que substituía a madeira por perfis metálicos, o *steel framing* (SAINT-GOBAIN, 2011). A indústria americana teve um grande avanço durante a Segunda Guerra Mundial, e no pós-guerra, com a economia e a capacidade produtiva bem desenvolvida, o *steel framing* ganhou força. Durante a década de 1990 questionamentos com relação à qualidade e incertezas de preço da madeira levaram ao aumento na velocidade da substituição da madeira pelo aço. Até o fim da década, 25% das residências americanas já eram de *steel framing* (BATEMAN, 1998).

O Japão também adotou o LSF como sistema construtivo após a Segunda Guerra Mundial. Antes disso, a estrutura de madeira era o sistema predominante, mas durante a guerra, os incêndios se alastravam rapidamente causando grande destruição. Com isso o governo japonês impôs restrições ao uso de madeira em construções autoportantes (CASTRO; FREITAS, 2006). Esta situação contribuiu para a disseminação do sistema LSF no país. A indústria japonesa de aço passou a produzir os perfis para serem utilizados na construção civil e atualmente o Japão é um dos grandes mercados e possui uma indústria muito desenvolvida neste segmento (SAINT-GOBAIN, 2011).

No atual cenário, o sistema é largamente utilizado nos países em que a construção civil encontra-se bem desenvolvida. Destacam-se os Estados Unidos, a Inglaterra, a Austrália, o Japão e o Canadá. No Brasil, o LSF passou a ser utilizado apenas a partir de 1998, quando os primeiros projetos foram voltados para edificações de médio e alto padrão, com objetivo de apresentar o sistema associado à qualidade. Posteriormente, o LSF passou a ser utilizado em empreendimentos com alta reprodutibilidade pela capacidade de industrialização do processo (PENNA, 2009).

2.2 ANÁLISE TÉRMICA

A história da humanidade é permeada por diversas ocorrências de incêndios de grandes proporções. Roma, em 64 d.C., teve mais de 25% da cidade destruída em um famoso incêndio, que chegou a ser atribuído a Nero, tese esta refutada pelos historiadores (ANGELOZZI, 2003). Um incêndio em 1666 que durou uma semana destruiu 85% da cidade de Londres, evento este, que deu origem às primeiras exigências de combate a incêndio (KIRCHHOF, 2005). Em Chicago, 1871, um incêndio originado por um lampião deixou 90 mil pessoas desabrigadas. São Francisco em 1906, após um terremoto, registrou um dos maiores incêndios da história, deixando mais de 250.000 desabrigados.

O Brasil também passou por diversas situações trágicas com incêndios. Em 1966 a lona de algodão do Gran Circus Norte-Americano foi alvo de um incêndio criminoso que deixou aproximadamente 500 mortos, sendo destes, 350 crianças. Em 1972 houve um grande incêndio de causas desconhecidas no Edifício Andraus em São Paulo com 16 mortos e 330 feridos, os sobreviventes precisaram aguardar resgate no último andar do edifício. Em 1974, um curto-circuito em um aparelho de ar-condicionado ocasionou o incêndio do edifício Joelma que matou 184 pessoas. Poucos conseguiram deixar o edifício, pois o fogo e a fumaça tomaram conta inclusive das escadas. Esta tragédia reacendeu no país o debate sobre segurança das edificações em situação de incêndio. Em 1976 o edifício das lojas Renner sofreu um incêndio deixando 41 mortos e 60 feridos. Muitas pessoas se jogaram do edifício que não possuía terraço apropriado para resgate com helicópteros. Em 1981, um incêndio no Edifício Grande Avenida em São Paulo afetou todos os andares. Apenas 17 pessoas morreram, porém, este evento suscitou novas leis de segurança contra incêndios em São Paulo. Em 1983, o incêndio da Vila Socó matou 93 pessoas. Em 1984, ocorreu um vazamento de gasolina em um mangue de Cubatão próximo a uma favela, um incêndio ocasionou a morte de 93 moradores. Em 2000, uma creche em Uruguaiana pegou fogo devido a uma falha no aquecedor, 12 pessoas morreram e duas funcionárias da creche acabaram sendo responsabilizadas criminalmente. Em 2001, uma casa de show sem alvará de funcionamento em Belo Horizonte sofreu um incêndio por falhas numa queima de fogos, 7 pessoas morreram e mais de 300 ficaram feridos. Bem recentemente, em 2013, o incêndio da boate Kiss em Santa Maria deixou 245 mortos (PREVIDELLI, 2013).

Acidentes causados pelo fogo não são raros e as consequências variam da perda material até a morte. É importante, portanto, conhecer o comportamento da edificação, bem como os materiais que a compõe, quando exposta a altas temperaturas.

2.2.1 Transferência de Calor

Para estudar o comportamento dos elementos estruturais ao incêndio, é necessário determinar a quantidade de calor que chega a estes elementos.

Quando existe um gradiente de temperatura dentro de um sistema, ocorre a transferência de energia térmica. O processo de transferência desta energia é conhecido como transferência de calor. A falta de equilíbrio da temperatura do sistema dá origem a um fluxo de calor, que é o processo pelo qual a energia interna de um sistema é alterada (KREITH, 2003).

Em situação de incêndio, ocorre a elevação da temperatura dos gases do compartimento em chamas. Com o passar do tempo, a temperatura dos elementos estruturais tende a se igualar a temperatura destes gases. A elevação térmica dos elementos se dá através dos mecanismos de transferência de calor, sendo eles a *condução*, a *radiação* e a *convecção*. Segundo Kreith (2003), a convecção não se classifica como um processo de transferência de calor, visto que, ao contrário dos outros dois modos, não depende apenas da diferença de temperatura para ocorrer. A convecção depende também do transporte mecânico de massa. Porém, como a convecção também realiza transmissão de energia de região de maior temperatura, para região de menor temperatura, aceita-se o termo “transferência de calor por convecção”.

Nos itens a seguir são abordados de forma breve cada um dos modos de transferência de calor.

2.2.1.1 Condução

Quando existe gradiente de temperatura em um meio sólido, o calor flui da região de temperatura mais alta para a região de temperatura mais baixa. A taxa de transferência por convecção (q_k) é proporcional ao gradiente de temperatura (dT/dx), à área de transferência (A) e à condutividade térmica (k) do meio. A equação 1, define

esta relação e é conhecida como lei de Fourier, apresentada a seguir na forma unidimensional.

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

O sinal negativo se deve ao fato do calor fluir na direção da temperatura mais alta, para a mais baixa.

A condutividade térmica é uma propriedade do material que indica a quantidade de calor que flui por unidade de área em um gradiente de temperatura unitário. Reescrevendo-se a equação 1, a condutividade térmica pode ser definida conforme a equação 2.

$$k = \frac{q_k/A}{dT/dx} \quad (2)$$

Em geral a condutividade térmica é definida com base em ensaios laboratoriais.

2.2.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é composta de dois mecanismos simultâneos. Um deles, é a transferência de energia por movimento molecular, ou seja, o modo condutivo. Em conjunto, acontece a transferência de energia pelo movimento macroscópico de parcelas do fluido. O movimento deste fluido resulta do movimento de suas parcelas, que se movem devido a uma força externa, seja ela um gradiente de densidade, uma diferença de pressão ou uma combinação das duas.

O fluxo de calor por unidade de área (φ) pode ser observada na equação 3.

$$\varphi = \alpha_c \Delta\theta \quad (3)$$

Onde α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção e $\Delta\theta$ é a diferença de temperatura entre o fluido e o sólido. O coeficiente de transferência de

calor por convecção varia em função da geometria e rugosidade da superfície e do comportamento do fluido. O valor adotado pelo *Eurocode 1: "Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire"* (2002) e pela ABNT NBR 14323:2013 é $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.2.1.3 Radiação

É o processo pelo qual o calor é transferido de um corpo, em função de sua temperatura, sem a intervenção de qualquer meio (KREITH, 2003). O calor flui através de ondas eletromagnéticas e depende principalmente da temperatura dos corpos e da natureza das superfícies envolvidas.

Qualquer objeto no caminho da energia térmica radiante pode absorver, refletir ou transmitir a radiação térmica. Os parâmetros envolvidos são a absorvidade (α), a refletividade (β) e a transmitância (τ). Estes parâmetros representam conforme a equação 4 frações de radiação térmica incidente que um corpo absorve, reflete ou transmite.

$$\chi = \alpha + \beta + \tau = 1 \quad (4)$$

Radiação de corpo negro

Corpo negro é um corpo que emite e absorve a máxima quantidade de radiação possível em qualquer comprimento de onda, ou seja, $\chi = 1$. Este é um conceito teórico e serve de base de comparação para situações reais.

A quantidade de radiação térmica (E_b) emitida por um corpo negro independe da natureza da superfície, mas apenas de sua temperatura, dada pela lei de Stefan-Boltzmann, apresentada na equação 5.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (5)$$

Nesta equação, E_b é dado em W/m^2 , σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) e a temperatura, T , é dada em Kelvin.

Radiação de corpo cinzento

A radiação de corpo negro é uma situação idealizada que não ocorre em situações reais. Para determinar a quantidade de radiação térmica emitida em situações reais (E_b) deve-se incluir um fator à equação 5, conforme apresentado na equação 6. Este fator adimensional é conhecido como fator de emissividade ε , definido como a relação entre a energia total emitida por uma superfície e a energia emitida pela superfície de um corpo negro.

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

A emissividade de uma superfície depende do comprimento de onda da energia radiante, da temperatura da superfície e do ângulo de radiação. No entanto, pode-se, por simplificação, não considerá-la dependente destes fatores. Esta seria conhecida como superfície de corpo cinzento e sua radiação é a adotada na engenharia de segurança contra incêndios.

Algumas considerações podem ser feitas com relação a esses coeficientes com base na equação 7 que define a transferência de calor entre o modelo e o ambiente em que está inserido.

$$q = \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) + \beta (T_g - T_s)^{1,33} \quad (7)$$

Onde q é a razão de transferência de calor, ε a emissividade resultante, σ a constante de Stefan-Boltzman, β o coeficiente de convecção, T_g a temperatura absoluta do gás e T_s a temperatura absoluta da superfície.

Com base nesta equação pode-se afirmar que o primeiro termo, ou seja, o termo governado pela irradiação, é o termo que governa a transferência no lado exposto ao incêndio, já que ali as temperaturas são elevadas e os termos são elevados a quarta potência. No lado exposto à temperatura ambiente, com as temperaturas mais baixas, o termo referente a convecção é o que governa. Esta análise é confirmada por Thomas (1996) em ensaios comparativos. Ressalta-se que esta relação se altera com a variação de temperatura dos materiais e da curva de incêndio, sendo esta análise válida principalmente na fase inicial, onde ocorre o aumento de temperatura dos gases de forma mais acentuada.

2.2.2 Propriedades Físicas do Aço sob Ação Térmica

A elevação da temperatura no material tem efeito sobre o comportamento do mesmo ao alterar as propriedades mecânicas do aço e dos outros materiais componentes reduzindo sua resistência e rigidez, tornando a estrutura mais flexível e levando a deformações adicionais induzidas pela expansão causada pela temperatura (KIMURA, 2009).

2.2.2.1 Propriedades Mecânicas do aço

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta as variações das propriedades mecânicas para perfis laminados, soldados e formados a frio a serem utilizados no caso de variação de temperatura.

Para o caso dos perfis laminados e soldados a norma indica o uso do Eurocode 3, Part 1-2 (2005) para a definição do diagrama tensão versus deformação, em função da temperatura “ θ ”, com determinação segundo funções apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Determinação dos parâmetros constitutivos da curva tensão-deformação – Aço carbono

Faixa de Deformação	Tensão σ	Módulo de Elasticidade
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

Fonte: Adaptado de EUROCODE 3 Part 1-2, 1993.

Os parâmetros indicados são definidos como $f_{y,\theta}$ a resistência ao escoamento, $f_{p,\theta}$ a tensão limite de proporcionalidade, $E_{a,\theta}$ o módulo de elasticidade na fase elástica, $\varepsilon_{y,\theta}$ a deformação correspondente ao início do escoamento, $\varepsilon_{t,\theta}$ o limite de deformação para a resistência ao escoamento e $\varepsilon_{u,\theta}$ a deformação de ruptura.

A curva da Figura 2.5 apresenta a relação entre tensão e deformação para o aço-carbono dividida em quatro estágios. No primeiro estágio, o material apresenta comportamento linear até a tensão de proporcionalidade $f_{p,\theta}$. No segundo estágio, a relação segue comportamento elasto-plástico com encruamento até que o material atinja a tensão de escoamento. O terceiro estágio corresponde à fase de escoamento, em que o material apresenta deformações na ausência de variação de tensões. E por fim a tensão decresce linearmente até que se torne nula.

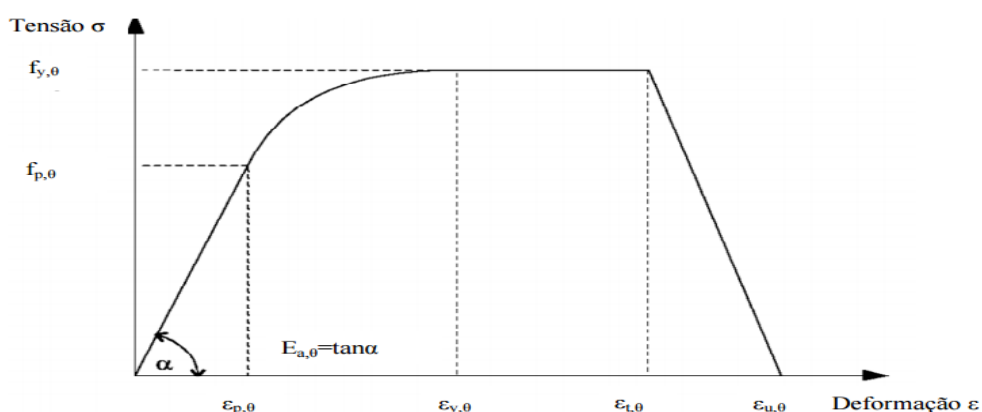


Figura 2.5 - Relação constitutiva do aço-carbono em função da temperatura θ
Fonte: Adaptado de EUROCODE 3 Part 1-2, 1993.

Com relação aos perfis formados a frio, devido ao seu processo de fabricação, eles não apresentam patamar de escoamento, uma vez que o trabalho a frio altera as propriedades do aço. Ocorre um aumento da resistência ao escoamento e à ruptura, mas também uma redução da ductilidade. As propriedades do aço podem ser determinadas por ensaio de tração simples e os resultados utilizados para determinação do limite de escoamento, seja pelo método *offset* ou pelo da tensão correspondente a uma deformação total arbitrada.

No método *offset*, o limite de escoamento é definido pela intersecção da curva tensão x deformação e da reta paralela ao trecho elástico, por uma deformação especificada, em geral, 0,2%. Na Figura 2.6 ilustra-se este método.

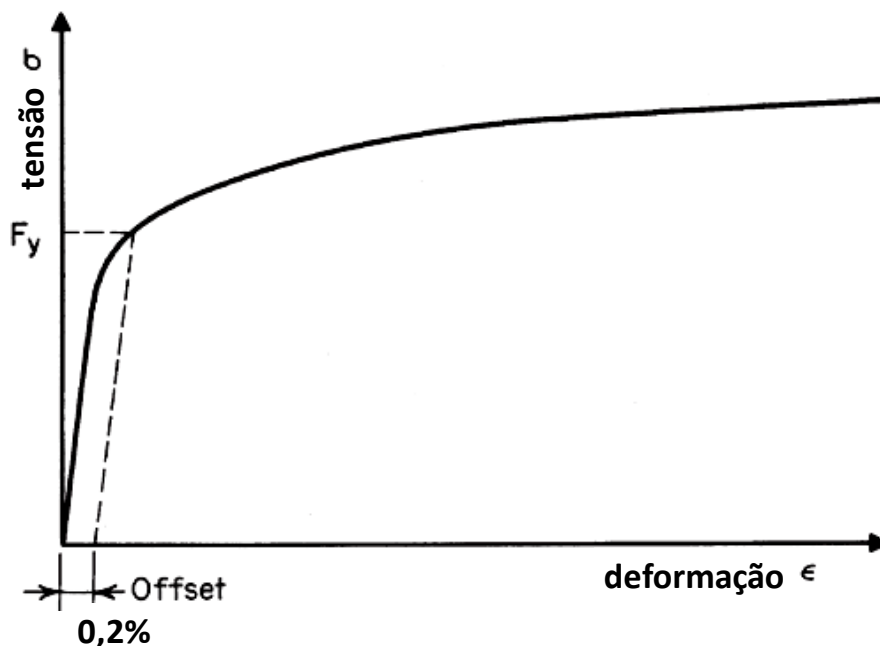


Figura 2.6 - Método offset para determinação da tensão de escoamento
Fonte: Yu e Laboube (2010)

No método da tensão correspondente a uma deformação total arbitrada, ilustrado na Figura 2.7, o limite de escoamento é o valor convencional dado pela tensão correspondente a uma deformação total especificada, sendo 0,5% um valor comumente utilizado. Esse método é utilizado em aços de qualidade estrutural. De um modo geral, ambos os métodos resultam em valores próximos de tensão de escoamento.

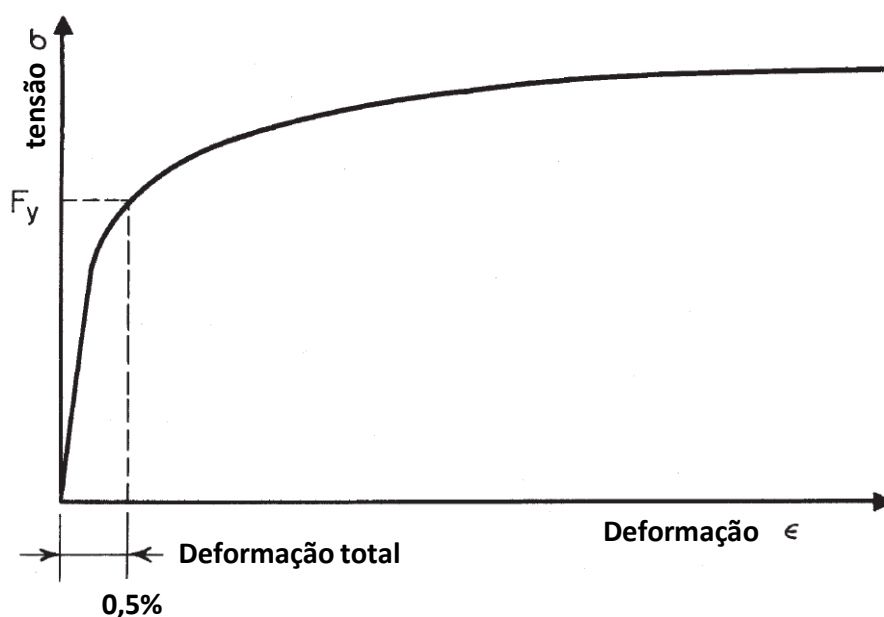


Figura 2.7 - Método da deformação total arbitrada para determinação da tensão de escoamento
Fonte: Yu e Laboube (2010)

A ABNT NBR 14323:2013 fornece fatores de redução do módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento para seções sujeitas ou não a flambagem local para diferentes valores de temperatura conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fatores de redução do aço

Temperatura do aço θ °C	Fator de redução da resistência ao escoamento – não sujeita a flambagem $k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta} = \frac{E_y}{E}$	Fator de redução da resistência ao escoamento – sujeita a flambagem $k_{\sigma,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,900	0,890
300	1,000	0,800	0,780
400	1,000	0,700	0,650
500	0,780	0,600	0,530
600	0,470	0,310	0,300
700	0,230	0,130	0,130
800	0,110	0,090	0,070
900	0,060	0,068	0,050
1000	0,040	0,045	0,030
1100	0,020	0,023	0,020
1200	0,000	0,000	0,000

Nota 1: Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.
Nota 2: Taxa de aquecimento entre 2°C/min e 50°C/min

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323, 2013.

2.2.2.2 Propriedades térmicas do aço

Em seu Anexo E, a ABNT NBR 14323:2013 apresenta, por meio das equações a seguir, a variação do alongamento, do calor específico e da condutividade térmica do aço em função da temperatura.

O alongamento do aço ($\Delta l_a/l_a$) é determinado por meio das equações 8 (a), (b) e (c):

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C} \quad (8a)$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,1 \times 10^{-2}, \text{ para } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C} \quad (8b)$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}, \text{ para } 860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (8c)$$

No conjunto de equações 8, l_a é o comprimento da peça a 20°C, Δl_a é a expansão térmica da peça e θ_a é a temperatura do aço em °C.

A norma permite ainda adotar para análise simplificada a relação constante entre alongamento e a temperatura adotando a equação 9.

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (9)$$

As equações acima são ilustradas na Figura 2.8 a seguir.

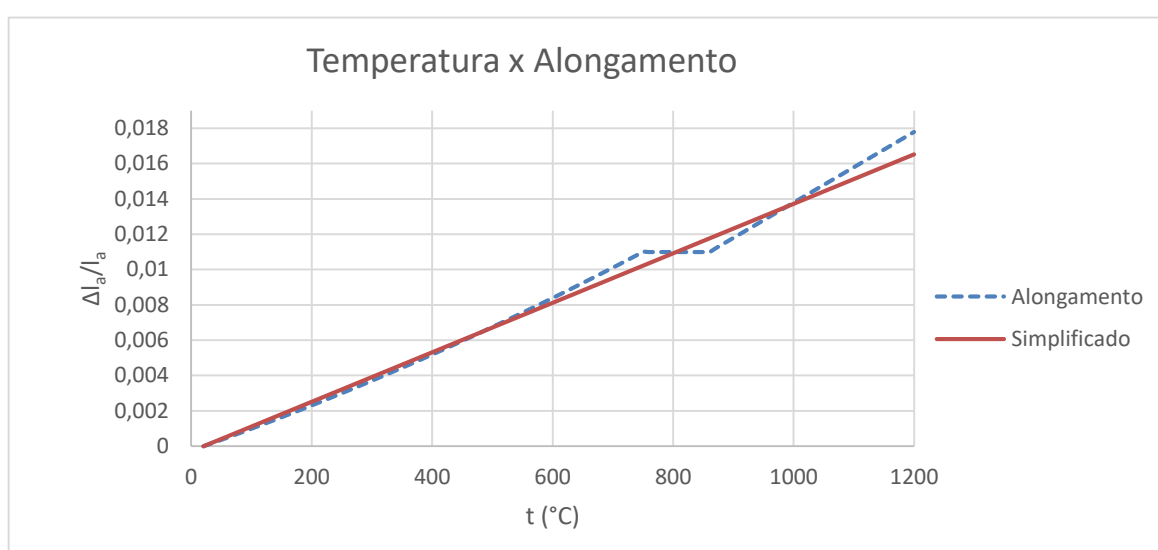


Figura 2.8 – Gráfico do alongamento em função da temperatura
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323, 2013.

O calor específico, expresso em joules por quilograma e por grau Celsius (J/kg·°C), é definido pelo conjunto de equações 10 (a), (b), (c) e (d).

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C} \quad (10a)$$

$$c_a = 666 + \frac{13.002}{738 - \theta_a}, \text{ para } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C} \quad (10b)$$

$$c_a = 545 + \frac{17.820}{\theta_a - 731}, \text{ para } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C} \quad (10c)$$

$$c_a = 650, \text{ para } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (10d)$$

Para determinação do campo térmico em elementos isolados por meio do método simplificado, é permitido adotar c_a como uma constante de 600 J/kg°C.

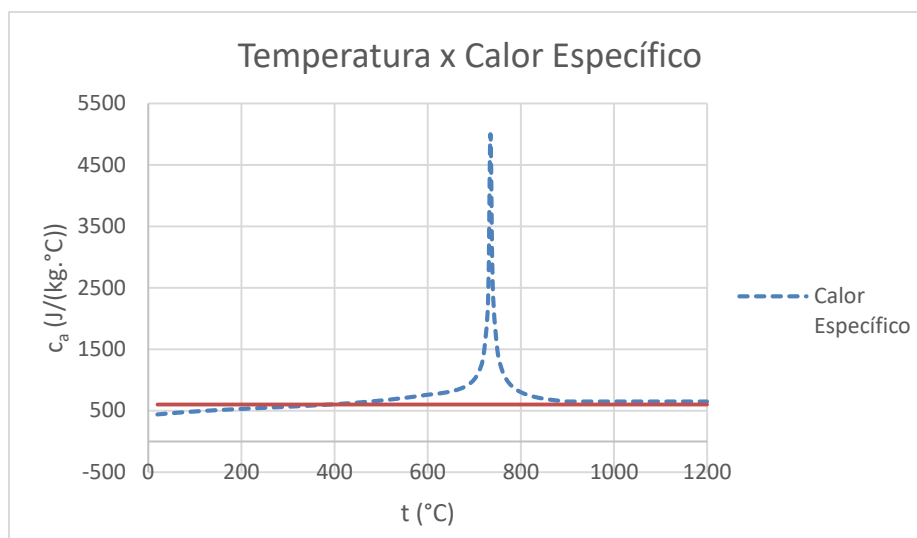


Figura 2.9 – Gráfico do calor específico em função da temperatura
 Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323, 2013.

Na Figura 2.9 é apresentada a variação do calor específico em função da temperatura.

Por fim, a condutividade térmica, expressa em watt por metro e por grau Celsius ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$) é definida por meio do conjunto de equações 11 (a) e (b).

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a, \text{ para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C} \quad (11a)$$

$$\lambda_a = 27,3, \text{ para } 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (11b)$$

Para o método simplificado de cálculo do campo térmico, a condutividade térmica pode ser considerada de valor constante igual a $45 \text{ W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$.

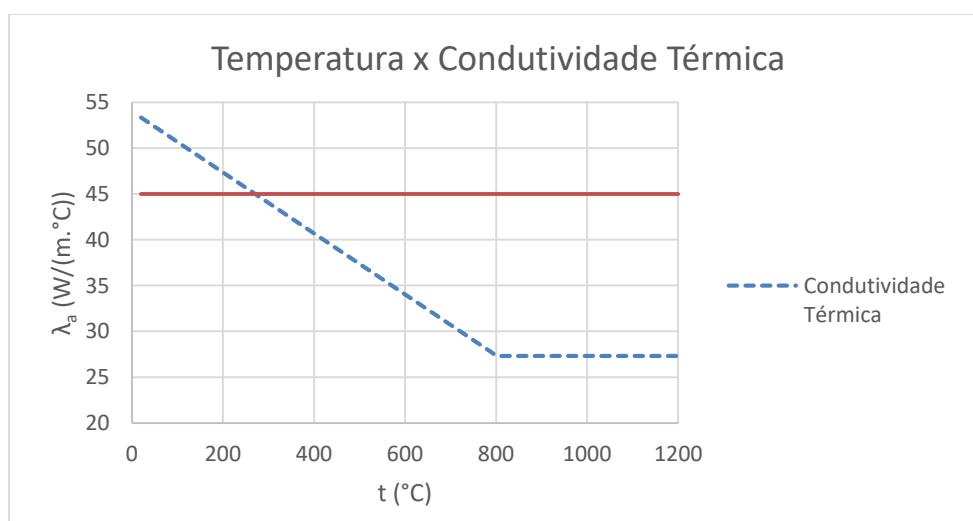


Figura 2.10 – Gráfico da condutividade térmica em função da temperatura
 Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323, 2013.

No item a seguir, são abordados os outros componentes dos painéis, que tem função importante de proteção do perfil metálico durante a exposição a altas temperaturas.

2.2.3 Propriedades físicas dos materiais de isolamento e fechamento

Os diferentes tipos de placas disponíveis no mercado proporcionam, juntamente com os materiais de isolamento, uma grande diversidade de painéis diferentes, mesmo que se mantenham os mesmos perfis metálicos.

As placas não são consideradas como contribuintes na capacidade do painel de resistir as cargas verticais. Ainda assim elas vêm sendo consideradas na restrição horizontal das mesas, contribuindo com a resistência a flambagem local desses elementos (GERLICH;COLLIER;BUCHANAN, 1996 ; KAITILA, 2002).

Com relação a exposição a altas temperaturas, tanto os materiais de fechamento, quanto os materiais de isolamento contribuem para a manutenção da integridade do painel, visto que atuam como proteção do perfil metálico.

2.2.3.1 Gesso acartonado

Sultan (1996) determinou o calor específico de uma placa de gesso resistente ao fogo experimentalmente usando uma razão de aquecimento de 2°C/min, o calor específico da obtido é mostrado na Figura 2.11. Valores semelhantes foram usados por Clancy (2002) em suas simulações.

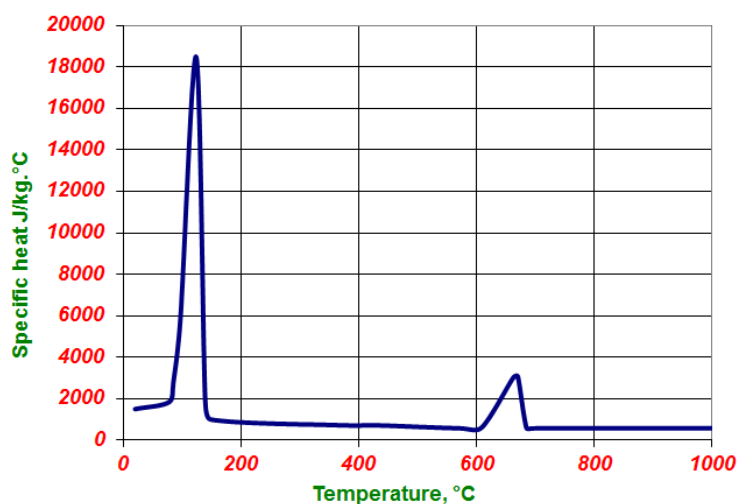


Figura 2.11 – Calor específico de uma placa de gesso pela temperatura
Fonte: Sultan (1996).

Sultan (1996) considera que o gesso possui 20% de seu peso em forma de água quimicamente retida e que aos 120°C são usados 450 kJ/kg de energia para liberar a água combinada e 40 kJ/kg para evaporar a água livre. Aos 650°C são usados ainda 170 kJ/kg em uma segunda desidratação. Isto justifica os picos de calor específico que podem ser vistos na Figura 2.11 (NASSIF; YOSHITAKE; ALLAM, 2014). Wakili *et al.*(2007) por outro lado afirma que o segundo pico se deve a decomposição do carbonato de cálcio.

Em suas análises, Nassif, Yoshitake e Allam (2014) adotou para o gesso e para a lâ de rocha os parâmetros apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades Térmicas

Material	Calor Específico J/kg°C	Condutividade Térmica W/m°C		Densidade kg/m ³
		20-100 °C	T>=800, 0.27	
Gesso	Conforme Figura 2.11	0,25	0,12	20 °C, 698
		0,12	0,27	T>=800 °C, 576
Lã de Rocha	840	0,035		25

Fonte: Nassif, Yoshitake e Allam (2014)

Para a elaboração do modelo numérico são necessários a emissividade e o coeficiente de transferência de calor por convecção do gesso. Valores utilizados pelos autores estudados são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Emissividade e coeficiente de convecção de painéis de gesso

Emissividade		Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² /K)		Fonte
Exposto	Não Exposto	Exposto	Não Exposto	
0,3	0,8	25	10	Feng, Wang e Davis (2003a)
0,8	0,6	25	9	Thomas (2010)
0,9	0,9	-	-	Wakili <i>et al.</i> (2007)
1	0,8	25	9	Eurocode 1 (2002)
0,8	0,8	5	12	Jones (2001)

Keerthan e Mahendran (2012) apresentaram as propriedades térmicas dos painéis de gesso de acordo com uma série de autores, cujos resultados são apresentados na Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14 a seguir.

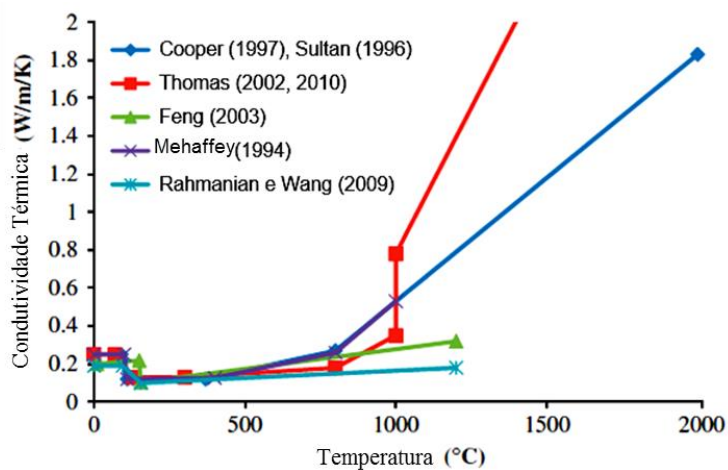


Figura 2.12 – Condutividade térmica do painel de gesso
 Fonte: Adaptado de Keerthan e Mahendran (2012)

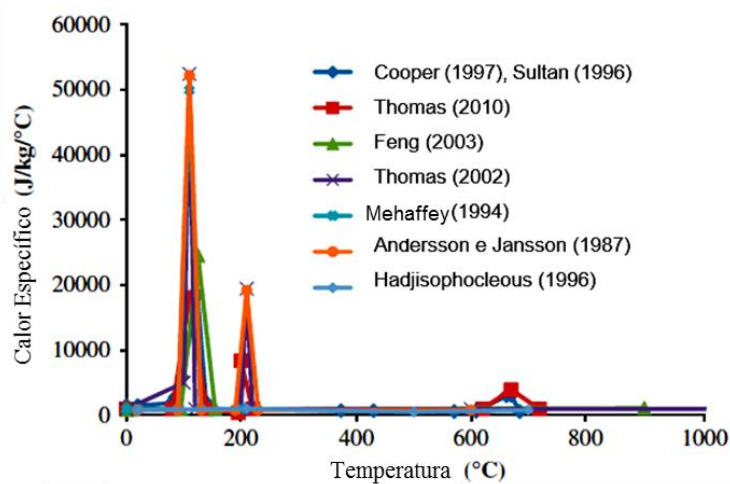


Figura 2.13 – Calor específico do painel de gesso
 Fonte: Adaptado de Keerthan e Mahendran (2012)

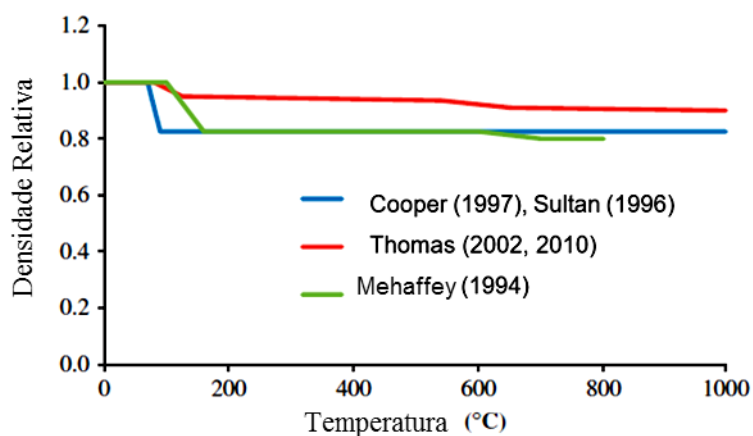


Figura 2.14 – Densidade relativa do painel de gesso
 Fonte: Adaptado de Keerthan e Mahendran (2012)

2.2.3.2 *Oriented strand board (OSB)*

A placa de fibras orientadas de madeira, ou OSB, é constituída por uma sucessão de tiras de madeira dispostas em camadas, de forma predeterminada. As tiras, ou strands, devem ter comprimento maior que 50mm e espessura menor que 2mm, unidas por adesivo. Os strands nas camadas externas se alinham paralelamente a face da placa. Nas camadas centrais, os strands, são distribuídos aleatoriamente, podendo estar inclusive, posicionados perpendicularmente aos strands das camadas externas (SOUZA, 2012).

Segundo Cabral *et al.* (2006) as chapas de OSB começaram a ser produzidas no Brasil em 2002. Originalmente a madeira utilizada era pinus, mas a crescente demanda por esta madeira tem motivado pesquisas com outras espécies, principalmente eucalipto, para suprir a indústria de placas de partículas.

A ABNT NBR 14810-1:2013 “Chapas de madeira aglomerada Parte 1: Terminologia” prevê que a geometria e homogeneidade das partículas, os tipos de adesivo, a densidade, os processos de fabricação e a utilização ou não de aditivo podem ser modificados de forma a obter placas com propriedades mais apropriadas ao seu objetivo. Desta forma, tem-se um componente do painel com grande potencial de variação de propriedades.

Segundo Chen *et al.* (2013), um dos desafios da indústria está em elevar o tempo de resistência ao incêndio de sistemas de parede com placas OSB. O autor afirma que para empreendimentos de menor altura, o sistema tem desempenho satisfatório, mas empreendimentos de média altura em diante demandam uma maior resistência e, devido a combustibilidade do OSB, o sistema pode não ser o mais indicado.

Chen *et al.* (2013) submeteu uma série de painéis LSF ao incêndio padrão ISO 834 (2012) em laboratório enquanto aplicava uma carga constante em cada montante. Um dos corpos de prova, apresentava uma placa de OSB em contato com a mesa do montante no lado oposto ao incêndio. Ao chegar aos 148 min de ensaio foi observado fumaça proveniente da combustão do OSB que durou 2 horas até que a placa fosse completamente consumida. Apesar do painel ter ultrapassado o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 120 minutos o autor concluiu que o sistema não seria aconselhável para uma edificação de altura média ou maior, devido

ao risco gerado pela presença de fumaça e que a combustão do OSB poderia levar o incêndio a se espalhar.

Manzello, Park e Cleary (2009) estudou a capacidade de chamas levarem OSB a entrar em combustão. As chamas chegavam a 850°C e foi observado pelo autor que sob certas circunstâncias de ventilação, número de chamas e angulação o OSB é levado a combustão.

TenWolde, McNatt e Krahn (1988) estudou o efeito da variação da temperatura em diversos tipos de placas compostas de madeira, entre elas o OSB. O autor concluiu que, para madeiras em geral, as propriedades térmicas não são afetadas pela variação da temperatura de forma significativa.

Na Tabela 2.5 são apresentadas as propriedades do OSB encontradas na literatura.

Tabela 2.5 – Propriedades físicas do OSB

Fonte	Densidade (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg.K)
KRONO (2002)	580 - 660	0,12	-
EPF (2001)	650	0,13	-
Krüger, Adriazola e Suzuki (2008)	568	0,133	-
WPIF (2014)	600 - 680	0,13	-
ABNT NBR 15220-2 (2005)	650 - 750	0,17	2300
	550 - 650	0,14	
Czajkowski <i>et al.</i> (2016)	619	-	1550
TenWolde, McNatt e Krahn (1988)	600 - 800	0,104 - 0,136	1500 - 2000

2.2.3.3 Fibrocimento

A produção de placas de fibrocimento é regulada pela ABNT NBR 15498:2016 “Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio”. Segundo a norma, placa de fibrocimento é uma mistura de cimento Portland, agregados e aditivos com reforço de fibras, fios, filamentos ou telas.

Xu (2000) estudou o efeito da variação da concentração de areia e sílica na pasta de cimento de placas cimentícias sobre as propriedades térmicas. O autor conclui que a adição de areia leva ao aumento da condutividade térmica e calor específico, enquanto que a sílica causa efeito contrário, atribuindo o comportamento a diferença da superfície de contato areia/pasta e sílica/pasta.

A ABNT NBR 15498:2014 tem como uma de suas orientações, a realização de ensaio de resistência ao fogo. Precon (2014) disponibiliza em catálogo técnico resultados das investigações feitas para normatização de seu produto. Além de disponibilizar a densidade (1400 a 1700 kg/m³) e a condutividade térmica (0,48 W/m.K), apresenta ainda modelos de painel de LSF constituídos de placas de fibrocimento com respectivo tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Os dois painéis sugeridos podem ser vistos na Figura 2.15. O primeiro painel é composto de duas placas de fibrocimento com 10 mm de espessura e perfis de 90 mm de altura dispostos a cada 40 centímetros e alcança TRRF de 30 minutos. O segundo painel utiliza duas placas de 10 mm de cada lado de perfis de 90 mm e utiliza manta de rocha preenchendo a cavidade ente painéis, alcançando TRRF de 120 minutos.

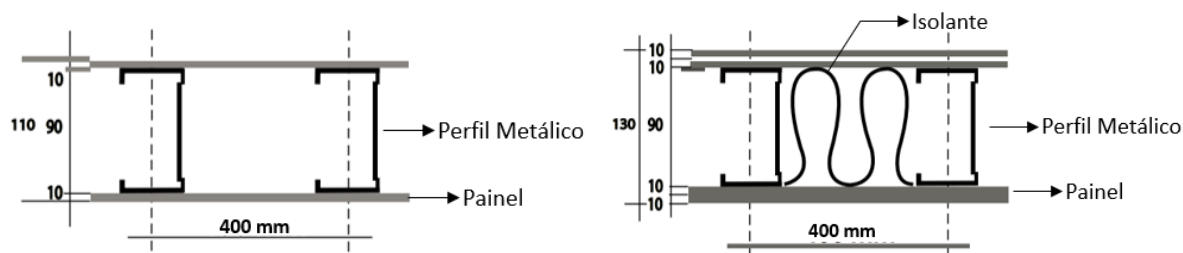


Figura 2.15 – Painéis metálicos para TRRF 30 e 120 min
Fonte: Precon (2014)

Medeiros *et al.* (2014) obteve valores de densidade de 1500 kg/m³ e condutividade térmica entre 0,30 e 0,35 W/m.K em um levantamento feito em placas brasileiras.

Para construção do modelo citado no item 2.2.3.2, Susanti, Homma e Matsumoto (2011) utilizaram, com base em ASHRAE (2005), como propriedades térmicas, a densidade de 2400 kg/m³, a condutividade térmica de 0,5 W/m.K e o calor específico de 800 J/kg.K

Dentre as características das placas cimentícias, diversos autores e fabricantes citam a incombustibilidade. O fabricante Decorlit (2015) especifica incombustibilidade até a temperatura de 1100°C, temperatura essa, em que ocorreu a interrupção do ensaio.

Em um levantamento das propriedades térmicas de placas cimentícias brasileiras, Pierin e Silva (2014) observou haver grande variação entre fabricantes nas propriedades de interesse. O autor realizou então um estudo comparativo, por meio

de um modelo numérico variando as propriedades de cada fabricante. A conclusão foi de que não houve impacto significativo apesar da variação de tais propriedades.

Pierin, Silva e Rovere (2015) desenvolveu ATERM, um programa de computador que usa elementos finitos efetuar análise térmica de estruturas bidimensionais em regime transiente. O programa foi validado comparando diversos resultados com os dos programas ANSYS e Super Tempcalc. Dentre as estruturas simuladas pelo autor está uma laje nervurada, preenchida com EPS e com placa cimentícia como fechamento na parte inferior da estrutura, adotando para a placa cimentícia a densidade de 1200 kg/m^3 , condutividade térmica de $2,22 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e calor específico de 840 J/kg.K .

Na Tabela 2.7 estão apresentadas as propriedades das placas de fibrocimento encontradas em diferentes fontes, incluindo as já citadas neste item.

Tabela 2.6 – Propriedades físicas da placa de fibrocimento

Fonte	Densidade (kg/m^3)	Condutividade Térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Calor específico (J/kg.K)
Ribas (2013)	1.330	0,35	1050
Xu, (2000)	1.730 – 2.200	0,33 - 0,58	642 - 788
Medeiros <i>et al.</i> (2014)	1.500	0,30 - 0,35	-
PRECON (2014)	1.400 - 1.700	0,48	-
ASHRAE (2005)	2400	0,5	800
DECORLIT (2015)	1.700	0,35	-
Pierin, Silva e Rovere, (2015)	1.200	2,22	840
DUROCK	1.200	2,22	-
ETERNIT (2014)	1.700	0,35	-
BRASILIT	1.700	0,48	-
AQUAPANEL	1.150	0,35	-
ABNT NBR 15220-2 (2005)	1.400-2.200	0,65-0,95	840

Conforme apontado por Pierin e Silva (2014) há uma grande variedade nas propriedades das placas de fibrocimento. Tendo em vista as observações feitas por Xu (2000) estas variações se devem a diferença de quantidade e qualidade dos materiais utilizados na fabricação das placas.

2.2.3.4 Cimento-madeira

A placa de cimento-madeira é considerada um compósito, composto de partículas de madeira, cimento, água e aditivos, conformados pela prensagem a frio. Apesar de não ser comum no Brasil, tem boa inserção nos mercados da Europa e Japão (RIBEIRO, 2015).

Segundo Moslemi (1999), apesar da presença de madeira, os painéis são incombustíveis, resistentes a umidade e a ataques biológicos. Apresentam ainda boa resistência mecânica, e tem função isolante térmica e acústica.

Krüger, Adriazola e Suzuki (2008) avaliou o desempenho térmico de vários tipos de placas compostas de madeira e comparou os resultados com as propriedades indicadas pela ABNT NBR 15220-2:2005. Para a placa de cimento-madeira, foram encontradas a densidade de 1280,04 kg/m³ e a condutividade térmica de 0,286 W/m°C, contra os 450-550 kg/m³ e 0,15 W/m°C sugeridos pela norma. Não há referência no trabalho ou na norma sobre a composição da placa de referência, o que poderia explicar a discrepância de resultados. Na Figura 2.16 pode-se ver o resultado do ensaio na placa de cimento madeira que foi feito expondo-se o painel em ambiente controlado a temperatura ambiente ao longo do dia. Este estudo teve foco no comportamento da placa em baixas temperaturas, visando o conforto térmico, e teve continuidade no trabalho de Suzuki e Krüger (2010).

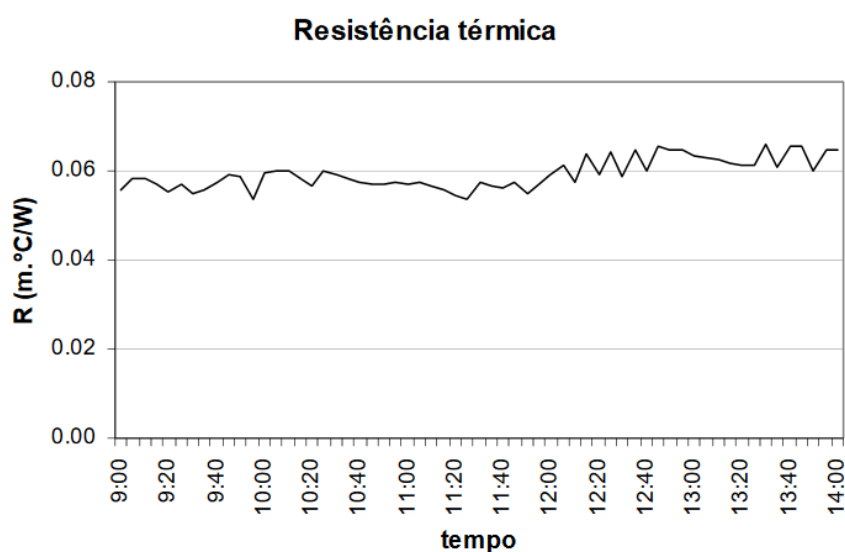


Figura 2.16 – Placa cimento madeira - Resist. térmica x tempo
Fonte: Krüger, Adriazola e Suzuki (2008)

Suzuki e Krüger (2010), baseou-se nos resultados obtidos por Krüger, Adriaola e Suzuki (2008) para calibrar um modelo numérico utilizando o programa ARQUITROP, obtendo para a placa de cimento-madeira valores acurados de temperatura até as 16:00 horas. A partir deste ponto a precisão cai, como pode ser visto na Figura 2.17, devido a considerações do programa que não se aplicavam as condições reais a partir daquele momento.

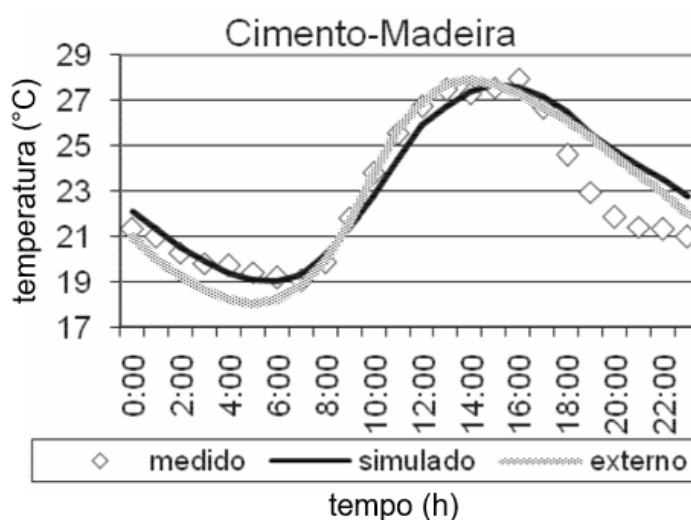


Figura 2.17 – ARQUITROP x modelo real
Fonte: Suzuki e Krüger (2010)

Hofmann e Muehlnikel (2010) estudaram um incêndio real ocorrido em um edifício de cinco andares. O incêndio foi iniciado por uma vela acesa em cima de uma televisão e ocasionou a morte de duas pessoas. Em seus estudos, que envolveram o ensaio em laboratório de diversos materiais presentes na construção, foram constatadas várias irregularidades normativas. Segundo as normas alemãs, o material de revestimento das escadas deve ser incombustível. A investigação experimental indicou que as placas de cimento-madeira usadas nas escadas não atendiam a este requisito, dificultando a evacuação do edifício e o acesso dos bombeiros durante o incêndio.

A observação da combustibilidade da placa de cimento-madeira por Hofmann e Muehlnikel (2010) vai de encontro a vários autores (KRÜGER *et al.*, 2009 ; SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012 ; MOSLEMI, 1999), que citam a resistência ao fogo como uma das vantagens deste compósito. Isso mostra que as características das placas podem variar de acordo com sua composição.

Bouguerra (1999) determinou, em pesquisas experimentais, a condutividade térmica de compósitos de madeira aglomerada com cimento e argila. Ao variar a temperatura e o percentual de cada componente do compósito o autor concluiu que a condutividade térmica varia significativamente em função destes dois parâmetros.

Ao estudar um painel utilizado para isolamento térmico de uma fábrica, Susanti, Homma e Matsumoto (2011) validou com sucesso um modelo numérico representativo do painel, utilizando as propriedades físicas de placas de cimento-madeira sugeridas pela ASHRAE (2005). Para a densidade, foi utilizado o valor de 550 kg/m^3 , para a condutividade térmica $0,15 \text{ W/m.K}$ e para o calor específico 840 J/kg.K .

Wang *et al.* (2016) utilizou resíduos de madeira aglomerada com cimento na proporção de massa de 3:7 para fabricar uma placa, com objetivo de apresentar um destino para a madeira residual da construção civil. A placa, de 1.540 kg/m^3 foi submetida a diversos testes, dentre eles o de condutividade térmica, que resultou em $0,29 \text{ W/m.K}$.

2.2.3.5 Lã de vidro

A manta isolante composta por fibras de vidro, conhecida como lã de vidro, é produzida em alto forno pela aglomeração de sílica e sódio com resinas sintéticas. Este material não propaga chamas, mas nos casos em que possui revestimento vinílico pode emitir substâncias tóxicas quando este entra em combustão, o que acontece por volta de 260°C .

Henderson (1982) propôs um método para determinação do calor específico de compósitos. Em seu trabalho, avaliou o comportamento de dois tipos de fibra de vidro em temperaturas variando entre 60°C e 730°C . Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.7 juntamente com resultados apresentados por diversas fontes para as características físicas da lã de vidro.

Tabela 2.7 - Propriedades físicas da lã de vidro

Fonte	Composição		Ponto de fusão (°C)	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (w/m.K)	Calor específico (J/kg.K)
	Fibra de vidro (%)	Aglomerante				
ISOVER (2012)	83 - 100	Resina Fenólica	750	10 - 100	-	-
Roberts, Webber e Ezekoye (2015)	78 - 97	Resina Fenólica, formaldeído e ureia	1204	21	0,039	-
Levinson <i>et al.</i> (2000)	-	-	-	13	0,039	-
	-	-	-	24	0,040	-
Henderson (1982)	50 - 80	Resina Fenólica e formaldeído	-	-	-	711
	56,6	Copolímero Acrylonitrila-butadieno	-	-	-	878
Kreith (2003)	-	-	-	200	0,039	669
ABNT NBR 15220 (2005)	-	-	-	10 - 100	0,045	700

2.2.3.6 Lã de PET

O poli(tereftalato de etileno) (PET) é amplamente utilizado como alternativa de embalagem de bens de consumo devido ao seu baixo custo e as suas propriedades químicas e de resistência mecânica adequadas para este fim. Mas, por ser um polímero derivado de petróleo, apresenta uma lenta degradação, motivando a reciclagem do material (MOURA, 2011).

A lã de pet é um produto gerado da reciclagem deste polímero, dando origem a uma manta com propriedades interessantes no isolamento térmico. Quando exposta diretamente ao incêndio, ela não propaga chama e não libera vapores tóxicos (LIMA, 2013).

Por outro lado, segundo Moura (2011) e o fabricante Sagon do Brasil, o material apresenta um ponto de fusão relativamente baixo, variando entre 220°C e 260°C. Desta forma a manta deixa de contribuir para a proteção térmica do perfil metálico a partir de então.

2.2.4 Modelos de Incêndio

O aumento da temperatura dos gases do ambiente em chamas, e a transferência deste calor para os elementos estruturais através da convecção e da radiação tem relevância devido a possibilidade da redução da resistência e da rigidez

dos elementos componentes da estrutura bem como devido ao aparecimento de novos esforços solicitantes.

O comportamento do incêndio depende de uma série de fatores que conferem uma grande variabilidade ao evento. O gradiente de temperatura varia por exemplo, em função do tipo, quantidade e distribuição da carga de incêndio, a compartimentação do ambiente foco do incêndio, a quantidade, o tamanho e a distribuição de aberturas.

Para fins de análise térmica, tornam-se convenientes representações genéricas do incêndio. Existem diversas formas de se representar um incêndio, sendo os mais usuais apresentados nos itens a seguir.

2.2.4.1 Modelo de incêndio real

Em geral, o desenvolvimento de um incêndio real segue três etapas, a ignição, a fase de aquecimento e a fase de resfriamento. A relação genérica entre a temperatura e o tempo durante um incêndio qualquer, com a indicação de cada uma das fases, é apresentado na Figura 2.18.

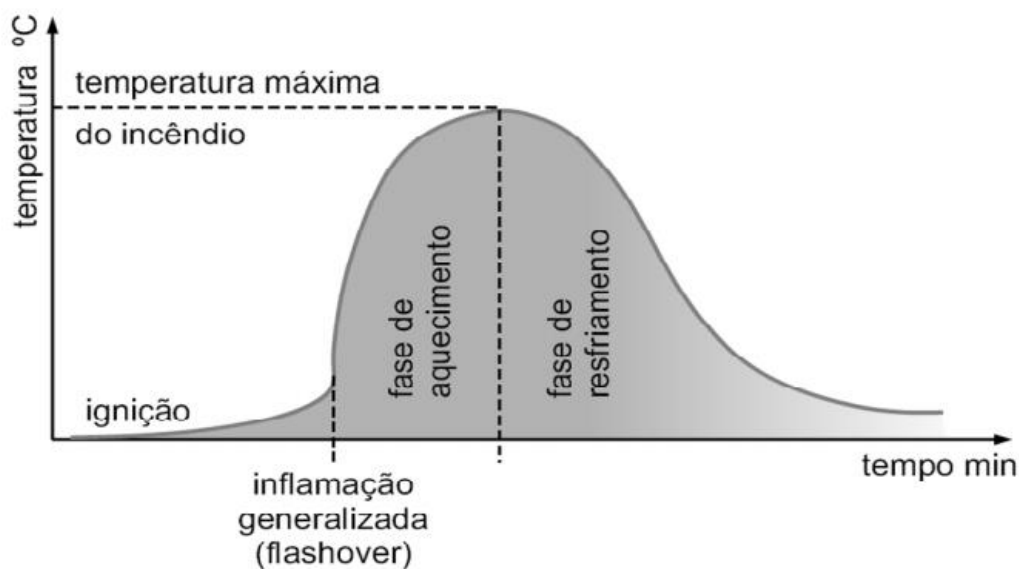


Figura 2.18 - Curva temperatura x tempo
Fonte: Rodrigues (2006)

Na fase de ignição o incêndio acontece de forma localizada, produz uma grande quantidade de fumaça e o aquecimento é lento. Esta fase também é conhecida como *pré-flashover* e as medidas tradicionais de combate a incêndio são eficazes no

controle das chamas (CALMON; SILVA; MIRAMBELL, 2000). É a fase de maior risco a vida devido à liberação de gases tóxicos, porém não oferece risco de colapso estrutural.

No instante indicado como *flashover*, ocorre um brusco aumento de temperatura. Neste instante, todo material orgânico entra em combustão espontânea (KAEFER; SILVA, 2003) e o incêndio toma todo o compartimento dando início à fase de aquecimento. Nessa fase, a temperatura aumenta rapidamente até atingir seu valor máximo, o que indica que toda carga combustível foi consumida.

Após consumido o material combustível disponível no compartimento, o incêndio entra na fase de resfriamento, com redução da temperatura até sua extinção.

Cada incêndio apresenta características únicas de acordo com os parâmetros da situação, portanto, a curva "*temperatura x tempo*" pode assumir diversas configurações, a depender das características do material combustível, características do compartimento em incêndio e outros parâmetros.

Para desenvolver a curva de incêndio real, são necessárias informações sobre dimensões e características físicas do ambiente, características térmicas do material combustível, aberturas no ambiente, medidas de combate a incêndio, entre outros. Para viabilizar a comparação de resultados entre pesquisas diferentes foi sugerida a utilização de curvas de incêndio padrão. Várias entidades normativas apresentam modelos de incêndio para utilização e os principais são vistos nos itens subsequentes (KIMURA, 2009; MORENO JUNIOR; MOLINA, 2012).

2.2.4.2 Modelo de incêndio natural

Trata-se de uma simplificação do modelo de incêndio real, no qual se desconsidera a primeira etapa, *pré-flashover*, e se considera a fase de resfriamento de forma linear, conforme ilustrado na Figura 2.19.

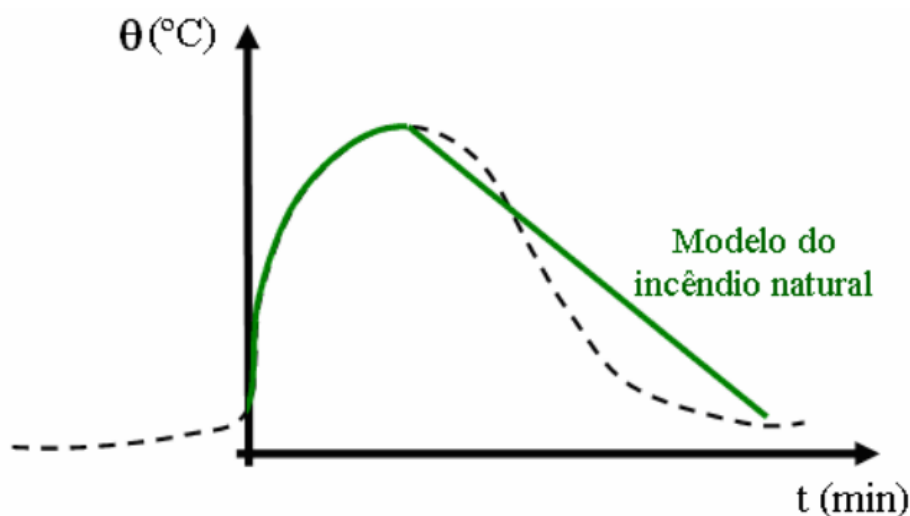


Figura 2.19 – Modelo de incêndio natural
 Fonte: Regobello (2007)

O gráfico mostra a variação da temperatura dos gases em função do tempo equivalente de resistência ao fogo. Segundo a ABNT NBR 14432:2001, “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento”, o tempo equivalente de resistência ao fogo é o tempo, determinado a partir do incêndio-padrão, necessário para que um elemento estrutural atinja a máxima temperatura calculada por meio do incêndio natural considerado. Esse modelo tem por base ensaios que simulam situações reais de incêndio. Para sua correta utilização, deve-se levar em conta a carga de incêndio, o grau de ventilação do compartimento, entre outros (SILVA, 2001).

Este modelo precisa ser calibrado com base de ensaios que simulem situações reais do incêndio no ambiente alvo do estudo.

2.2.4.3 Modelos de incêndio padrão

Apesar de simplificado em relação ao incêndio real, o incêndio natural ainda depende de calibração por meio de ensaios e varia para cada situação, dificultando a reprodutibilidade e comparação entre diferentes estudos. Desta forma, é convencional o uso de uma curva padronizada para representação do incêndio para análise experimental de materiais e estruturas. Este é o modelo de incêndio padrão.

No modelo de incêndio padrão admite-se a temperatura dos gases do ambiente em chamas em concordância com as curvas padronizadas para ensaio. As curvas de incêndio padrão fornecem a temperatura dos gases em função do tempo

requerido de resistência ao fogo. Segundo a ABNT NBR 14432:2001 o tempo requerido de resistência ao fogo é o tempo mínimo de resistência ao fogo, exigido pela norma, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão. Os modelos mais aplicados são os das normas ISO 834, ASTM E 119 e o EUROCODE 1 (REGOBELLO, 2007).

A Equação 12, apresentada a seguir, descreve o modelo de incêndio padrão proposto pela *International Organization for Standardization*, na ISO 834 *Fire – resistance tests – Elements of building construction* e sugerido pela ABNT NBR 14432:2001:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (12)$$

Onde θ_g é a temperatura dos gases do ambiente em chamas em °C, θ_0 é a temperatura inicial dos gases, usualmente adotada como 20°C, e t o tempo incremental, em minutos.

A *American Society for Testing and Materials* propõe por meio da norma ASTM E 119-16 a relação “*temperatura x tempo*” em valores tabelados apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Curva “temperatura x tempo” discretizada

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Fonte: Adaptado de ASTM E 119 (2016)

Por meio dos valores tabelados, é possível estabelecer:

$$\theta_g = \theta_0 + 750[1 - e^{-3,79533\sqrt{t}}] + 170,41\sqrt{t} \quad (13)$$

Na Equação 13, a temperatura θ é expressa em graus Celsius e o tempo t é expresso em horas.

O EUROCODE 1, EN 1991-1-2:2002, indica três possibilidades para obtenção da temperatura dos gases em função do tempo de incêndio padrão. A primeira é a curva de incêndio padrão estabelecida pela ISO 834, apresentada pela equação 12. A segunda trata-se da curva de incêndio aplicável a elementos exteriores, expressa pela equação 14 e a terceira é a curva de incêndio de hidrocarbonetos expressa pela equação 15.

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (14)$$

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (15)$$

O EN 1991-1-2:2002, define a curva de incêndio externo, como uma curva “*temperatura x tempo*” elaborada para ser usada no lado externo de paredes que podem ser expostas ao fogo a partir de diferentes direções, seja ela interna ou externa ao compartimento.

O EN 1991-1-2:2002, define também a curva de incêndio padrão para representar um modelo com fogo apenas internamente ao compartimento.

A curva de hidrocarbonetos apresentada pelo EN 1991-1-2:2002, ou curva “H”, é aplicável para materiais a base de hidrocarbonetos (COSTA, 2008)

Na Figura 2.20 é apresentado um comparativo entre o comportamento das diferentes curvas “*temperatura x tempo*” propostas pelas principais normas nacionais e internacionais.

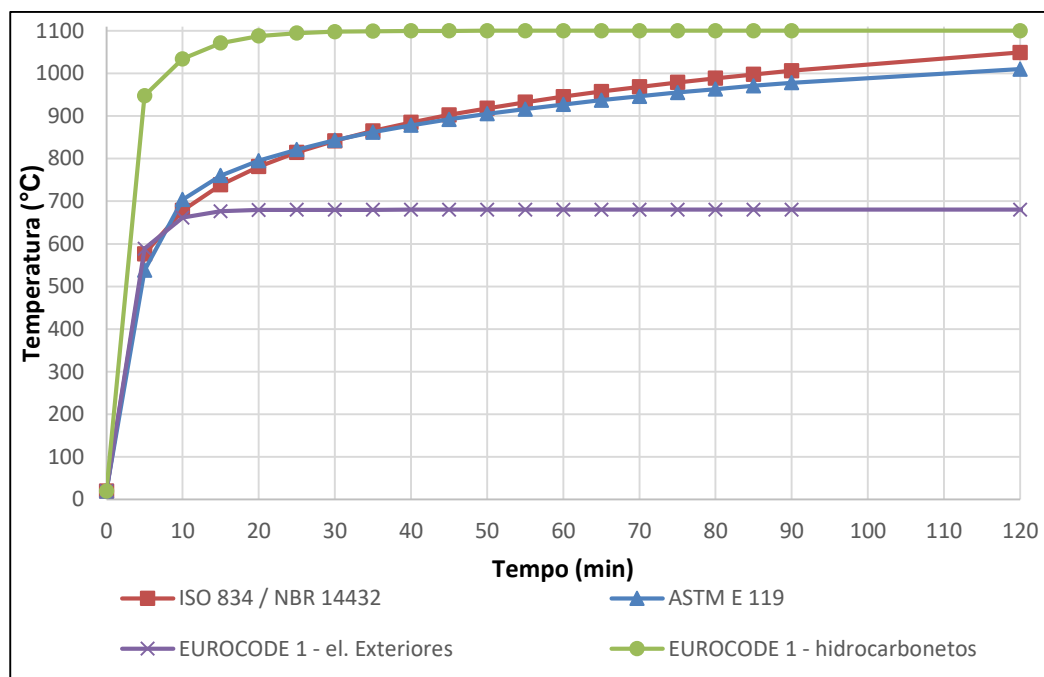


Figura 2.20 – Curvas “temperatura x tempo” das principais normas
Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o modelo padronizado não apresenta fase de ignição nem fase de resfriamento em nenhuma das proposições. As curvas propostas pelo ASTM E 119:2016, pela ISO 834:2012 e pela ABNT NBR 14432:2001 têm comportamento muito semelhante entre si, enquanto que as curvas do EN 1991-1-2:2002 têm comportamento distinto, com a curva de incêndio para materiais a base de hidrocarbonetos apresentando uma taxa de aquecimento mais acentuada e a curva de incêndio de elementos exteriores apresentando taxa de aquecimento mais reduzida.

Ao conhecer a curva de incêndio padrão a ser adotada e os materiais envolvidos no problema, é possível realizar a análise térmica e, dessa forma, conhecer o gradiente de temperatura em tais materiais. No tocante aos elementos de aço e mistos de aço e concreto, a ABNT NBR 14323:2013 permite a utilização da análise numérica e da análise simplificada, ambas apresentadas a seguir.

2.2.5 Análise Simplificada

Este método pode ser aplicado em problemas que envolvem elementos estruturais de aço sem e com proteção térmica, situados no interior da edificação, totalmente imersos no compartimento em chamas, considerando-se fluxo de calor unidimensional e distribuição de temperatura uniforme no elemento. Estruturas dos elementos de vedação do compartimento em chamas ou as estruturas externas à

edificação, a favor da segurança, também podem ser verificadas por este método (PITANGA, 2004).

2.2.5.1 Temperatura em elementos não revestidos

Em uma situação em que o elemento é submetido à ação do fogo por todos os lados, assumindo que a temperatura no aço T_a é homogênea em toda a seção e a temperatura dos gases é T_g , o equilíbrio térmico para essa situação é dado por meio da equação (WANG, 2002):

$$V\rho_a c_a \frac{dT_a}{dt} = \alpha(T_g - T_a)A \quad (16)$$

Na equação 16, V é o volume e A é a área da superfície exposta, ρ_a é a massa específica e c_a é o calor específico, todos os parâmetros referentes ao material exposto, α é o coeficiente total de transferência de calor, resultante da soma dos coeficientes de transferência de calor por convecção (α_c) e radiação (α_r). Na equação, o produto à esquerda da igualdade é o calor necessário para aumentar a temperatura do material em um tempo infinitesimal e o produto à direita é o calor fornecido pelos gases ao elemento.

Ao integrar numericamente a equação 16, assumindo incrementos de tempo Δt inferiores a cinco segundos, obtém-se a equação 17, que fornece a variação de temperatura no aço.

$$\Delta T_a = \frac{A/V}{\rho_a c_a} \alpha (T_g - T_a) \Delta t \quad (17)$$

A razão A/V é conhecida como fator de massividade.

A equação 16 é adotada pelo EUROCODE, como mostrada e pela ABNT NBR 14323:2013 reescrita conforme a equação 18 para barras prismáticas.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/A_g)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (18)$$

Em que $\Delta\theta_{a,t}$ representa a variação de temperatura no elemento estrutural em °C, Δt o tempo em que a variação ocorre em segundos, u o perímetro da seção transversal exposto ao incêndio do elemento estrutural em metros, A_g é a área da seção transversal do elemento estrutural em metros quadrados, c_a é o calor específico do aço (J/kg°C), ρ_a é a massa específica do aço, a razão u/A_g é o fator de massividade para barras prismáticas, φ é o fluxo de calor por unidade de área e k_{sh} é um fator de correção para o efeito de sombreamento. No caso de seções fechadas como as seções caixão e tubular, considera-se k_{sh} com valor unitário. No caso de seções I ou H, pode ser determinado por:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} \quad (19)$$

Na equação 18, $(u/A_g)_b$ é o valor do fator de massividade determinado como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética que envolve o perfil e a área da seção transversal do perfil.

O fluxo de calor (φ) é dado pela soma do fluxo de calor devido à convecção (φ_c) com o fluxo de calor devido à radiação (φ_r), que podem ser obtidos conforme apresentado nas equações 20 e 21.

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (20)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (21)$$

Nas equações 20 e 21, θ_a é a temperatura na superfície do aço em °C, θ_g a temperatura dos gases em °C, ε_{res} é a emissividade resultante que pode ser adotada como igual a 0,70 e α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção que para efeitos práticos pode ser adotado como 25 W/m² °C no caso de incêndio padrão e como 35 W/m² °C para incêndio natural, segundo a ABNT NBR 14323:2013.

A ABNT NBR 14323:2013 orienta ainda que não se utilize Δt maior que 5 segundos e que a razão u/A_g não seja menor que 10 m⁻¹.

2.2.5.2 Temperatura em elementos revestidos

Ainda considerando uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação de temperatura, de acordo com a ABNT NBR 14323:2013, $(\Delta\theta_{a,t})$ pode ser obtida conforme a equação 22 apresentada a seguir.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m (u_m/A_g) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t}{t_m \rho_a c_a} - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{(4/\xi) + 1} \quad (22a)$$

Mas,

$$\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0 \quad (22b)$$

Com,

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m (U_m/A_g) \quad (23)$$

Nessa equação, u_m/A_g é o fator de massividade para elementos estruturais revestidos contra incêndio (m^{-1}), u_m é o perímetro efetivo do material de revestimento contra incêndio, igual ao perímetro da face interna do material de revestimento contra incêndio mais metade dos afastamentos desta face ao perfil de aço em metros, t_m é a espessura do material de revestimento contra incêndio em metros, λ_m é a condutividade térmica do material de revestimento contra incêndio ($W/m^\circ C$) e ρ_m é a massa específica do material de revestimento contra incêndio, sendo Δt não maior que 30 s.

Conhecendo-se a temperatura dos elementos estruturais em um dado tempo, sob certa solicitação e conhecendo-se a variação das propriedades mecânicas do material no tempo, é possível prever o tempo que o elemento resistiria se exposto a esta situação. Este assunto é melhor abordado no item a seguir.

2.2.6 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

O risco de um incêndio pode ser visto como o perigo da ocorrência dele, que depende do tipo de ocupação do edifício ou compartimento e das consequências no caso da ocorrência (SILVA, 2014).

A ABNT NBR 14432:2001 define TRRF como o tempo mínimo resistido por um elemento construtivo quando exposto a um incêndio padrão. A norma apresenta uma tabela com o TRRF exigido de acordo com o tipo de ocupação e altura da edificação. A ocupação tem importância pois diz respeito a quantidade de pessoas, compartimentação e acessibilidade do local. Na consideração da norma, a altura é a distância entre o ponto de saída da edificação e o piso do último pavimento, excluindo áreas de apoio, como casas de máquinas, barriletes e reservatórios de água (SILVA, 2014).

Ainda segundo Silva (2014), mesmo sendo medido em minutos, o TRRF não é um tempo real. O TRRF não corresponde ao tempo de desocupação do edifício, nem ao tempo de deslocamento do corpo de bombeiros até o local, nem ao tempo de duração de um incêndio. O TRRF nem mesmo é calculado. O TRRF é um tempo arbitrado, aceito pela sociedade, para ser associado a uma temperatura da curva de incêndio padrão. Este tempo tem um valor elevado, de modo que a probabilidade de ser atingido seja reduzida dentro do período da vida útil da edificação.

Conhecendo-se o TRRF da edificação, dimensiona-se o elemento estrutural de forma que este apresente um tempo de resistência ao fogo (TRF) adequado.

Na Figura 2.21 pode-se observar o processo de dimensionamento de um elemento estrutural de concreto armado a ser utilizado em uma edificação sujeita a incêndio.

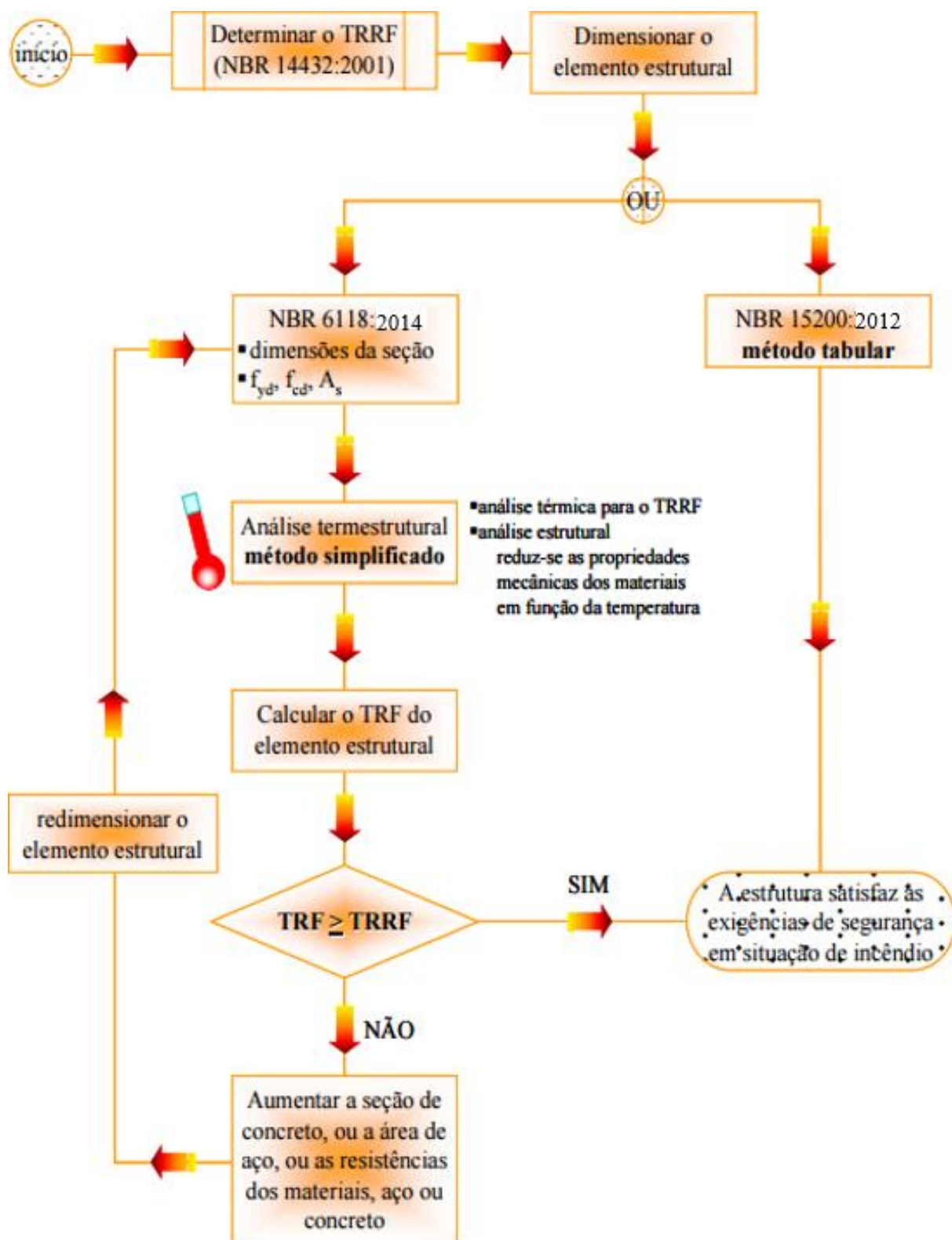


Figura 2.21 – Dimensionamento de elemento estrutural em situação de incêndio
 Fonte: Adaptado de Costa, 2008

Silva (2013) avaliou o desempenho de um sistema LSF em diversas situações, entre elas a resistência ao incêndio. O painel é constituído por perfis de aço formado a frio de 0,80 mm de espessura, placa cimentícia de 10 mm no exterior, gesso

acartonado de 12,5 mm no interior e manta de 50 mm de lã de vidro na cavidade. O sistema foi ensaiado e considerado capaz de atender TRRF de 30 min.

Como pode ser visto na Tabela 2.9, a NT08 (2014) apresenta o TRRF a que se adequam diversos painéis formados por diferentes configurações de tipo de perfil e quantidade de placas de gesso acartonado.

Tabela 2.9 - TRRF painéis de drywall com gesso acartonado

Itens	Paredes ensaiadas conforme normas ABNT (ver Item 3)	Características das paredes				Resultado dos ensaios			
		Espessura total da parede (mm)	Largura da estrutura de aço (mm)	Espaçamento da estrutura de aço (mm)	Qtd. tipo e esp. (mm) da chapa de gesso de cada lado da estrutura	Tempo de atendimento aos critérios de avaliação			Resistência ao fogo CF (corta-fogo)
						Integridade	Estanqueidade	Isolação térmica	
1	73/48/600/ 1 ST 12,5 - 1 ST 12,5	73	48	600	1 ST 12,5	30	30	30	CF 30
2	95/70/600/ 1 ST 12,5 - 1 ST 12,5	95	70	600	1 ST 12,5	30	30	30	CF 30
3	100/75/600/ 1 ST 12,5 - 1 ST 12,5	100	75	600	1ST 12,5	30	30	30	CF 30
4	115/90/600/ 1 ST 12,5 - 1 ST 12,5	115	90	600	1 ST 12,5	30	30	30	CF 30
5	98/48/600/ 2 ST 12,5 - 2 ST 12,5	98	48	600	2 ST 12,5	60	60	60	CF 60
6	120/70/600/ 2 ST 12,5 - 2 ST 12,5	120	70	600	2 ST 12,5	60	60	60	CF 60
7	140/90/600/ 2 ST 12,5 - 2 ST 12,5	140	90	600	2 ST 12,5	60	60	60	CF 60
8	98/48/600/ 2 RF 12,5 - 2 RF 12,5	98	48	600	2 RF 12,5	90	90	90	CF 90
9	120/70/600/ 2 RF 12,5 - 2 RF 12,5	120	70	600	2 RF 12,5	90	90	90	CF 90
10	140/90/600/ 2 RF 12,5 - 2 RF 12,5	140	90	600	2 RF 12,5	90	90	90	CF 90
11	108/48/600/ 2 RF 15 - 2 RF 15	108	48	600	2 RF 15	120	120	120	CF 120
12	130/70/600/ 2 RF 15 - 2 RF 15	130	70	600	2 RF 15	120	120	120	CF 120
13	135/75/600/ 2 RF 15 - 2 RF 15	135	75	600	2 RF 15	120	120	120	CF 120
14	150/90/600/ 2 RF 15 - 2 RF 15	150	90	600	2 RF 15	120	120	120	CF 120

Fonte: NT08, 2014

Muitas vezes, a resistência ao incêndio de determinado elemento, é obtido por meio de ensaios. Porém, programas experimentais para análise termoestrutural envolvem custos elevados com o consumo de materiais e tipo de equipamento necessário. Desta forma, a análise numérica é uma alternativa viável para o estudo do comportamento dos sistemas expostos a altas temperaturas.

No item a seguir apresentam-se algumas considerações sobre a análise numérica, alternativa essa admitida pela norma ABNT NBR 14323:2013.

2.2.7 Análise Numérica

A análise térmica em caráter numérico busca determinar gradiente de temperatura em um sistema estrutural submetido a um campo térmico. Visto que a temperatura do ambiente varia com o tempo, estas análises têm característica transiente, além de levar em consideração a não linearidade do material, já que suas propriedades mecânicas variam em função da temperatura (REGOBELLO, 2007).

O resultado esperado da análise térmica é o gradiente de temperatura dos materiais expostos ao incêndio. Para tanto, os parâmetros a serem definidos são o campo térmico do compartimento em regime transiente e as propriedades térmicas dos materiais. A análise térmica oferece também subsídios para uma posterior análise acoplada termoestrutural, que pode ser usada, por exemplo, para avaliação da redução da capacidade resistente de um sistema estrutural.

Atualmente diversos pacotes computacionais comerciais têm incluídos códigos que permitem a análise térmica da estrutura por meio do Método dos Elementos Finitos, como o ANSYS, ABAQUS, ADINA e DIANA.

2.2.7.1 Elementos Finitos

As transferências de calor podem ser estudadas materiais no estado sólido, líquido ou gasoso. Simulam-se as fontes de calor com o objetivo de determinar os campos de tensão, deformação e deslocamentos devidos a temperatura. A malha utilizada para a análise térmica deve ser a mesma utilizada para a análise estrutural. Essa condição deve ser atendida pois a temperatura nodal obtida como resultado da análise térmica é aplicada à análise estrutural realizada na sequência. Este procedimento é conhecido como acoplamento sequencial, onde a temperatura influencia na tensão, mas a tensão não influencia na temperatura. Dessa forma, as análises podem ser feitas em momentos distintos (COOK, 2001).

Em situação de incêndio, o calor se propaga em um sólido por condução ou entre sólidos por radiação e convecção.

Na análise numérica, é possível adotar tanto as propriedades mecânicas como as propriedades térmicas como dependentes da temperatura. O fato de as propriedades variarem em função da temperatura torna a análise térmica uma análise

não linear, mas não altera a análise estrutural. Caso a radiação seja uma condição de contorno, o problema é não linear como um todo.

O problema considerado é a obtenção do campo térmico em um sólido quando são conhecidas as propriedades dos materiais e as condições de contorno. O campo térmico pode ser permanente ou transiente, caso em que o campo é função do tempo.

Com relação a elaboração do modelo numérico, Cook (2001) afirma que ao se definir uma malha única a ser usada nas duas etapas da análise termomecânica, em geral, se dá mais atenção a análise estrutural, já que esta normalmente demanda um refinamento maior. Caso haja simetria de geometria, de materiais, de condições de contorno e de temperatura, pode-se modelar apenas parte da estrutura, uma vez que o calor não flui entre planos de simetria. Caso haja coeficientes de radiação ou convecção dependentes da temperatura, então as condições de contorno também são dependentes da temperatura. Caso seja um problema transiente, as condições de contorno podem depender da temperatura e do tempo. Pode-se validar o modelo computacional comparando-se os resultados da análise com o de investigações experimentais ou com um modelo previamente validado.

2.2.8 Resultados obtidos da literatura

Chen e Young (2007) realizaram análises experimentais em amostras de aço, variando a classe e a espessura do aço. O ensaio foi executado aplicando-se uma tensão de 2 MPa em corpos de prova submetidos ao calor em análise térmica de regime estacionário e de regime transiente. Os corpos de prova foram padronizados com 6,0 mm de largura e comprimento de 25,0 mm com espessuras variáveis de acordo com a classe de aço utilizado. O objetivo do trabalho era propor uma curva de tensão x deformação capaz de descrever o comportamento do aço formado a frio sujeito a alta temperatura. Os resultados obtidos são apresentados para diversas classes de aço na Figura 2.22 e Figura 2.23.

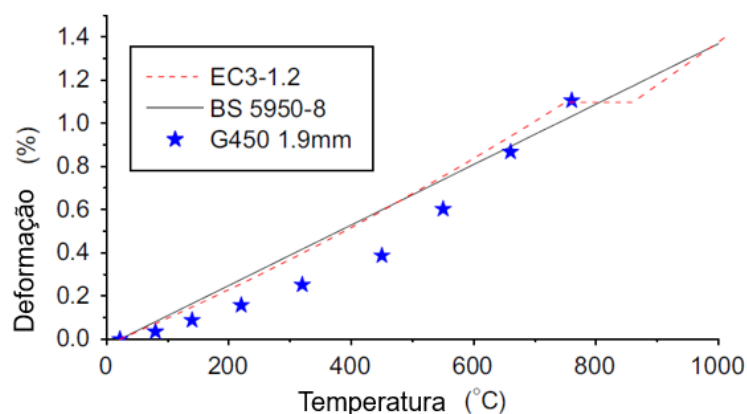


Figura 2.22 – Deformação devido a variação térmica
Fonte: Chen e Young (2007)

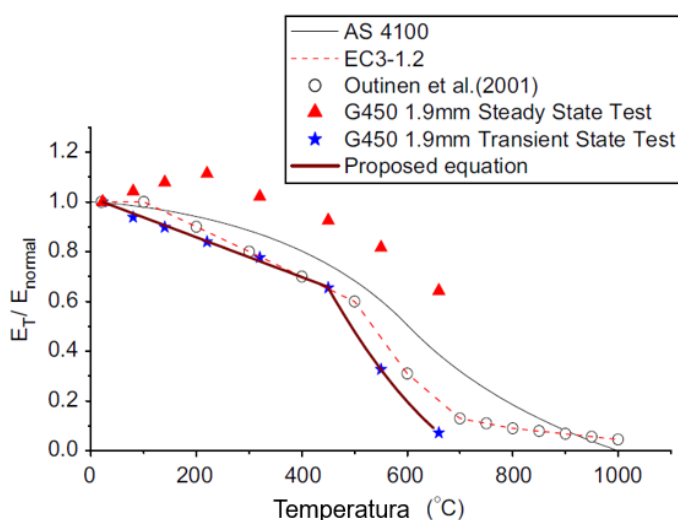


Figura 2.23 – Variação do módulo de elasticidade com a temperatura
Fonte: Chen e Young (2007)

Kankanamge e Mahendran (2011) ensaiou perfis de aço formado a frio com seção transversal U enrijecido com tensão de escoamento de 250 MPa e 450 MPa com base na norma AS 1391 (1991). O ensaio foi conduzido em regime estacionário com temperatura variando de 20°C a 700°C e não encontrou influência da esbelteza nas características térmicas do perfil.

Wei e Jihong (2012) obtiveram as propriedades mecânicas do perfil formado a frio, também de seção transversal U enrijecido com tensão de escoamento de 550 MPa usando análise térmica estacionária e transiente. Os resultados obtidos neste estudo não indicaram equivalência entre os dois métodos. Além disso, a análise térmica estacionária superestimou a resistência do perfil ao incêndio consideravelmente.

Chen *et al.*(2013) ensaiou paredes em LSF revestidas com manta isolante de silicato de alumínio, protegida por gesso acartonado resistente ao fogo na face da parede exposta ao incêndio em vez de usá-la na cavidade. As outras placas componentes do sistema foram variadas em um total de seis corpos de prova diferentes para fins de comparação. O esquema de montagem dos corpos de prova pode ser visto na Figura 2.24. O estudo constatou que os corpos de prova com a manta isolante externa tiveram um melhor desempenho quando expostas ao incêndio que as outras composições. O tempo resistido pela parede de foi de 150 minutos quando a razão de carga foi menor que 0,65.

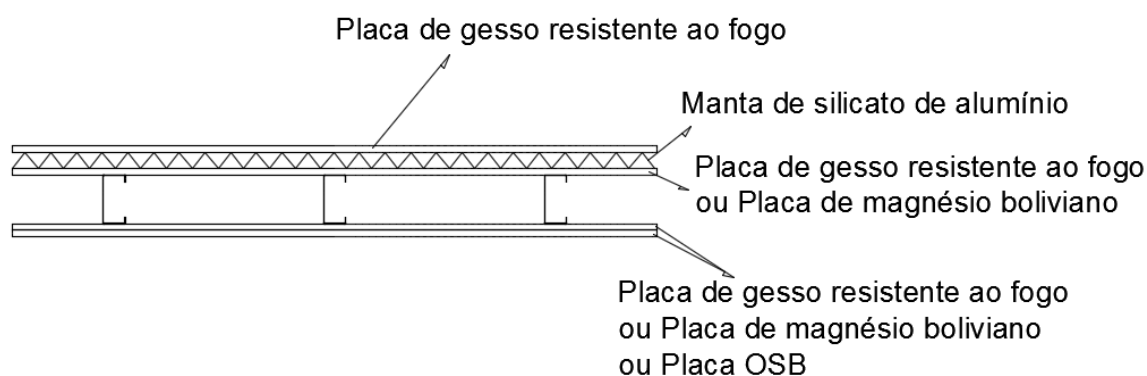


Figura 2.24 - Esquema de montagem dos corpos de prova
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2013).

Kontogeorgos I *et al.* (2016) comparou o desempenho de diferentes materiais isolantes de preenchimento com a cavidade vazia. Observou para uma cavidade de mesma espessura um ganho de 2% de tempo resistido do painel quando utilizado poliestireno e de 19% quando utilizado lã de vidro.

Feng, Wang e Davis (2003a) ensaiaram em laboratório diversas composições de paredes em LSF. Os corpos de prova consistiam em um perfil de 30 cm de comprimento, com placas de gesso acartonado de 30 cm por 30 cm parafusadas nos perfis e contando ou não com material isolante entre as placas. Com base nos resultados experimentais, foi elaborado e calibrado um modelo computacional em elementos finitos com o qual foram feitos ainda testes em outras conformações de parede.

Na Tabela 2.10 **Error! Reference source not found.** são apresentados resultados obtidos pela literatura em análises experimentais de paredes em LSF com fechamento em placas de gesso. Além da variação dos corpos de prova em dimensão

e material varia também a razão de carga aplicada, que é a razão entre a carga limite do aço na temperatura considerada crítica e a carga limite do aço em 20°C.

Tabela 2.10 – Comparação de resultados da literatura

Espessura da placa de gesso (mm)	Dimensões do corpo de prova (mm)	Perfil metálico - montante (mm)	fy aço (MPa)	Razão de carga	Tempo resistido (min)	Fonte
16	2400x2400	90x40x15x1,15	500	0,2	111	Kolarkar (2010)
12,5	2700x1820	89x40x12x0,5	295	Não disponível	59	Sakumoto <i>et al.</i> (2003)
12,7	3048x3658	92x41x13x0,9	230	0,4	83	Kodur e Sultan (2006)
12,7*	3048x3658	92x41x13x0,9	230	0,4	76	Kodur e Sultan (2006)
12,5	3000x3380	89x50x13x0,9	345	0,65	70	Chen <i>et al.</i> (2012)

* Reforço em perfil cartola do lado exposto ao fogo.

Com base na tabela percebe-se que o tempo resistido está atrelado a razão de carga e as propriedades do aço. O painel de Kolarkar (2010) obteve o maior tempo resistido entre os apresentados, mas foi solicitado por uma razão de carga menor e seu perfil de aço era o com maior resistência ao escoamento. Sakumoto *et al.* (2003) apresentou o painel de menor resistência mesmo não sendo o com aço de menor resistência, mas o perfil utilizado foi significativamente mais esbelto que os demais.

Alves e Batista (2007) utilizaram os ensaios de Feng, Wang e Davis (2003a) como base para validação de um modelo computacional de uma parede LSF com e sem material isolante. Foram usados os softwares de elementos finitos ABAQUS e SAFIR. Os autores concluíram que houve maior acurácia na aproximação do modelo para o painel sem material isolante, atestando que no caso da presença do material isolante, o mesmo pode se conformar dentro da cavidade durante o experimento, gerando vazios não previstos pelo modelo. Observou também que o painel, composto de placas simples de gesso acartonado e perfil Ue 104 x 54 x 15 x 1,2 mm, possui boa capacidade de minimizar a transferência de calor do compartimento em incêndio para o adjacente, constatando que o ponto de maior temperatura da face do painel não exposta ao incêndio, após duas horas era de aproximadamente 100°C, frente aos 875°C da face oposta.

Thanasoulas *et al.*(2016) utilizando o MEF observou que o método de cálculo de resistência do perfil metálico proposto pelo Eurocode 3 fornece resultados em média 20% abaixo do calculado pelo modelo computacional. Afirma ainda que isto se dá pela utilização da maior temperatura do perfil como temperatura homogênea em todo o perfil, sendo que o caso estudado apresenta gradiente de temperatura no perfil devido a aplicação assimétrica do incêndio.

Gunalan, Kolarkar e Mahendran (2013), baseado em um modelo numérico validado em ensaios de laboratório, comparou o comportamento termoestructural de painéis com diferentes composições. Variando a quantidade de placas, o tipo de material isolante e a posição do mesmo. Testou inclusive a colocação da manta, entre duas placas de gesso acartonado, ao invés de posicioná-la na cavidade, com objetivo de proteger o perfil metálico. Observou-se que a utilização do isolamento externamente à cavidade aumentou a capacidade do painel de resistir ao incêndio. Também observou-se que a forma de ruptura da estrutura não se altera nos diferentes tipos de painel. As placas de fechamento e o isolamento alteram apenas o tempo resistido. Os painéis estudados apresentaram falha quando o perfil atingiu temperaturas entre 500°C e 600°C, dependendo da razão de carga aplicada.

Ariyanayagam e Mahendran (2014) compararam painéis de LSF construídos em oito configurações diferentes e os submetem a testes de incêndio em laboratório seguindo curvas de incêndio padrão e curvas de incêndio natural com objetivo de estudar melhor o comportamento de um painel em um incêndio real. Os autores apontam para a importância das placas na estabilidade da estrutura. Apesar de não contribuírem diretamente para resistência ao carregamento, a placa atua como proteção térmica dos perfis de aço. Nos casos em que foi observado o desprendimento da placa, o tempo resistido pelo painel reduziu drasticamente, uma vez que a temperatura do perfil se eleva mais rapidamente.

A consideração das placas como restrição lateral da mesa dos perfis metálicos para fins da análise estrutural é alvo de algumas discordâncias. Gunalan e Mahendran (2013) consideraram, com base na investigação experimental que realizaram, que as placas laterais podem fornecer a restrição até o momento em que ocorre a ruína do painel. Gerlich, Collier e Buchanan (1996) afirmam que quando o perfil alcança temperaturas entre 300°C e 400°C a restrição lateral deixa de existir devido a degradação da placa, no caso do gesso acartonado. Kaitila (2002) observou que a restrição deixava de atuar quando a temperatura das placas de gesso acartonado ultrapassava 550°C devido à calcinação. Feng, Wang e Davis (2003a) observaram ganhos significativos de capacidade de carga em painéis com a consideração da restrição pelas placas, apesar de ter observado nos testes em forno que ocorria um desprendimento precoce das placas, liberando a restrição do perfil.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas e considerações utilizadas na elaboração, validação e aplicação do modelo numérico ao caso estudado. Busca-se avaliar diferentes materiais de revestimento e preenchimento usado no sistema LSF como sistema de proteção térmica dos perfis de aço formados a frio em situação de incêndio.

3.1 OBJETO DO ESTUDO

O objeto de estudo são duas casas modelo, construídas no campo experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, sede Ecoville. As casas foram executadas pela empresa Modulare Engenharia em acordo de cooperação técnica com a UTFPR para análise de desempenho do sistema, sendo uma casa térrea, denominada “casa 1” e a segunda casa de dois pavimentos denominada “casa 2”. Pode-se ver as casas na Figura 3.1 e Figura 3.2.



Figura 3.1 – Fachada da Casa 1 (esquerda) e da Casa 2 (direita)
Fonte: Autoria própria



Figura 3.2 – Fundos da Casa 1 (direita) e da Casa 2 (esquerda)
Fonte: Autoria própria

A estrutura das edificações é formada pelo sistema construtivo em *steel framing* e *light steel framing*. As placas de vedação utilizadas foram placas de cimento-madeira, placas cimentícias, OSB ou gesso acartonado, buscando melhor relação custo-benefício para cada situação.

Para a sustentação dos painéis de fechamento foram utilizados dois tipos de perfis metálicos, perfil U 92x38x0,80 para as canaletas e perfil Ue 90x40x12x0,80 para os montantes, ambos representados na Figura 3.3. O aço dos perfis, segundo o fabricante, segue as especificações da ABNT NBR 15217:2009 “Perfis de aço para sistemas construtivos em chapas de gesso para “drywall” - Requisitos e métodos de ensaio”, que exige uma tensão de escoamento não menor que 230 MPa.

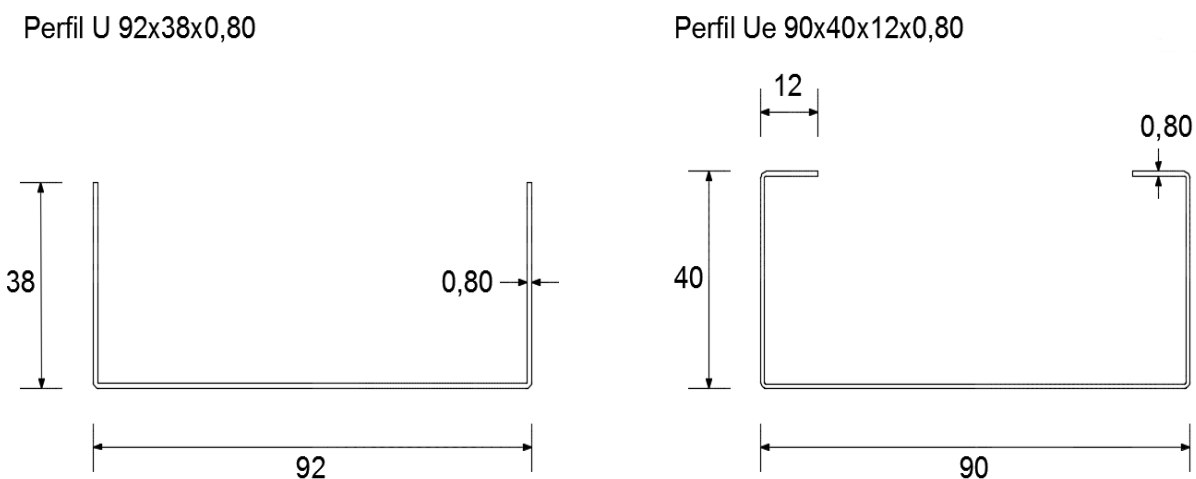


Figura 3.3 – Perfis U 92x38x0,80 e Ue 90x40x12x0,80, dimensões em mm
Fonte: Adaptado de Barbieri (2014)

Lã de pet e lã de vidro foram utilizados como isolantes térmicos, preenchendo a cavidade entre placas dos painéis estudados.

Os painéis foram montados com placas de 300 x 300 cm, com montantes metálicos a cada 60 cm e manta isolante conforme apresentado na Figura 3.2.

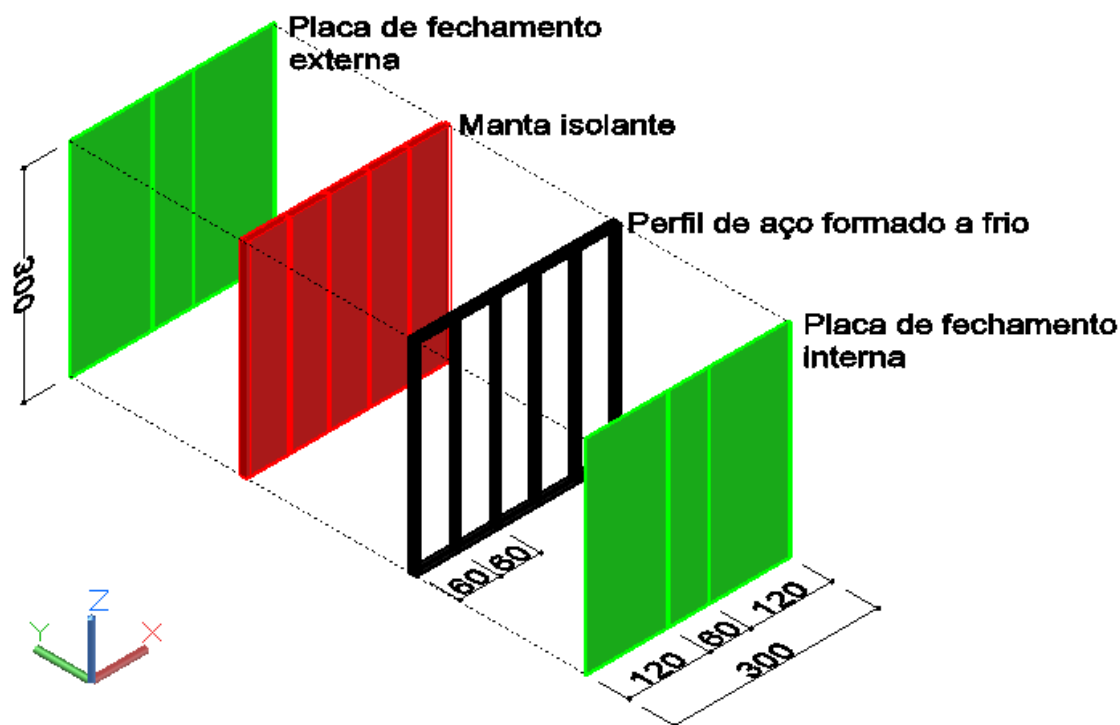


Figura 3.4 – Esquema genérico de painel utilizado nas Casas 1 e 2
Fonte: Autoria própria

Foram utilizados quatro painéis diferentes, constituídos variando-se o tipo e quantidade de placas e o material isolante. Os painéis foram utilizados em locais distintos das casas. Na Tabela 3.1 são apresentadas as diferentes configurações dos painéis.

Tabela 3.1 – Descrição dos diferentes painéis utilizados nas edificações

Edificação	Painel	Aplicação	Placa	Material Isolante
Casa 1	P1	Paredes internas	Gesso acartonado 12,5 mm	Lã de pet
	P2	Paredes externas	OSB 11,1 mm Placa cimentícia com perlita 10,0 mm	Lã de pet
Casa 2	P3	Paredes internas	Gesso acartonado 12,5 mm	Lã de vidro
	P4	Paredes externas	Cimento-madeira 16,0 mm	Lã de vidro

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

Para a análise, é importante que, nos casos em que as placas não são dispostas simetricamente, fique claro em qual das faces está incidindo o incêndio.

As seções transversais dos painéis apresentados na Tabela 3.1 são representados a seguir na Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8.

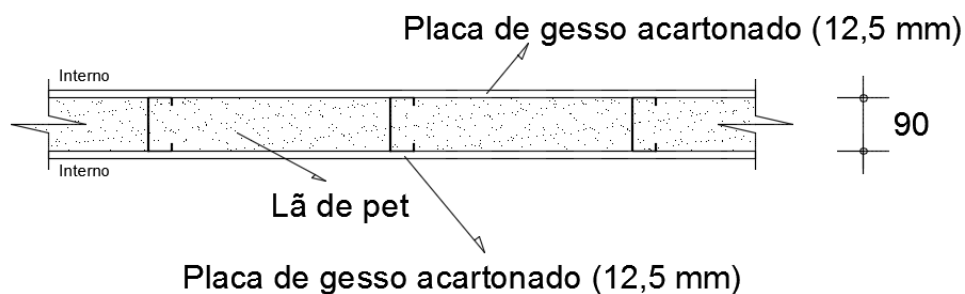


Figura 3.5 – Painel P1
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

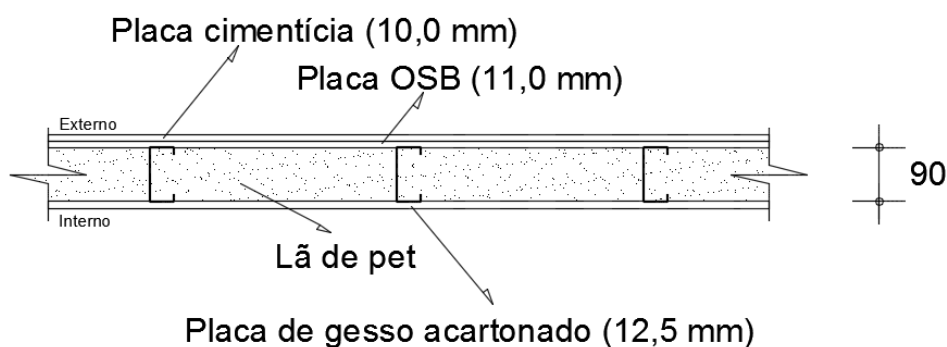


Figura 3.6 – Painel P2
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

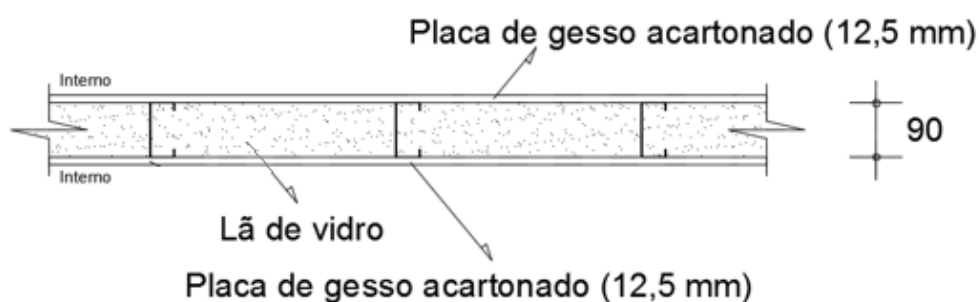


Figura 3.7 – Painel P3
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

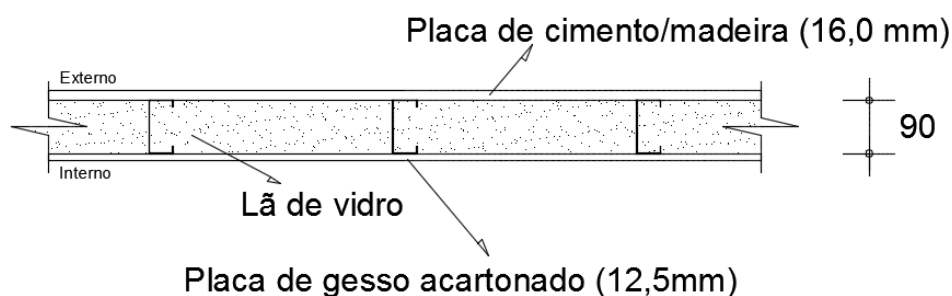


Figura 3.8 – Painel P4
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

No item a seguir são apresentadas as propriedades térmicas dos materiais componentes dos painéis que serão posteriormente utilizadas na elaboração do modelo.

3.2 PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

As propriedades térmicas do aço adotadas no presente trabalho são as especificadas ABNT NBR 14323:2013 apresentadas no item 2.2.2.

Para os demais materiais, utilizou-se quando disponíveis, informações fornecidas pelo fabricante. Nos casos em que o fabricante não disponibiliza os valores, utilizou-se os valores sugeridos pela ABNT NBR 15220:2005.

A placa de gesso acartonado possui 12,5 mm de espessura e segundo o fabricante a massa específica (ρ) é de 800 kg/m³. A condutividade térmica (λ) de 0,35 W/m.K e o calor específico (c) de 840 J/kg.K adotados são os sugeridos pela ABNT NBR 15220:2005.

Segundo o fabricante, a placa de liga cimentícia de 10 mm possui em sua composição perlita e fibra de vidro. Ainda de acordo com o fabricante, $\rho = 1.117$ kg/m³ e segundo a norma $\lambda = 0,65$ W/m.K e $c = 840$ J/kg.K.

A placa OSB (oriented stand board) de 11 mm possui $\rho = 645$ kg/m³, segundo o fabricante e foram adotados com base na norma $\lambda = 0,14$ W/m.K e $c = 2300$ J/kg.K.

A placa de madeira aglomerada com cimento é formada por 63% de madeira, 25% de cimento, 10% de água e 2% de aditivos. Segundo a fabricante, $\rho = 1.150$ kg/m³ e $\lambda = 0,2435$ W/m.K e segundo a norma $c = 2300$ J/kg.K.

Para a lã de vidro utilizou-se $\rho = 12,5$ kg/m³, conforme informação do fabricante e $\lambda = 0,042$ W/m.K e $c = 700$ J/kg.K conforme a norma.

Por fim, para a lã de PET, utilizou-se $\rho = 25$ kg/m³ e $\lambda = 0,065$ W/m.K segundo o fabricante. O calor específico adotado, foi o do Polietileno tereftalato $c = 1046$ J/kg.K, que é o polímero utilizado na fabricação da manta. Conforme apresentado no item 2.2.3.6, a lã de PET tem ponto de fusão baixo para a amplitude de temperatura implícita neste trabalho. Para representar a fusão da manta e consequente preenchimento da câmara por ar, as características deste material foram consideradas variáveis com o tempo. Até atingir 220°C o material possui as características da lã de PET de forma constante. Entre as temperaturas de 220°C e

260°C a densidade, o calor específico e a capacidade térmica variam linearmente até atingir os valores do ar. A partir de 260°C as propriedades são consideradas linearmente como as do ar, ou seja, $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,817 \text{ W/m.K}$ e $c = 1000 \text{ J/kg.K}$.

As propriedades térmicas dos materiais aplicados ao presente trabalho estão compiladas na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Propriedades térmicas dos materiais

Material	Massa Específica (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)
Aço	7850	$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a$, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$ $\lambda_a = 27,3$, para $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$	$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$ $c_a = 666 + \frac{13.002}{738 - \theta_a}$, para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$ $c_a = 545 + \frac{17.820}{\theta_a - 731}$, para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$ $c_a = 650$, para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$
Gesso acartonado	800	0,35	840
Liga cimentícia	1.117	0,65	840
OSB	645	0,14	2300
Madeira / Cimento	1.150	0,2435	2300
Lã de vidro	12,5	0,042	700
Lã de PET	25	0,065	1046
Cavidade vazia	1,2	0,817	1000

Fonte: Autoria própria

Tendo definido o objeto de estudo e as propriedades dos materiais a serem utilizados parte-se para elaboração do modelo propriamente dito.

3.3 MODELO NUMÉRICO

Para elaboração do modelo numérico optou-se pela utilização do software ANSYS v.14, por aceitar modelagem em três dimensões, ser capaz de realizar análise térmica transiente e permitir acoplamento para análise termoestrutural.

Primeiramente procedeu-se a elaboração do modelo geométrico. Devido a presença de diversos elementos que posteriormente precisariam ter os nós de suas

malhas coincidindo foi necessário preparar o modelo geométrico para garantir que essa condição viesse a se cumprir.

Desta forma, no modelo geométrico seccionou-se os elementos em pontos chave de forma a facilitar o refino da malha. O refino é feito automaticamente pelo software, mas pode receber comandos restringindo a liberdade da automatização. Pode-se, por exemplo, determinar o número de divisões em uma face ou aresta, ou determinar o tamanho dessas subdivisões. Estas subdivisões não têm influência nos resultados finais.

Partindo-se para a definição da malha de elemento finitos realizou-se uma análise de convergência para obter-se a malha com menor refino capaz de obter resultados satisfatórios utilizando-se um mínimo de processamento do computador. Variou-se não só a densidade da malha no sistema como um todo, mas também em regiões específicas, constatando-se que a maior necessidade de refino se dá no sentido do fluxo térmico e na região onde o perfil metálico está presente, como apresentado na Figura 3.9.

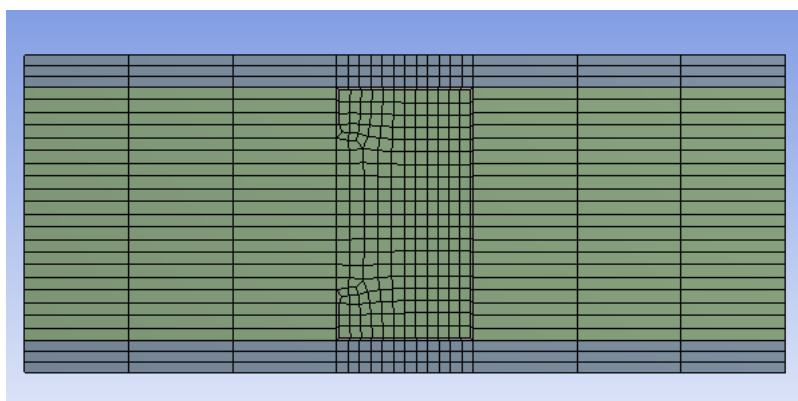


Figura 3.9 - Malha de elementos finitos usada como referência para os modelos.
Fonte: Autoria própria.

A malha final, apresentada na Figura 3.9 utilizou quase 29.000 elementos com quase 49.000 nós e a análise levou aproximadamente doze horas em um computador com processador intel i3 de quinta geração e 4 gigabytes de memória RAM.

Comparou-se também o desempenho do elemento finito sólido tridimensional de oito nós (SOLID70) com o do elemento finito sólido tridimensional de vinte nós (SOLID90), constatando-se que o SOLID70 foi suficiente para a modelagem nas condições definidas. Como o SOLID90 elevou o tempo de cálculo

sem trazer melhoras significativas para a análise o SOLID70 foi adotado. Os dois elementos são apresentados na Figura 3.10.

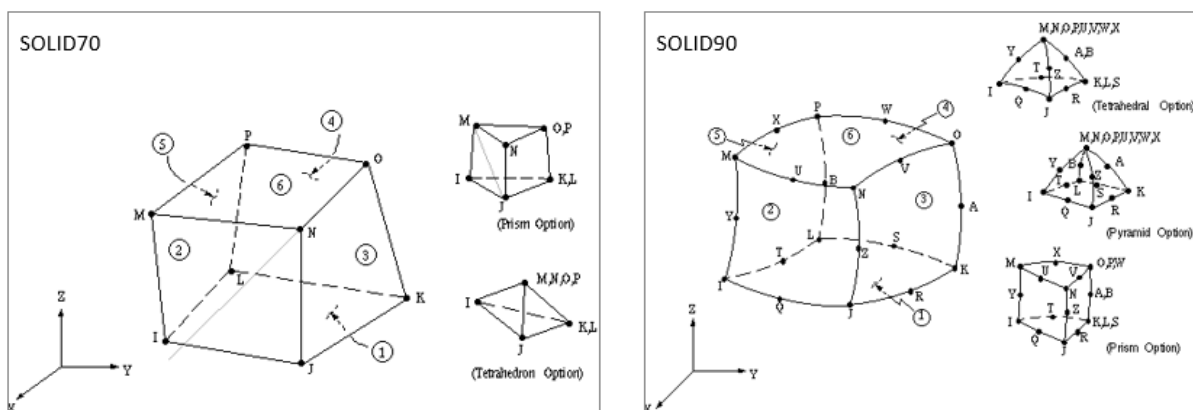


Figura 3.10 – Elementos tridimensionais SOLID70 E SOLID90
Fonte: Ansys v.14

Os mecanismos de transferência de calor por radiação e convecção foram definidos nas faces da placa exposta e não exposta ao incêndio. Conforme recomendação do Eurocode 1 part 1-2 e da ABNT NBR 14323:2013, o coeficiente de transferência de calor por convecção usado foi de 25 W/m^2 para o lado exposto. Para o lado não exposto foi utilizado o valor de 10 W/m^2 , que é o recomendado pelo Eurocode 1 part 1-2 e utilizado por Feng, Wang e Davis (2003a), autor do trabalho utilizado como referência para validação do modelo numérico.

O procedimento seguido pelo ANSYS v.14 em uma análise transiente segue de forma geral o mesmo procedimento da análise estática. Os métodos diferem, pois, a carga térmica aplicada em uma análise transiente é função do tempo, bem como as propriedades dos materiais envolvidos. A curva temperatura versus tempo é dividida em passos de carga e para cada passo de carga é determinado um valor de carga e de tempo.

A temperatura ambiente foi considerada 20°C . A carga térmica devida ao incêndio foi aplicada na face arbitrada como exposta ao incêndio em vinte passos de carga. Para a face não exposta considerou-se temperatura ambiente durante toda a análise.

Antes considerar adequado este procedimento é necessário validá-lo. Para isso utilizou-se o resultado de análises experimentais ou de análises computacionais já consolidadas.

3.4 VALIDAÇÃO

Para validação do modelo, utilizou-se como base, o trabalho de Feng, Wang e Davis (2003a), que ensaiaram em laboratório modelos representativos de painéis LSF.

O modelo consistiu em placas de gesso acartonado de 30 x 30 cm, formando um painel com um perfil de aço também com 30 cm. Em seus ensaios ele variou o perfil metálico, a quantidade e distribuição das placas de gesso acartonado e a presença ou não de material isolante preenchendo a cavidade. Exemplos dos modelos ensaiados podem ser vistos na Figura 3.11 a seguir.

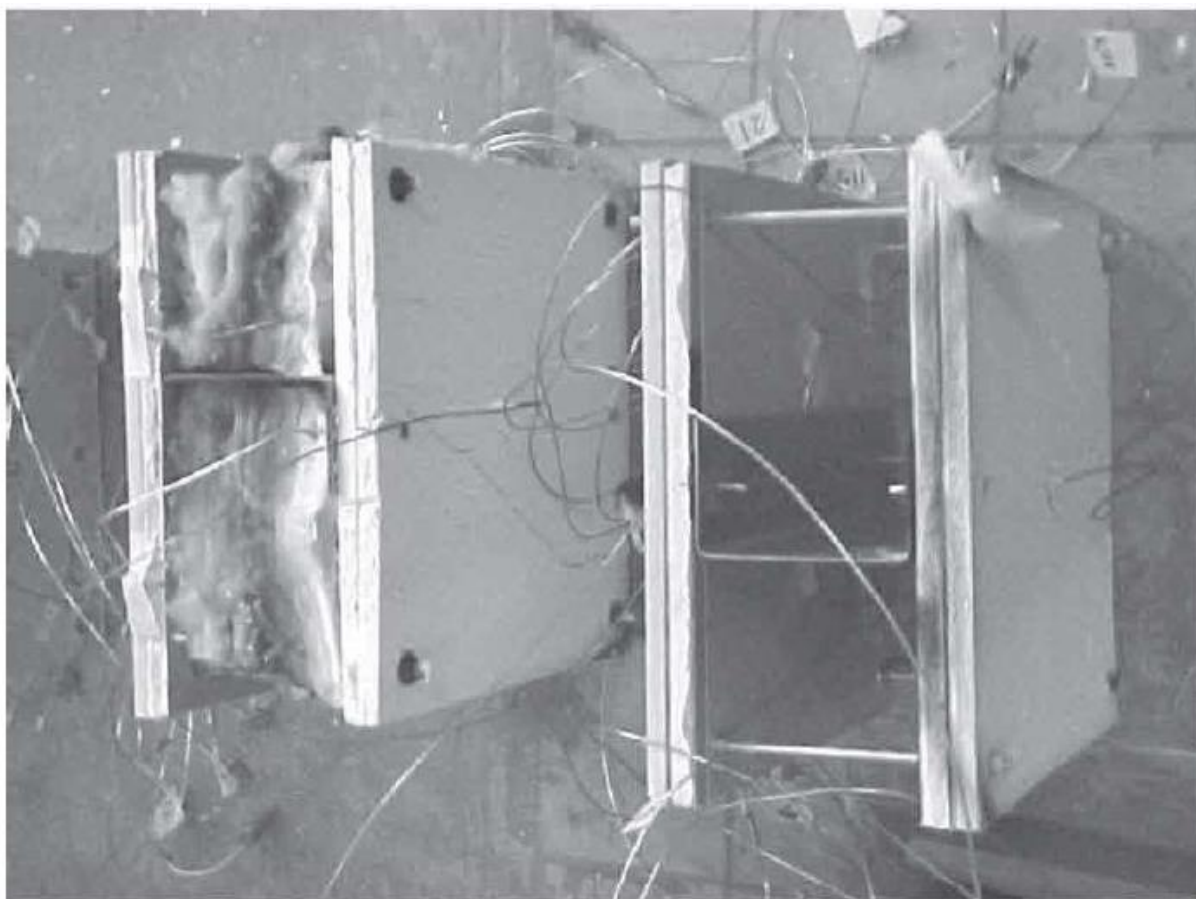


Figura 3.11 – Modelos com placa dupla de gesso acartonado, com e sem presença de manta
Fonte: Feng, Wang e Davis (2003a)

O modelo a ser validado foi elaborado para reproduzir da melhor forma possível as características do ensaio. Como o objetivo era também utilizar esse modelo como base para o modelo dos painéis a serem estudados neste trabalho, optou-se por validar um modelo elaborado em elementos sólidos, de forma a ser

possível aproveitá-lo para uma futura análise estrutural. Escolheu-se o painel constituído de placas simples de gesso acartonado, com perfil U enrijecido e manta isolante como base para a validação. O modelo geométrico baseado na referência pode ser visto na Figura 3.12 e Figura 3.13.

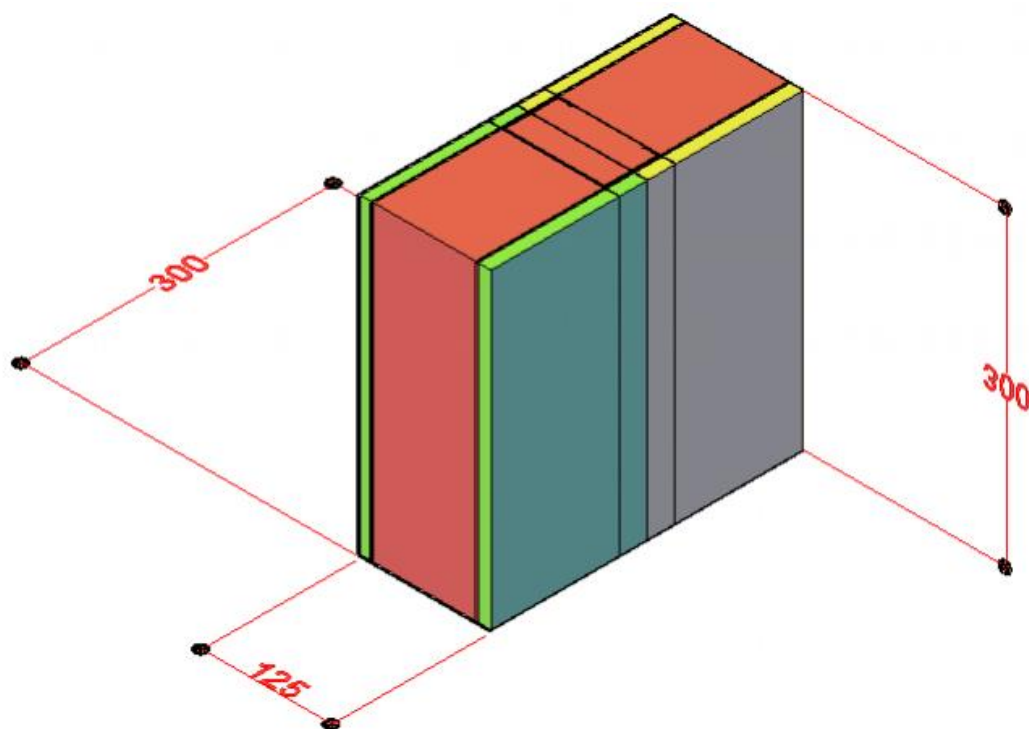


Figura 3.12 – Vista isométrica do modelo geométrico
Fonte: Autoria própria

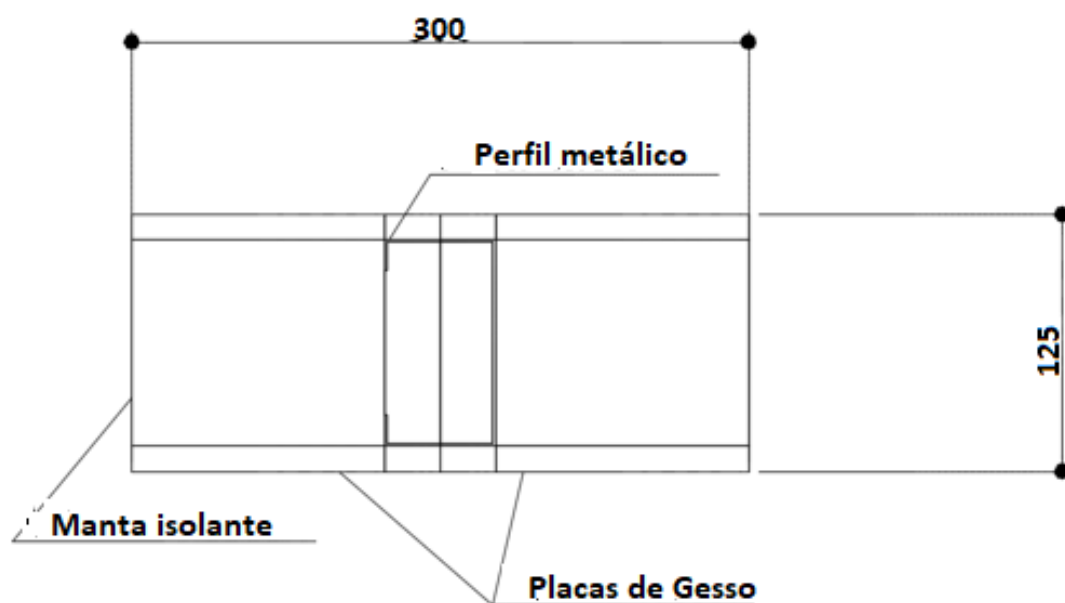


Figura 3.13 – Vista superior do modelo geométrico
Fonte: Autoria própria

No modelo geométrico – apresentado na Figura 3.13 – pode-se ver linhas cruzando pontos-chave do modelo. Como comentado anteriormente, essas linhas representam cortes introduzidos nos sólidos, de forma a facilitar o refino da malha.

A curva de incêndio escolhida foi a da ISO 834, que foi utilizada por Feng, Wang e Davis (2003a) para elaboração de seu modelo numérico. Esta curva é a mesma definida pela ABNT NBR 14432:2001. As propriedades térmicas dos materiais também foram extraídas do referido trabalho. Na Figura 3.14 e na Tabela 3.3 é apresenta-se a curva padrão citada.

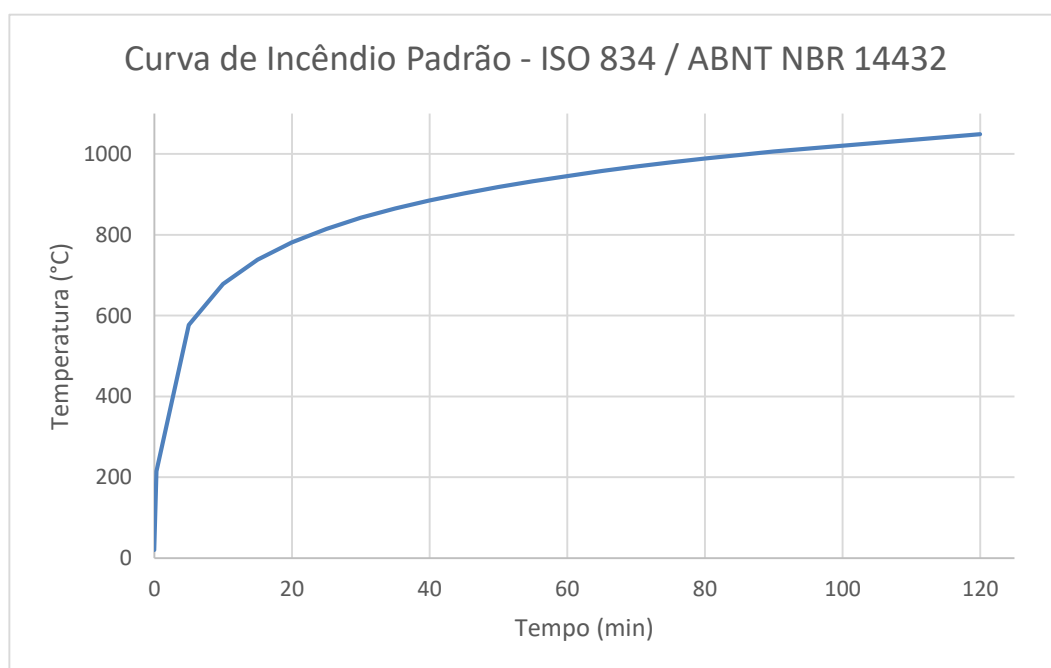


Figura 3.14 – Curva de incêndio padrão – ISO 834
Fonte: Adaptado de ISO 834 (2012)

Para lançamento no modelo, foi utilizada a forma discretizada conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Curva de incêndio padrão discretizada – ISO 834

Tempo (min)	Temperatura (°C)
0,0	20,0
5,0	576,4
10,0	678,4
15,0	738,6
20,0	781,4
25,0	814,6
30,0	841,8
35,0	864,8
40,0	884,7
45,0	902,3
50,0	918,1
55,0	932,3
60,0	945,3
65,0	957,3
70,0	968,4
75,0	978,7
80,0	988,4
85,0	997,4
90,0	1006,0
120,0	1049,0

Fonte: Adaptado de ISO 834 (2012)

As propriedades térmicas do aço são as estabelecidas pelo Eurocode 3 Part 1-2 e que serviram de base para as recomendações da ABNT NBR 14323:2003. As propriedades do gesso acartonado foram determinadas com base em ensaios de caracterização. A lã de vidro também segue as recomendações do Eurocode 3 Part 1-2. Na Tabela 3.4 são apresentadas as propriedades térmicas dos materiais citados.

Tabela 3.4 – Propriedades térmicas dos materiais – Modelo de validação

Material	Massa Específica (J/kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)
Aço	7850	$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a$, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$ $\lambda_a = 27,3$, para $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$	$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$ $c_a = 666 + \frac{13.002}{738 - \theta_a}$, para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$ $c_a = 545 + \frac{17.820}{\theta_a - 731}$, para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$ $c_a = 650$, para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$
Gesso acartonado	727,1	0,2 até 10°C	925,04 até 10°C
		0,218 até 150°C	941,50 até 95°C
		0,103 até 155°C	24.752,32 até 125°C
		0,3195 até 1200°C	953,14 até 155°C
Lã de vidro	25	0,036	840

Fonte: Adaptado de Feng, Wang e Davis (2003a)

O refino partiu de uma malha menos densa para uma mais densa até que não houvesse alterações significativas dos resultados. Como citado anteriormente, utilizou-se o SOLID70, disponível na biblioteca do software. A malha resultante pode ser observada na Figura 3.15 e na Figura 3.16.

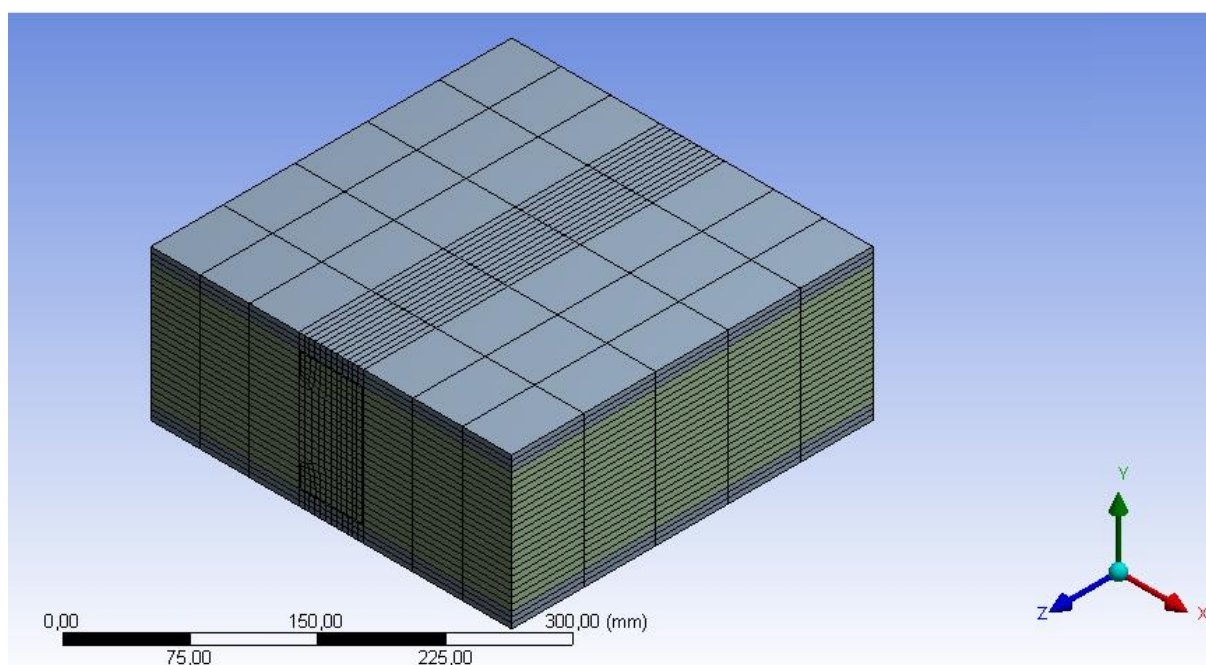


Figura 3.15 – Malha de elementos finitos – vista isométrica

Fonte: Autoria própria

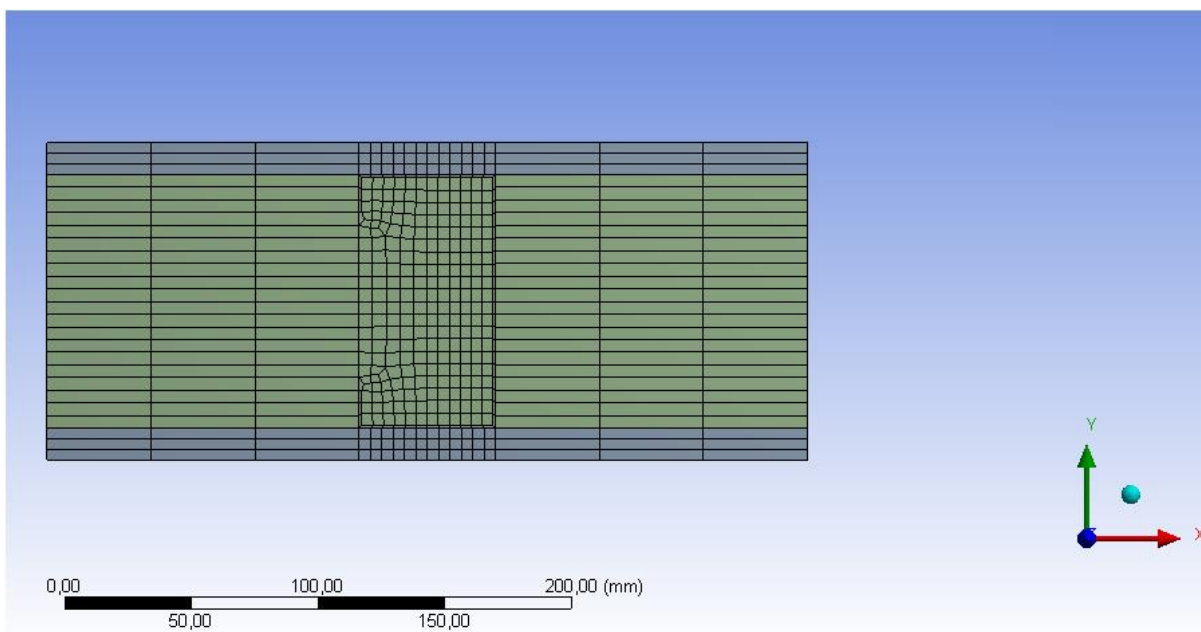


Figura 3.16 – Malha de elementos finitos – plano xy
Fonte: Autoria própria

Como condição de contorno foram aplicadas convecção e radiação nas faces da placa exposta e não exposta ao incêndio. Utilizou-se os valores de coeficiente de transferência de calor por convecção conforme abordado no item 3.3.

Para a radiação deve-se definir a emissividade resultante na face exposta e não exposta. Estes valores variam de acordo com a emissividade do forno ou ambiente e com a emissividade da placa. Os resultados obtidos com os valores sugeridos por Feng, Wang e Davis (2003a) geraram resultados discrepantes comparados aos ensaios de referência. Thomas (1996) fez uma análise de sensibilidade para obtenção dos valores de emissividade, obtendo como melhor combinação a utilização de 0,8 para a emissividade resultante na face exposta ao incêndio e 0,6 para a face não exposta. Estes valores levaram a resultados mais acurados e foram os adotados no modelo do presente trabalho.

Os resultados obtidos na análise foram comparados com os valores obtidos por Feng, Wang e Davis (2003a) em laboratório em tempos equivalentes do incêndio. Pode-se ver os pontos utilizados como referência para validação na Figura 3.17.

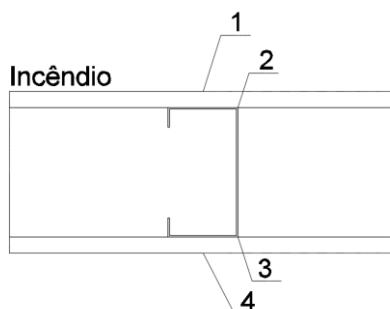


Figura 3.17 – Pontos de comparação do modelo numérico com o modelo experimental de referência.

Fonte: Autoria própria

Esses pontos, e os tempos em que foram obtidas suas temperaturas, foram escolhidos coincidindo com os apresentados na referência citada. A Tabela 3.5 apresenta os resultados da análise experimental comparados aos do modelo numérico e na Tabela 3.6 observa-se a razão entre os resultados. Na Figura 3.18 é possível observar a representação gráfica desses resultados.

Tabela 3.5 - Comparação entre o ensaio de referência e o modelo de validação

Tempo (min)	Temperatura dos gases (°C)	Feng, Wang e Davis (2003a)				Modelo numérico			
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	841,8	743,6	338,6	74,7	38	761,62	403,23	115,66	49,79
60	945,3	868,1	580,5	247,8	88	848,2	609,63	208,83	82,549
90	1006	927,6	620,9	297,6	-	900,42	673,06	256,76	93,754
120	1049	970,7	653,1	349,9	128	977,49	739,44	294,86	105,23

Fonte: Autoria própria

Tabela 3.6 - Razão entre o ensaio de referência e o modelo de validação

Tempo (min)	Temperatura dos gases(°C)	Razão (referência / modelo numérico)			
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	20	1	1	1	1
30	841,8	0,98	0,84	0,65	0,76
60	945,3	1,02	0,95	1,19	1,07
90	1006	1,03	0,92	1,16	-
120	1049	0,99	0,88	1,19	1,22

Fonte: Autoria própria

Observando-se os dados, nota-se que os resultados do modelo seguem o padrão esperado, com valores coerentes, apesar de não exatos. Essa diferença é esperada, uma vez que os parâmetros estabelecidos no modelo numérico não consideram as variabilidades intrínsecas aos modelos experimentais. Dentre tais parâmetros, pode ser citada a capacidade do forno em aquecer os gases do interior

homogeneamente, de forma a seguir a curva de incêndio padrão. Os coeficientes de transferência por convecção são considerados constantes e fixados em norma. A emissividade resultante pode não corresponder ao valor exato na prática, além de ser considerada constante no tempo. As propriedades térmicas do aço e da lã de vidro são normatizadas, apenas as propriedades do gesso acartonado foram extraídos de ensaios de caracterização. Embora se observe tais variabilidades residuais, a modelagem deste tipo de problema fornece resultados que podem ser considerados razoáveis.

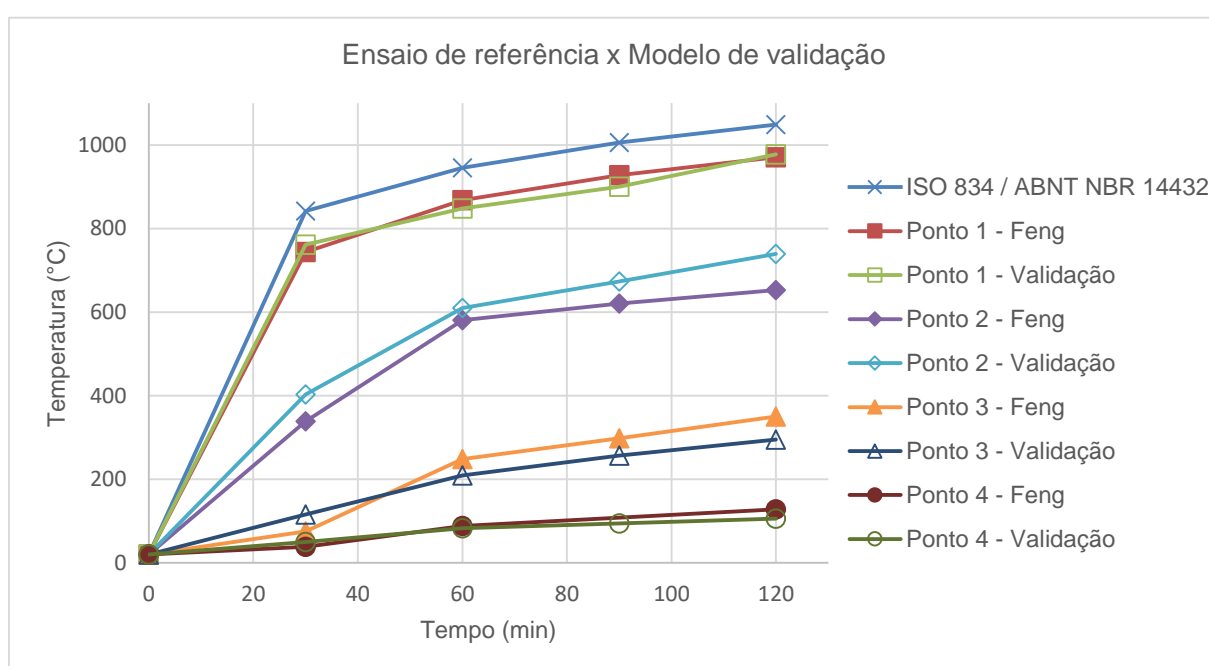


Figura 3.18 – Comparação entre o ensaio de referência e o modelo de validação
Fonte: Autoria própria

Percebe-se também, uma menor precisão no ponto 2 e no ponto 3. No ponto 2 a temperatura prevista é maior que a temperatura obtida experimentalmente e no ponto 3 a temperatura prevista é maior que a obtida neste mesmo experimento. Este fenômeno é observado em modelos de painel que possuem materiais isolantes preenchendo a cavidade (FENG;WANG;DAVIS, 2003a; ALVES;BATISTA, 2007). O modelo considera que o material isolante está perfeitamente conformado ao perfil metálico, o que, na prática, dificilmente acontece. Devido à montagem, ou aos deslocamentos do isolante durante o ensaio, formam-se pequenos volumes de vazios, onde o calor é transmitido por radiação e não condução. Como a radiação tem uma capacidade maior de transmitir calor que o material isolante tem de transmitir por

condução, a temperatura ao longo do perfil tende a se homogeneizar, reduzindo a temperatura no extremo mais próximo ao incêndio e elevando no sentido do extremo oposto.

Utilizando como base o modelo validado, elaborou-se os modelos numéricos para representar os painéis das casas 1 e 2. O processo é descrito no item seguinte.

3.5 MODELAGEM DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING*

Com objetivo de permitir que o presente trabalho seja futuramente acoplado a uma análise termoestrutural, optou-se por usar um modelo geométrico composto por um montante de 300 centímetros, conectado nas extremidades por canaletas com 60 centímetros de comprimento e placas de fechamento de 300 x 60 centímetros como representado na Figura 3.19. Desta forma, representa-se um montante com todos os componentes presentes em sua área de influência.

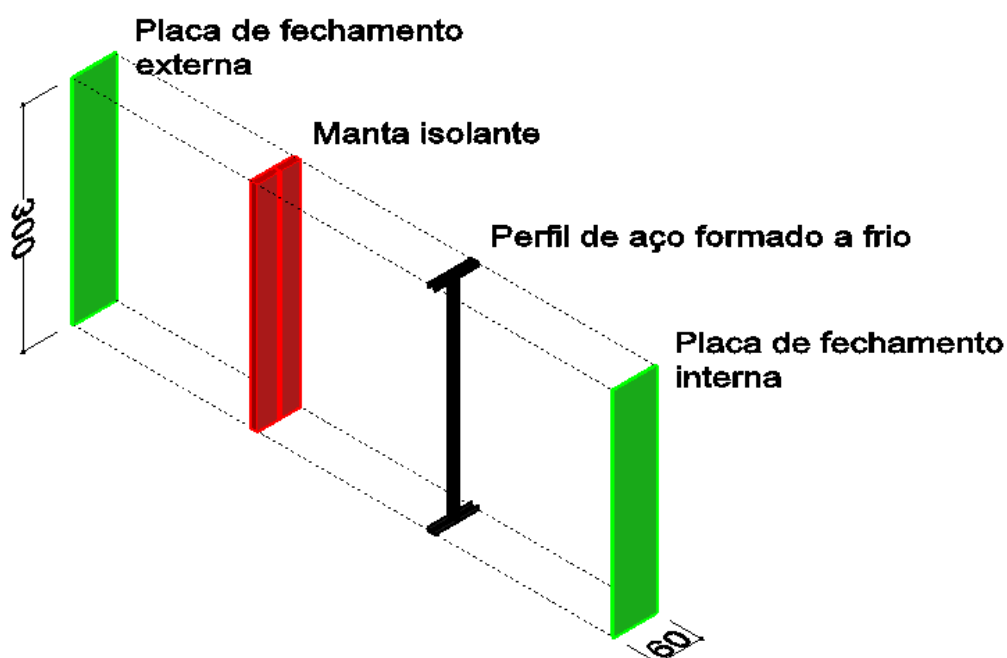


Figura 3.19 - Esquema genérico de painel utilizado no modelo, dimensões em cm.
Fonte: Autoria própria

O modelo geométrico pode ser visto na Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22 e Figura 3.23. A malha foi refinada de forma semelhante a do modelo de validação.

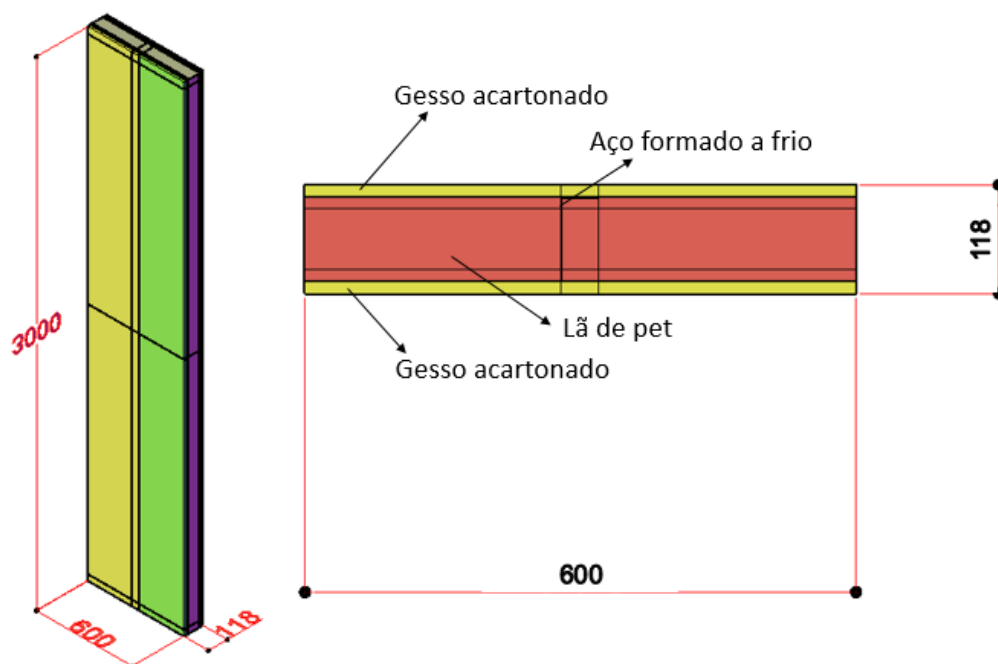


Figura 3.20 – Modelo geométrico do painel P1, dimensões em mm.
Fonte: Autoria própria

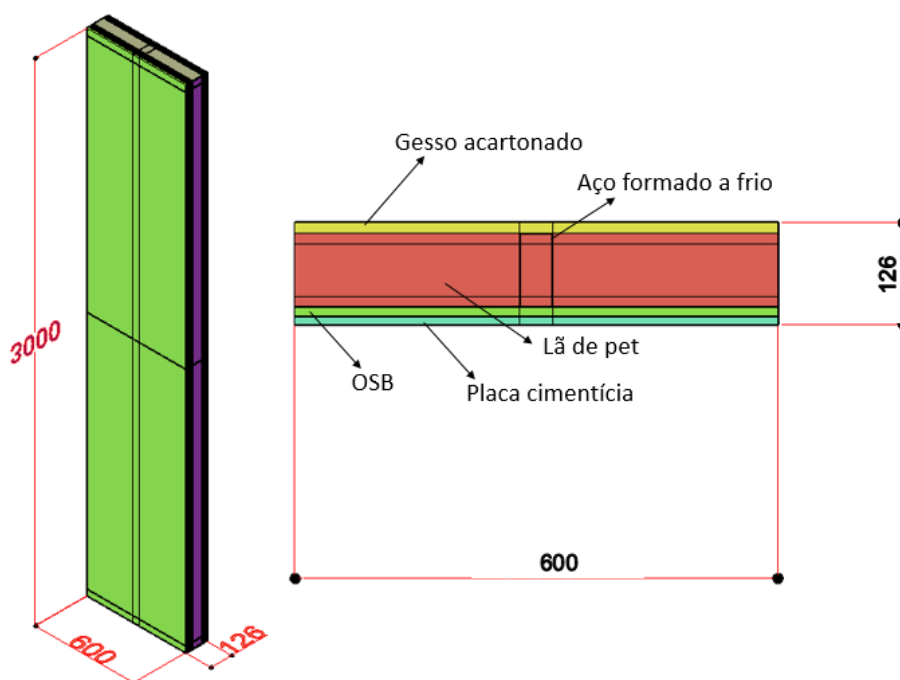


Figura 3.21 – Modelo geométrico do painel P2. dimensões em mm.
Fonte: Autoria própria

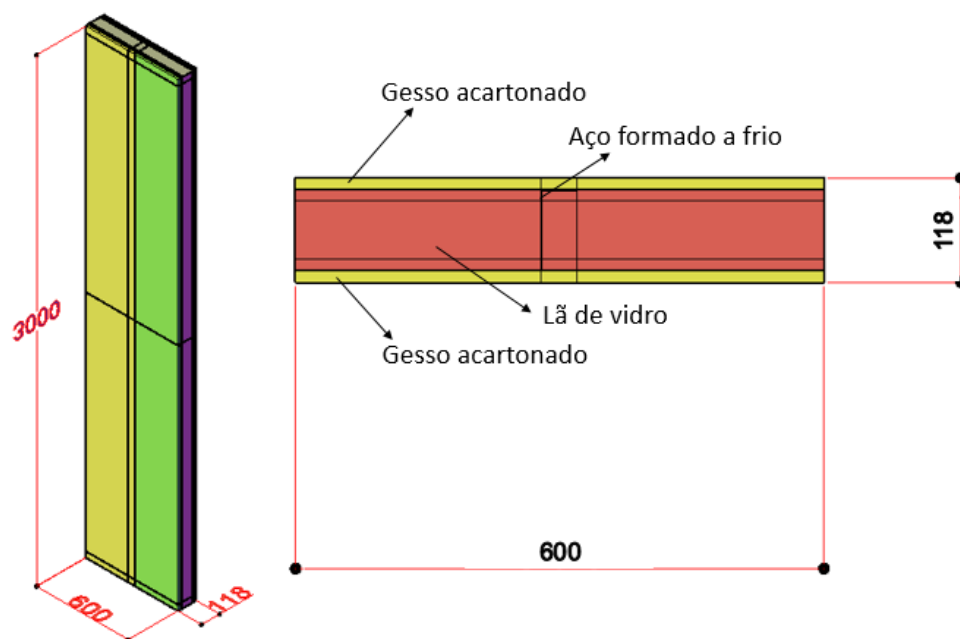


Figura 3.22 – Modelo geométrico do painel P3, dimensões em mm.
Fonte: Autoria própria

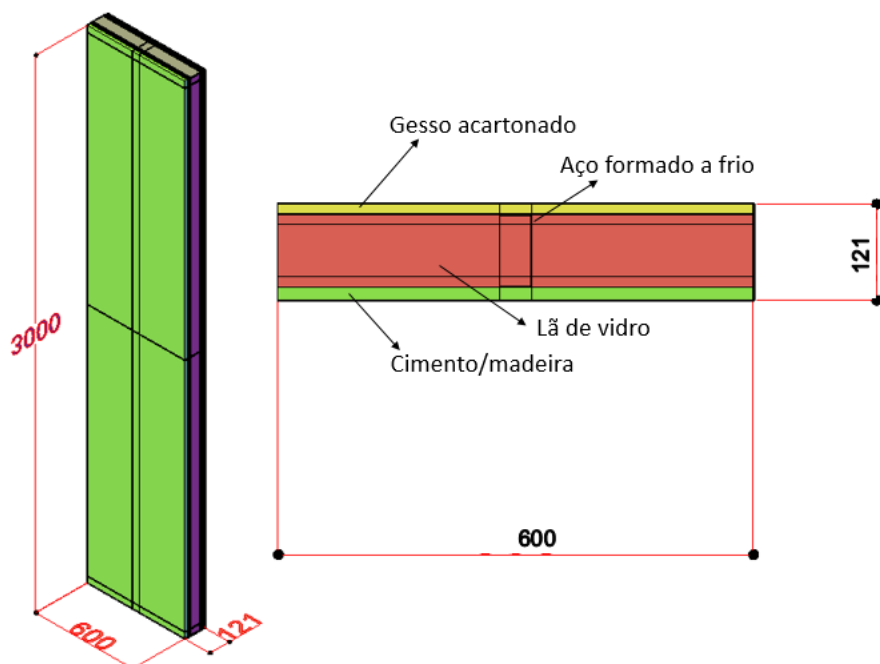


Figura 3.23 – Modelo geométrico do painel P4, dimensões em mm.
Fonte: Autoria própria

Também foram mantidas, para a presente análise, as constantes de transferência de calor utilizadas no modelo de validação, assim como a curva de incêndio padrão. As propriedades dos materiais seguiram o relacionado no item 3.2.

A malha gerada para cada um dos modelos pode ser vista na Figura 3.24, na Figura 3.25, na Figura 3.26 e na Figura 3.27. A graduação da malha seguiu o mesmo padrão utilizado no modelo de validação.

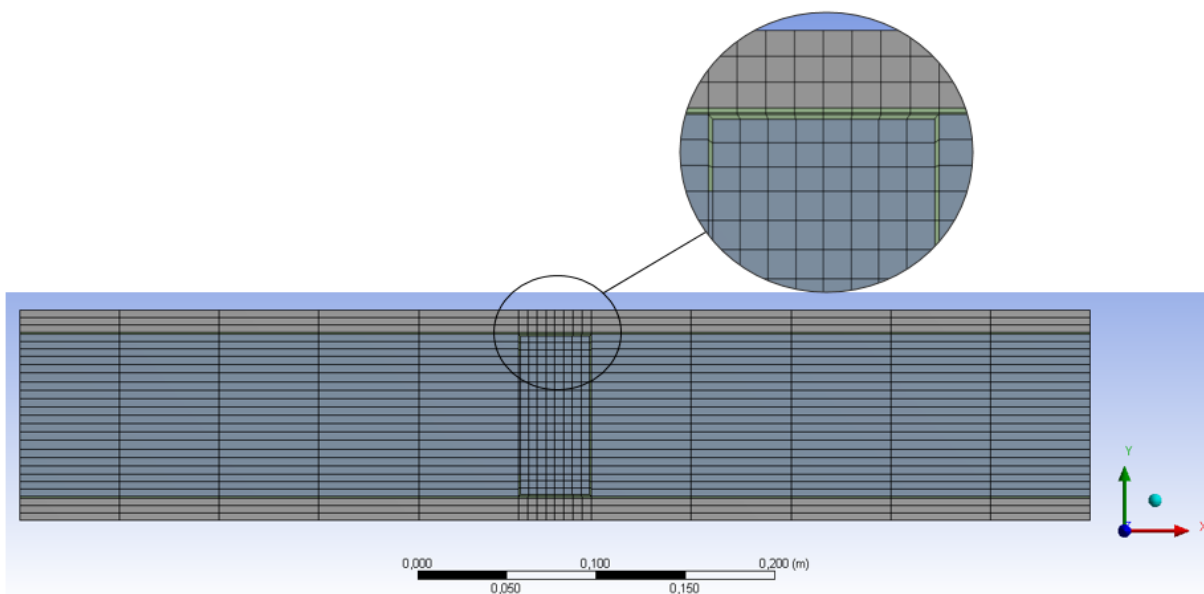


Figura 3.24 – Malha de elementos finitos do painel P1
Fonte: Autoria própria

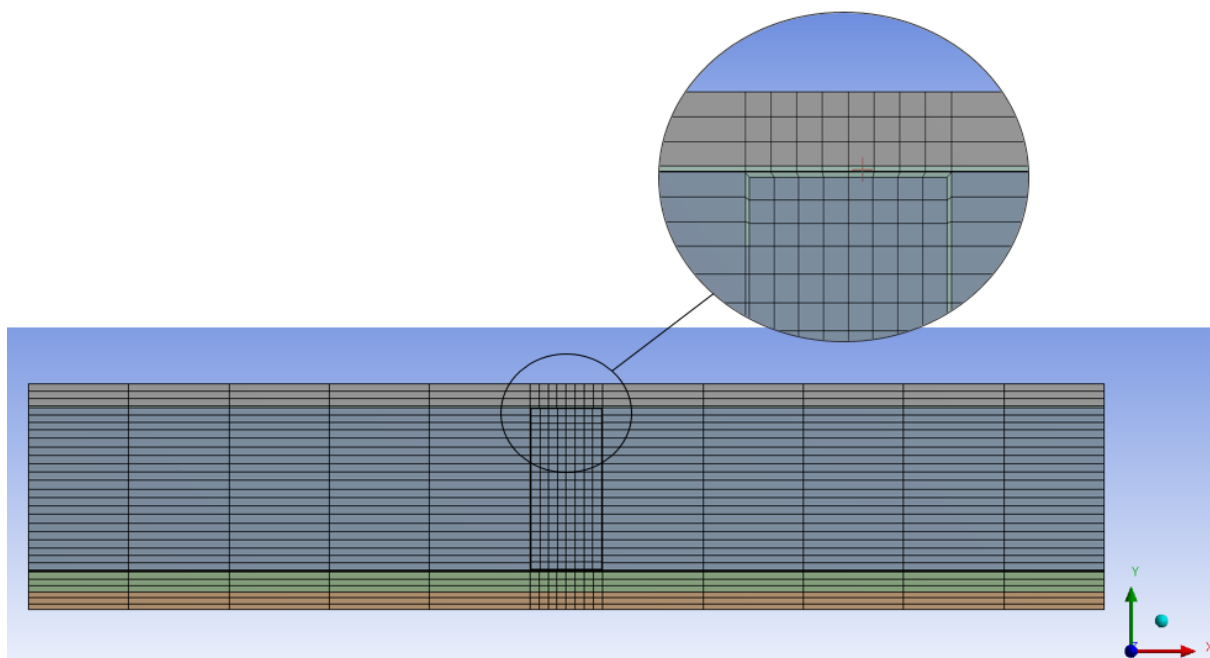


Figura 3.25 – Malha de elementos finitos do painel P2
Fonte: Autoria própria

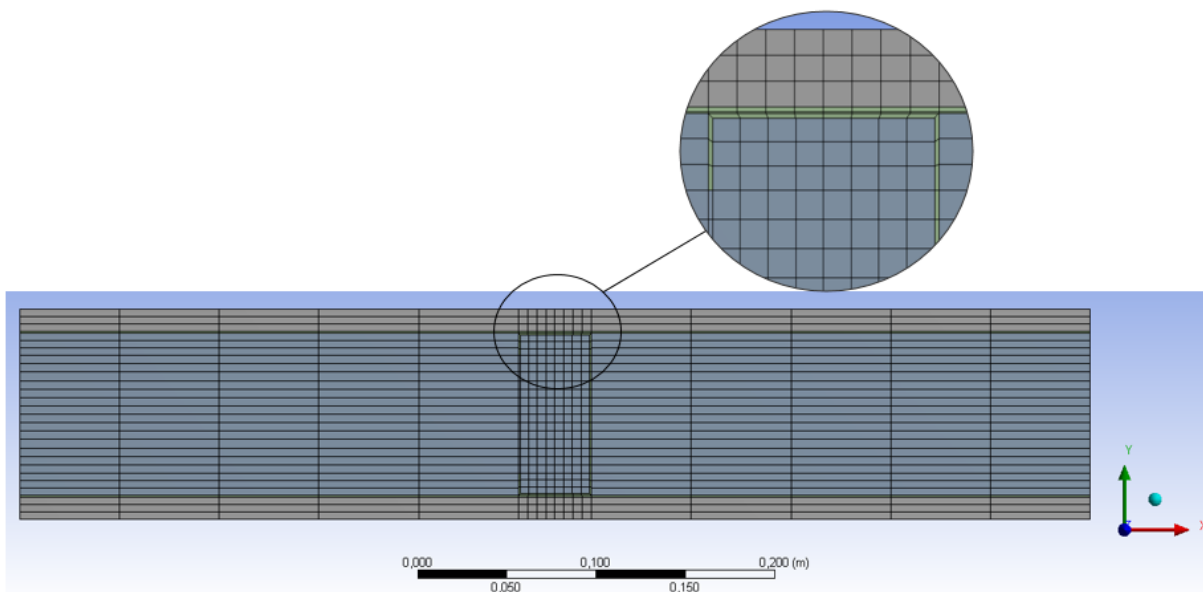


Figura 3.26 – Malha de elementos finitos do painel P3
 Fonte: Autoria própria

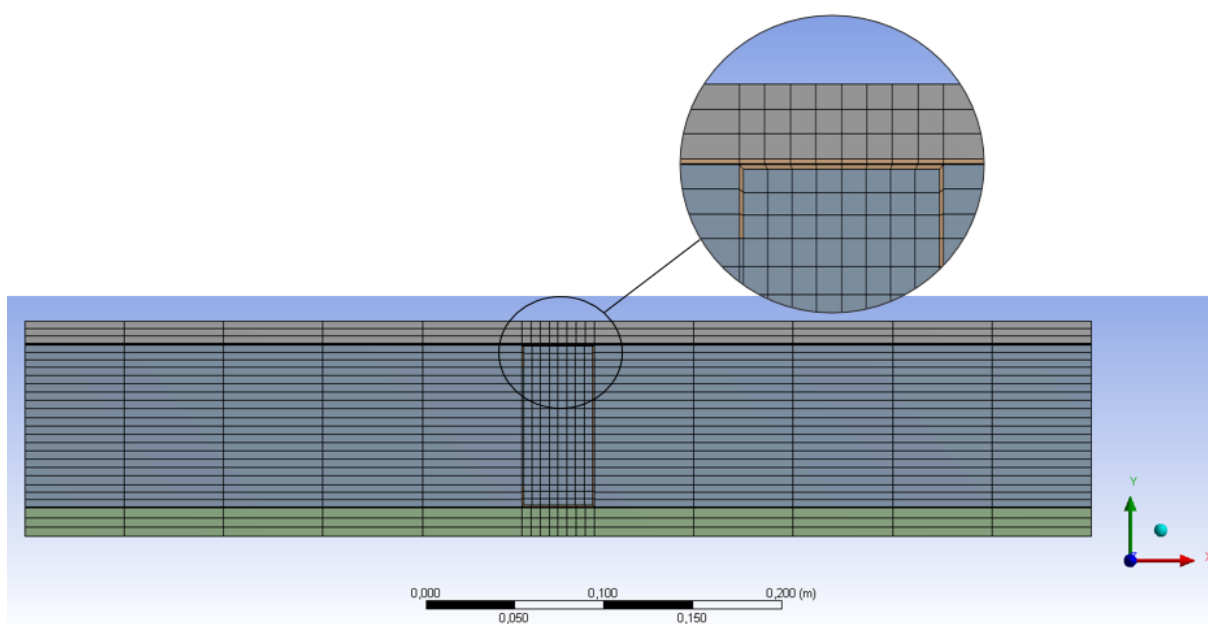


Figura 3.27 – Malha de elementos finitos do painel P4
 Fonte: Autoria própria

Quando sujeita a um incêndio padrão, a edificação precisa ser capaz de resistir a ruína por um certo tempo. Este tempo varia de acordo com as características da edificação, como número de pavimentos, número de subsolos e tipo de ocupação. Este período é conhecido como *tempo requerido de resistência ao fogo* (TRRF). O TRRF é melhor abordado no item 2.2.6.

As casas 1 e 2, devido à dimensão reduzida, não se enquadram nas edificações que a ABNT NBR 14432:2001 considera necessitarem ser avaliadas para

resistência a incêndios. Ainda assim, os painéis são constituídos por materiais utilizados em diversos tipos de construções no Brasil. Dessa forma considera-se relevante o estudo dos diferentes painéis considerando o TRRF máximo exigido pela norma, que é de 120 minutos, de forma a avaliar a aplicabilidade destes painéis.

No capítulo seguinte são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises térmicas.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados das análises térmicas.

Os quatro painéis descritos na Tabela 3.1 foram submetidos ao campo térmico de acordo com a curva de incêndio padrão por 120 minutos, conforme apresentado no capítulo 3. Para os painéis 2 e 4, por não serem simétricos, foram consideradas duas situações, por alternância da face de aplicação do incêndio.

Para criar referências comparativas, o painel P2, foi analisado também, substituindo-se a lã de pet por lã de vidro. Semelhante ao que foi feito no P2, a análise foi realizada duas vezes, alternando-se a face de aplicação do incêndio. Este painel foi chamado de P5.

Como referência geral, analisou-se um painel semelhante ao P1, considerando a cavidade completamente tomada por ar. Este painel foi chamado de P6 e utilizou o mesmo modelo geométrico e malha de elementos finitos que o P1.

Para comparar o desempenho dos diferentes painéis escolheu-se pontos de referência na seção transversal. O ponto 1 corresponde à face da placa em contato com o incêndio. O ponto 2 corresponde à interface entre a placa em contato com o incêndio e a mesa do perfil. O ponto 3 está localizado no meio da alma do perfil de aço. O ponto 4 corresponde à interface entre a mesa do perfil e a placa em contato com o meio em temperatura ambiente. O ponto 5 corresponde a um ponto na face externa da placa em temperatura ambiente. E por fim, para o painel 4 foi tomado ainda um ponto entre a placa cimentícia e a placa de OSB. Os pontos podem ser observados na Figura 4.1. A ação térmica foi inserida uniformemente em uma superfície e o campo térmico no perfil seria o mesmo na seção transversal do perfil.

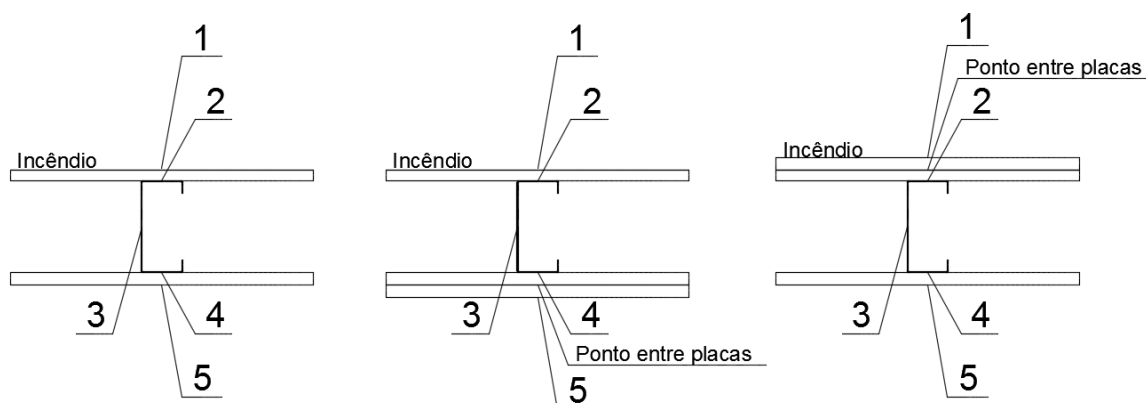


Figura 4.1 – Pontos de obtenção das temperaturas
 Fonte: Autoria própria

4.1 ANALISE TÉRMICA

Os resultados da análise térmica foram apresentados em gráficos, de temperatura nas faces externas (pontos 1 e 5) e no perfil de aço (pontos 2, 3 e 4) em função do tempo. Em seguida uniu-se no mesmo gráfico o mesmo ponto dos diferentes painéis, com finalidade de facilitar a comparação entre eles.

No gráfico da Figura 4.2 estão indicados os resultados o painel P1 nos pontos indicados no início deste capítulo.

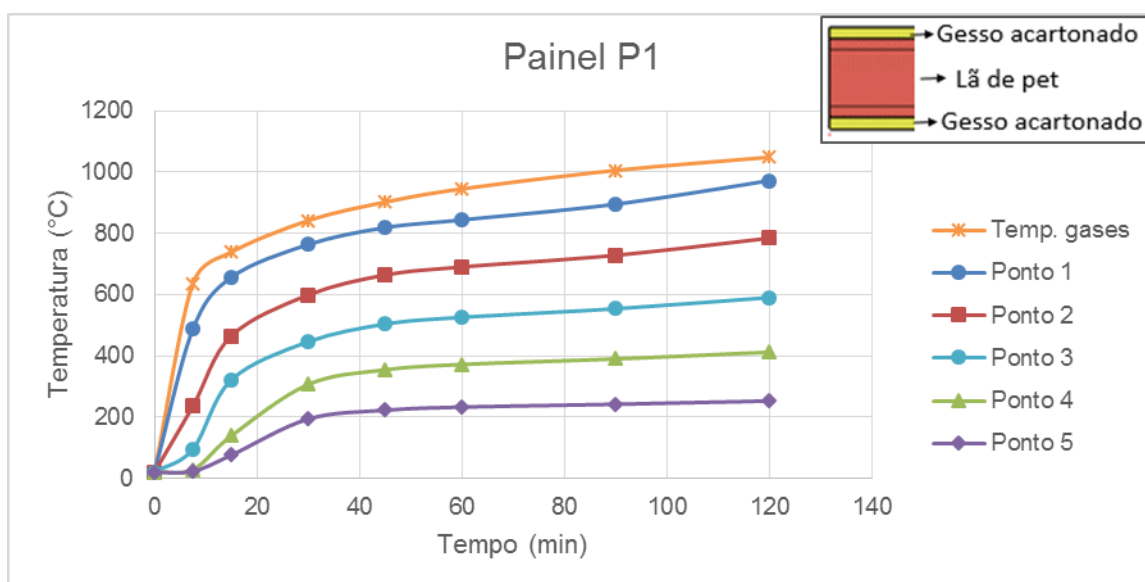


Figura 4.2 – Painel P1 - Temperatura x Tempo
 Fonte: Autoria própria

No painel P2a a ação térmica foi considerada na placa de gesso acartonado. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.3.

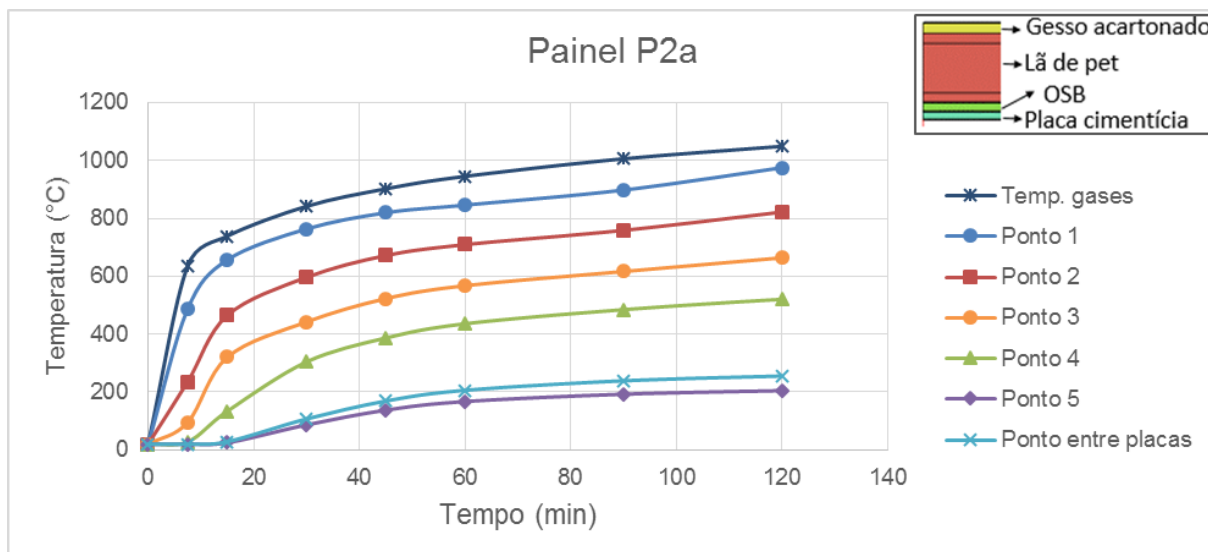


Figura 4.3 – Painel P2a - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber que a temperatura do ponto 5 é menor para P2a que para P1, indicando que a combinação OSB/fibrocimento é mais eficiente em impedir a transferência de calor. Por outro lado, comparando-se os dois painéis nos pontos 2, 3 e 4, ou seja, nas duas mesas e na alma do perfil, percebe-se que a temperatura é maior em P2a que em P1. Ao impedir o fluxo de calor para o meio externo, a camada dupla de placas ocasiona uma elevação na temperatura da região anterior a ela no fluxo.

No painel P2b a ação térmica foi considerada na placa cimentícia. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.4.

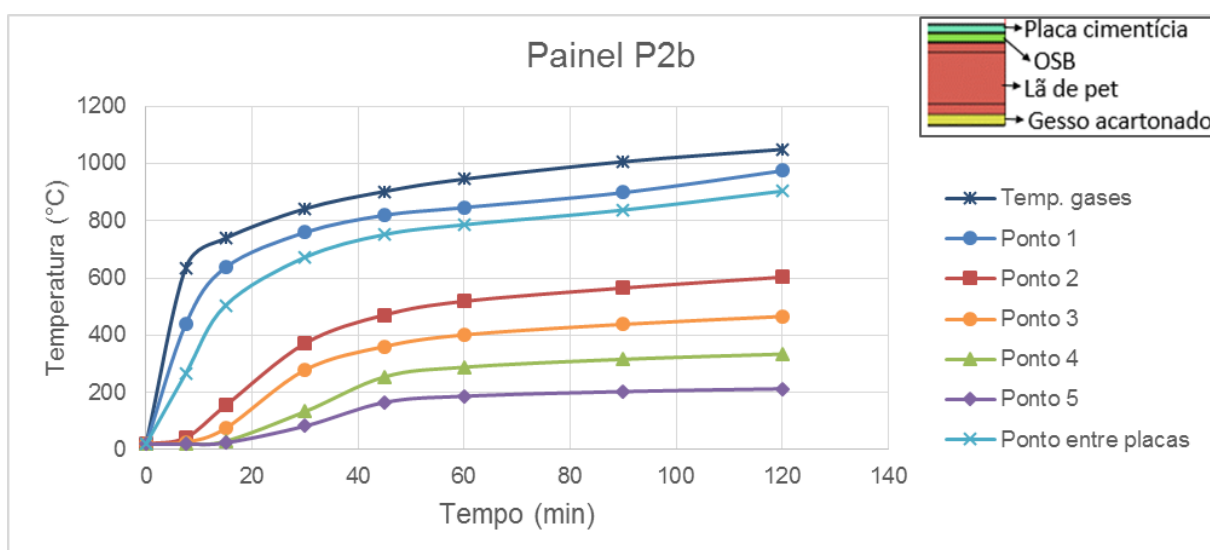


Figura 4.4 – Painel P2b - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

Diferentes apenas na face de aplicação do incêndio, o ponto 5 dos dois painéis apresenta resultados muito próximos, em que se verifica ao final dos 120 min, apenas 8°C de diferença.

A diferença entre o resultado das duas análises está na temperatura do perfil. No painel P2b (ação térmica na placa cimentícia), o ponto 2 (mesa do perfil) registrou temperatura final de 219°C menor que no mesmo ponto de P2a (ação térmica no gesso acartonado). A mesma comparação no ponto 3 mostra diferença de 169°C e no ponto 4, 131°C

O painel P3 difere do painel P1 apenas no material de isolamento, em que foi usado aqui a lã de vidro. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.5.

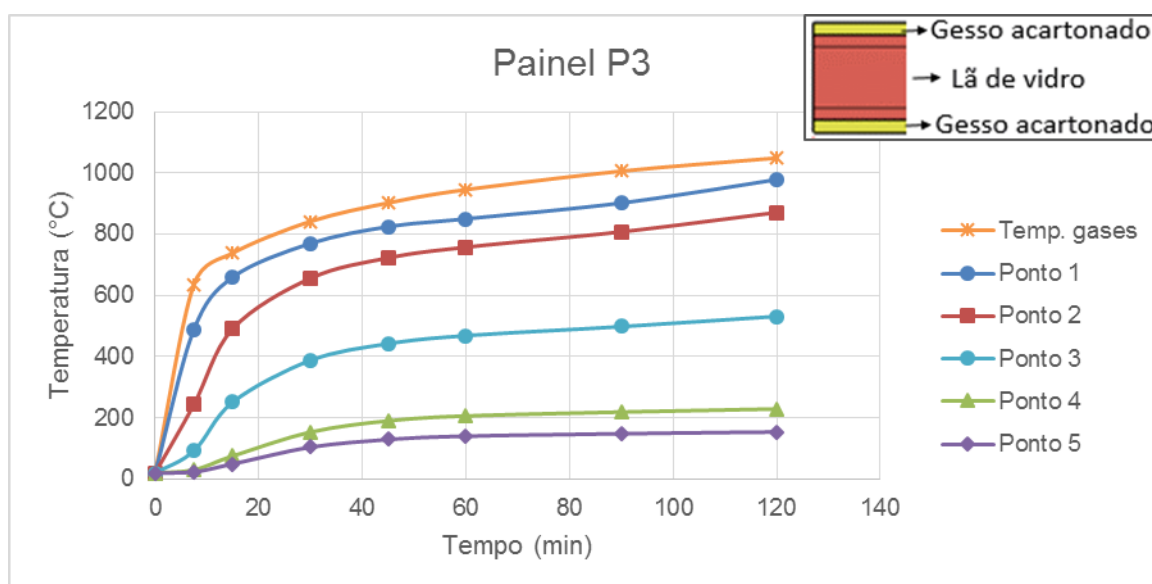


Figura 4.5 – Painel P3 - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

A lã de pet, por seu baixo ponto de fusão, deixa de contribuir com o isolamento da parede em temperatura relativamente baixa quando comparada a amplitude de um incêndio. Dessa forma, como esperado, observa-se que o painel com isolamento de lã de vidro apresenta melhor desempenho.

No painel P4a a ação térmica foi considerada na placa de gesso acartonado. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.6.

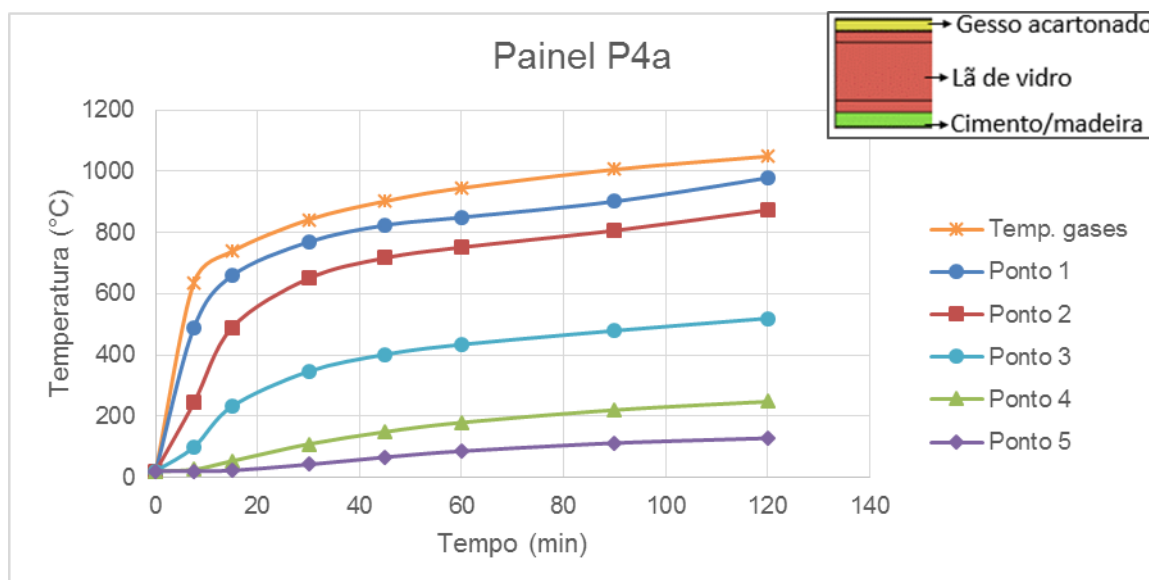


Figura 4.6 – Painel P4a - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

O painel P4a é o que apresenta melhor desempenho no ponto 5, apesar de o painel P5a apresentar resultados semelhantes. Novamente, como observado no painel P2a, a temperatura no perfil metálico não apresenta desempenho semelhante.

No painel P4b o incêndio foi aplicado na placa de cimento/madeira. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.7.

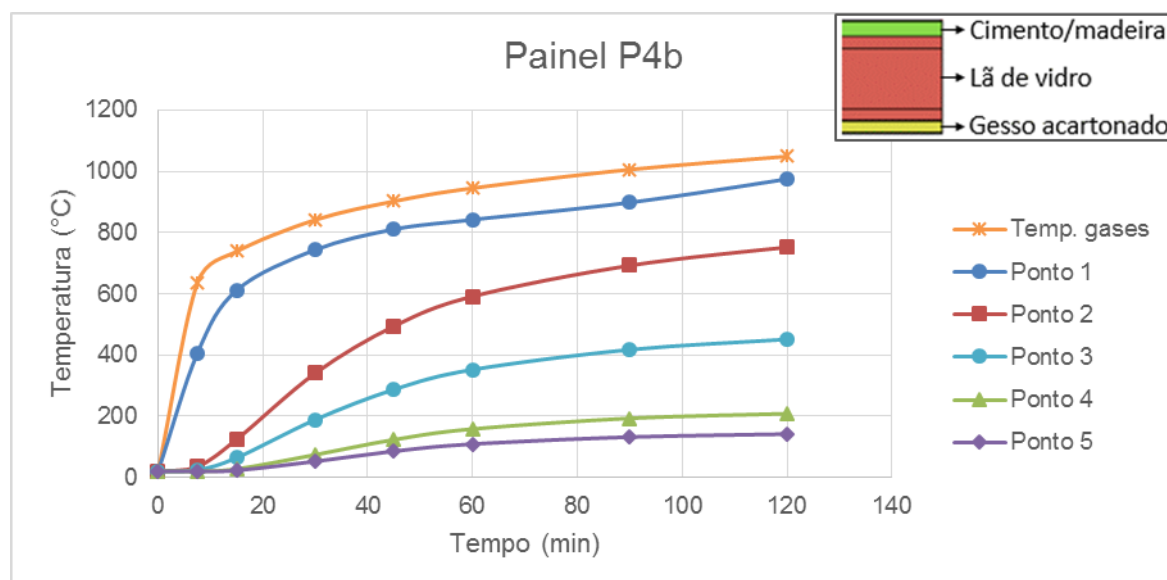


Figura 4.7 – Painel P4b - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

O painel P4b é o que tem a melhor capacidade de proteger o perfil da elevação de temperatura, mas é importante apontar o fato da ação térmica ser aplicada em uma placa de cimento/madeira. Conforme abordado no item 2.2.3.4

apesar de em geral este tipo de material ser apresentado como incombustível, existem casos registrados de falha em situação de incêndio.

O painel P5a apresentado na Figura 4.8, é semelhante ao painel P2a, com a substituição da lã de PET pela lã de vidro.

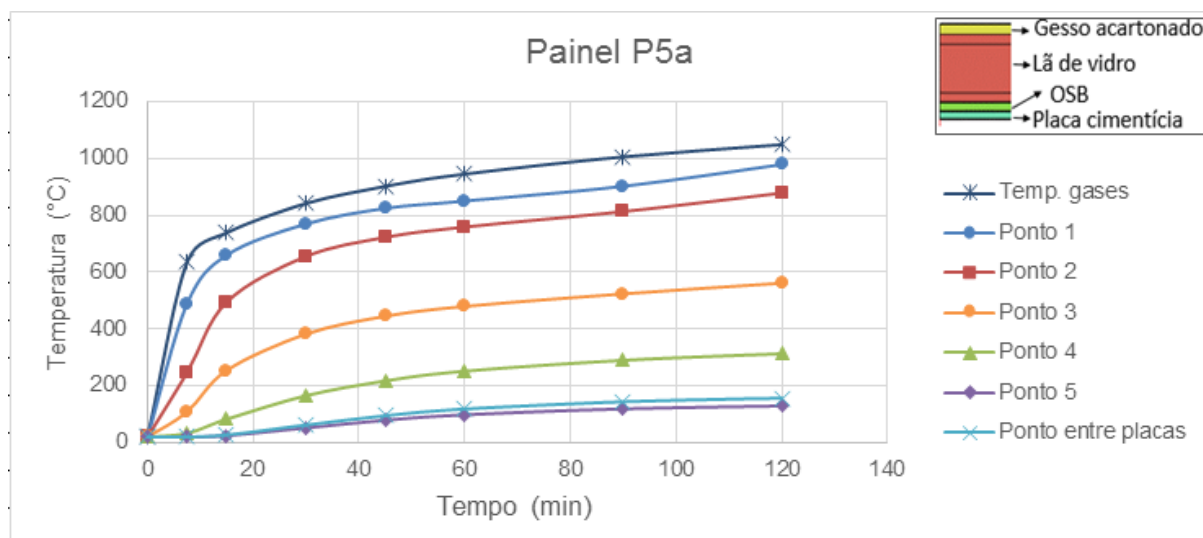


Figura 4.8 – Painel P5a - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

O painel P5b apresentado na Figura 4.9 é semelhante ao painel P2b, com a substituição da lã de PET pela lã de vidro.

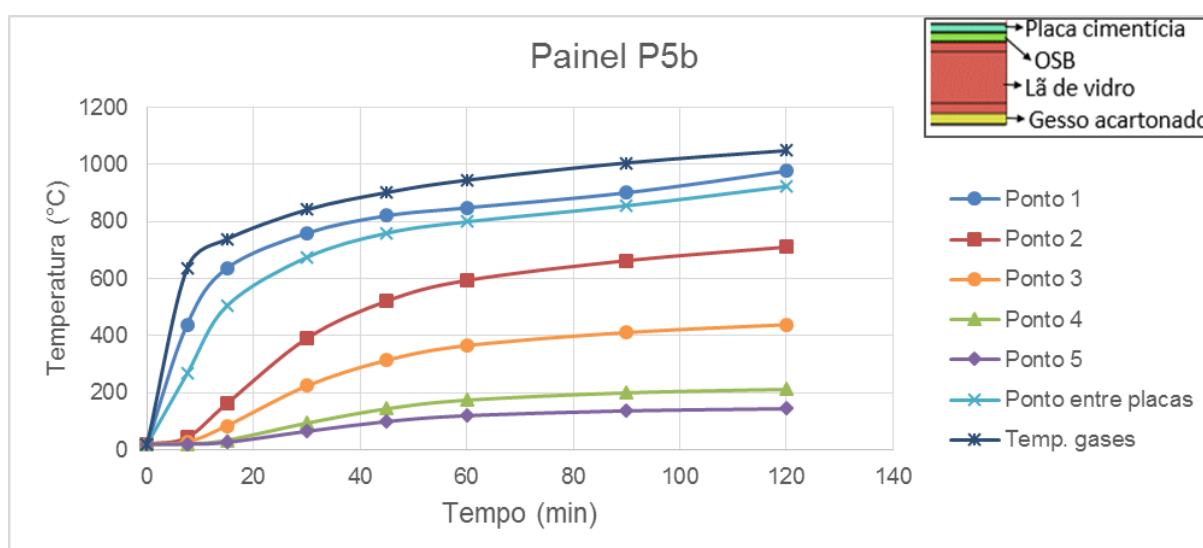


Figura 4.9 – Painel P5b - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

Como já observado na comparação entre os painéis P1 e P3, os painéis P5a e P5b apresentam um desempenho superior aos seus semelhantes P2a e P2b.

A lã de vidro é considerada íntegra até o final da análise, proporcionando a redução da temperatura do perfil e da face externa da placa não sujeita ao incêndio.

O painel P6, apresentado na Figura 4.10 foi analisado considerando-se a cavidade preenchida por ar desde o princípio.

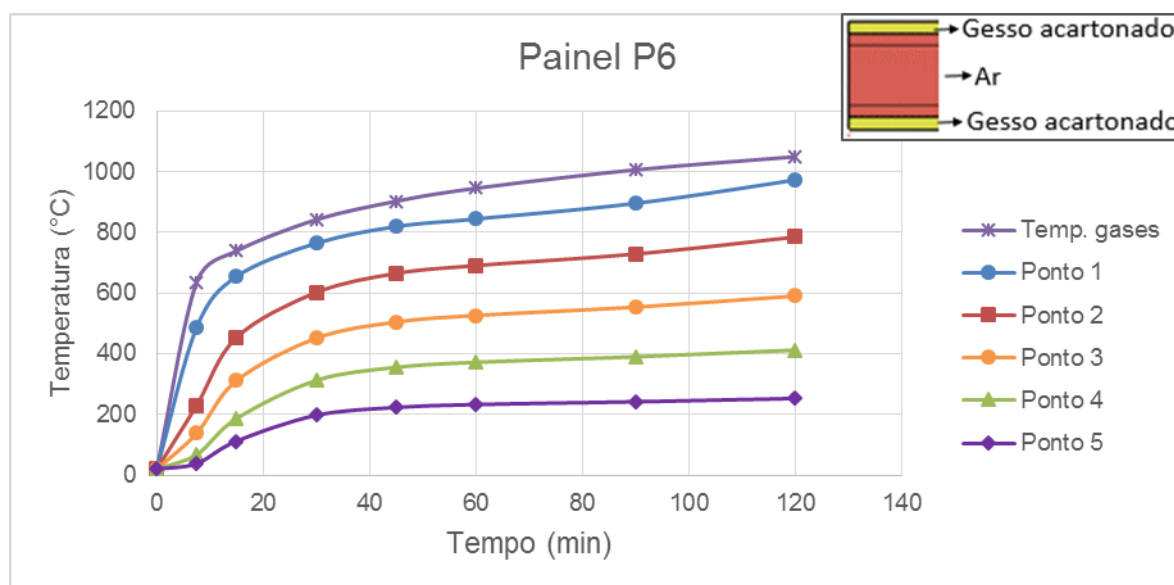


Figura 4.10 – Painel P6 - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

Com a total ausência de isolamento da cavidade o painel P6 apresenta o pior desempenho no ponto 5. Ao compará-lo com P1, percebe-se que o desempenho de P1 é melhor para temperaturas abaixo de 220°C, enquanto a lã de PET ainda está presente. Após o ponto de fusão da manta, as temperaturas de P1 sobem rapidamente, de forma que para tempos superiores, quando as temperaturas estão elevadas, os dois painéis apresentam distribuição de temperaturas praticamente iguais.

Para comparar o desempenho dos painéis, plotou-se os resultados combinados ponto a ponto, de forma a ser possível comparar a variação da temperatura de cada um dos painéis no ponto em questão. Na Tabela 4.1 é reapresentado de forma resumida a referência de cada painel com a sua respectiva constituição na análise.

Tabela 4.1 – Referência dos painéis em análise

Painel	Placa sob ação térmica	Preenchimento da cavidade	Placa sem ação térmica
P1	Gesso acartonado	Lã de PET	Gesso acartonado
P2a	Gesso acartonado	Lã de PET	Cimentícia
P2b	Cimentícia	Lã de PET	Gesso acartonado
P3	Gesso acartonado	Lã de vidro	Gesso acartonado
P4a	Gesso acartonado	Lã de vidro	Cimento-madeira
P4b	Cimento-madeira	Lã de vidro	Gesso acartonado
P5a	Gesso acartonado	Lã de vidro	Cimentícia
P5b	Cimentícia	Lã de vidro	Gesso acartonado
P6	Gesso acartonado	Ar	Gesso acartonado

Fonte: autoria própria

O ponto 1 não foi plotado devido ao fato de ser o ponto onde o incêndio incide sobre as placas, apresentado desta forma valores semelhantes em todas as análises. As plotagens dos outros pontos podem ser vistos na Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

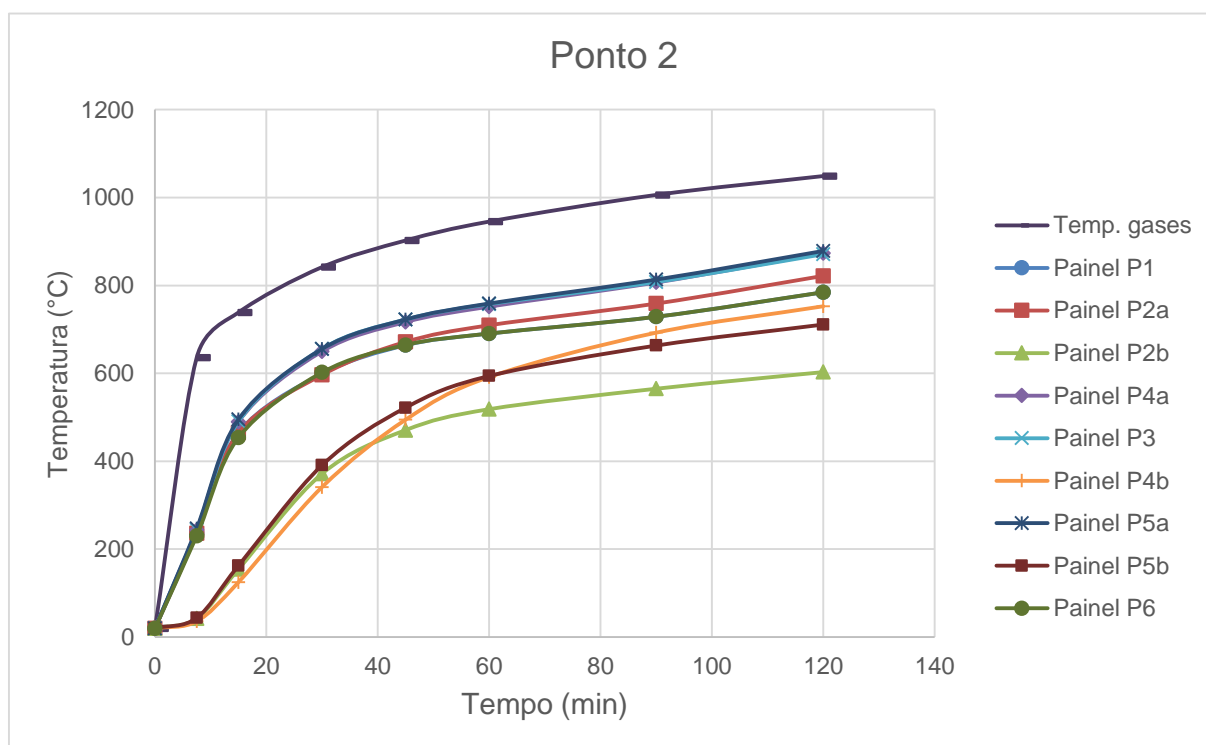


Figura 4.11 – Ponto 2 - Temperatura x Tempo

Fonte: Autoria própria

O ponto 2 é tomado na mesa do perfil mais próxima ao incêndio. Observa-se que todos os painéis que recebem o incêndio na placa de gesso acartonado e que possuem manta isolante, apresentam comportamento semelhante até alcançarem 220°C. Nesta temperatura, dá-se início a fusão da lã de pet e a temperatura do ponto 2 passa a ser menor quando comparada aos painéis que continuam com o isolamento intacto. Quando a cavidade passa a ser ocupada por ar, o fluxo de calor através do painel aumenta, desta forma o calor chega mais rapidamente a face oposta ao incêndio e como a energia fornecida é a mesma a temperatura na região mais próxima ao incêndio tende a reduzir.

A temperatura do ponto 3 é tomada no centro da alma do perfil e apresenta a tendência de desempenho do painel, a ser confirmado pela Figura 4.12.

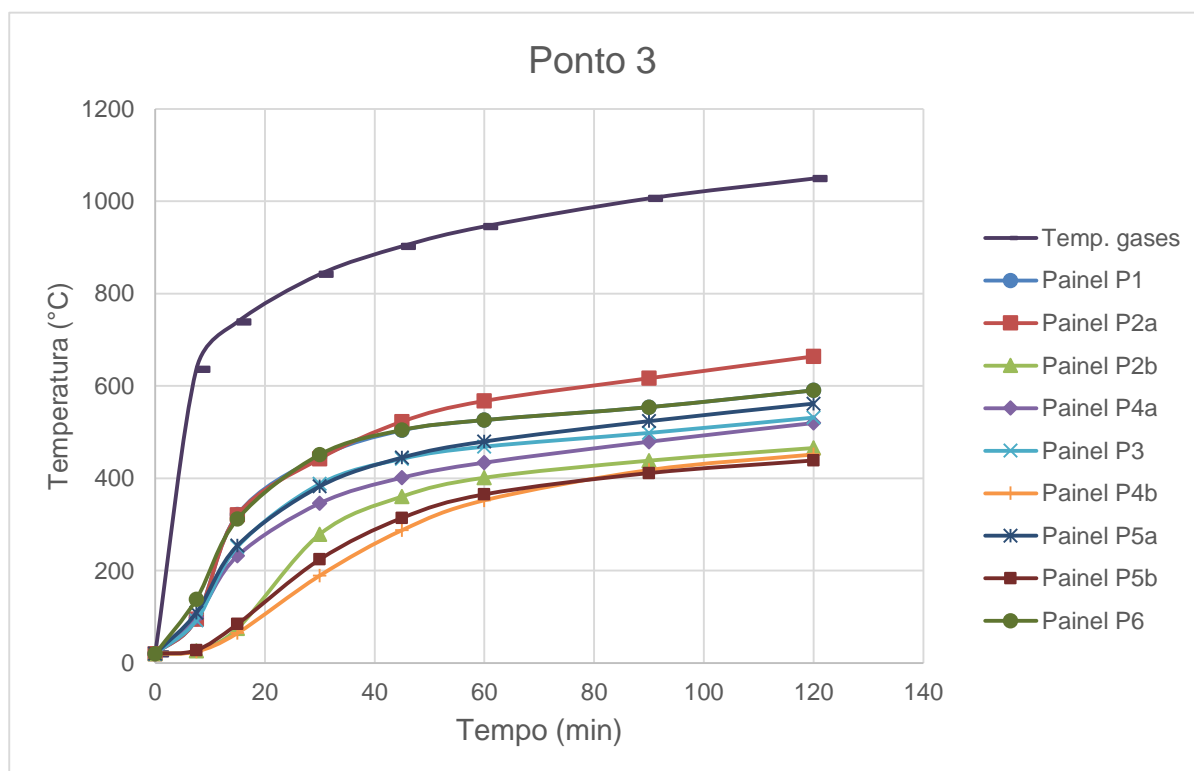


Figura 4.12 - Ponto 3 - Temperatura x Tempo
Fonte: Autoria própria

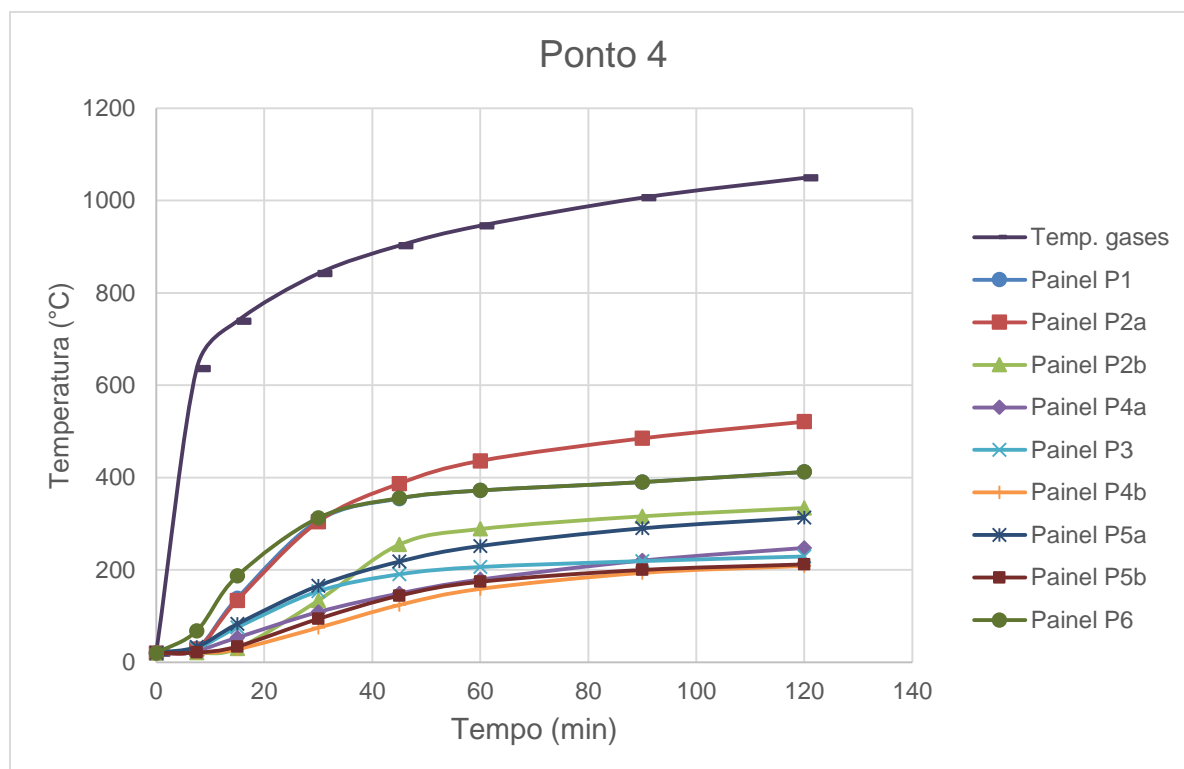


Figura 4.13 - Ponto 4 - Temperatura x Tempo

Fonte: Autoria própria

No ponto 4 é medida a temperatura da mesa na face oposta ao incêndio. Observando a Figura 4.13 vê-se novamente a influência do preenchimento por ar da cavidade quando comparamos os painéis com preenchimento de lã de PET com os preenchidos por lã de vidro e consta-se a diferença de temperatura entre eles que se acentua à medida que a análise avança.

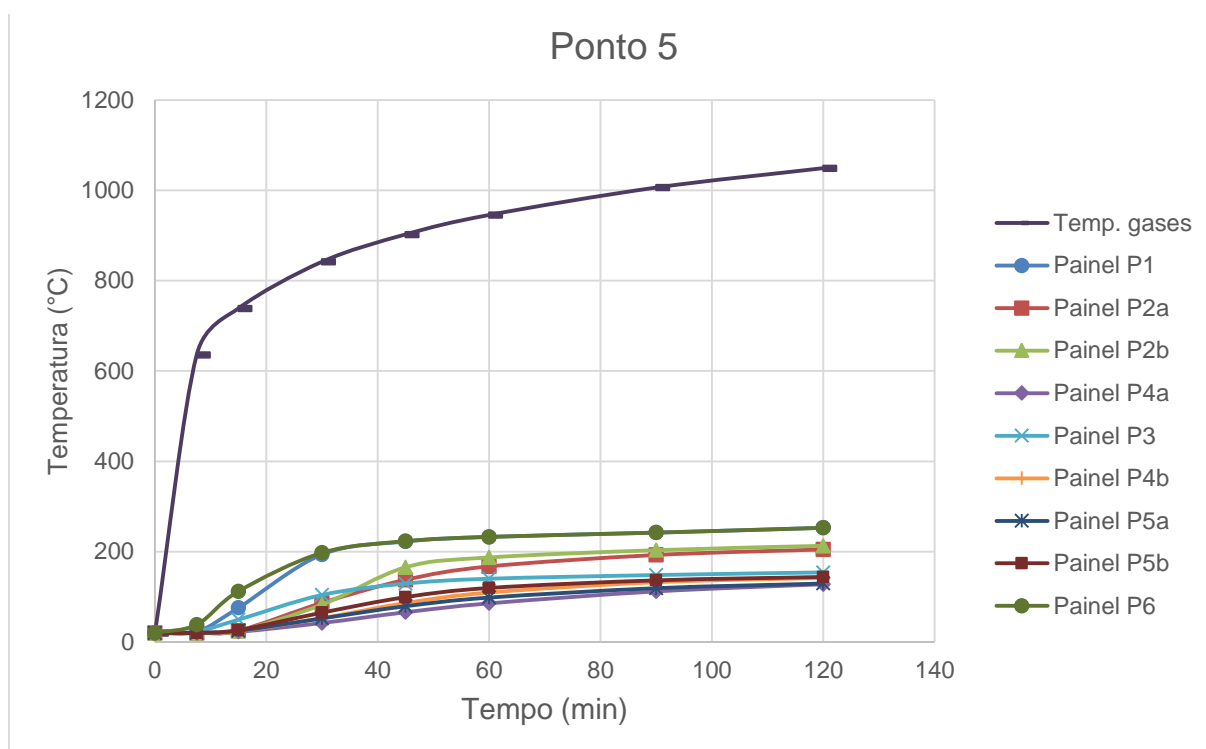


Figura 4.14 - Ponto 5 - Temperatura x Tempo

Fonte: Autoria própria

O ponto 5 é medido na face do painel oposta ao incêndio. A temperatura referente a este ponto é apresentada na Figura 4.14. A temperatura aqui tem relação com a constituição completa do painel, mas o fato do painel ter melhor desempenho aqui não reflete necessariamente o desempenho no perfil. Desta forma, estes resultados, tem maior interesse caso a parede não tenha função estrutural.

Conforme o gráfico da Figura 4.14, os painéis com melhor desempenho no ponto 5, são os painéis P4a e P5a. Ambos possuem a cavidade preenchida por material isolante durante toda a análise e possuem placa com melhor capacidade de isolamento posicionada na face não exposta ao incêndio. O desempenho destes painéis é melhor inclusive que os mesmos com temperatura aplicada na face oposta.

4.2 CAPACIDADE RESISTENTE DA ESTRUTURA DE AÇO

Com a elevação da temperatura, as propriedades mecânicas dos materiais se alteram. No caso do aço, entre outras alterações, ocorre a redução da resistência ao escoamento, tensão de proporcionalidade e módulo de elasticidade. A depender

da solicitação e do gradiente de temperatura resultante no material em decorrência de uma ação térmica, esta redução pode levar a ruína da estrutura.

Conforme apresentado no capítulo anterior, considerou-se a resistência ao escoamento do aço como 230 MPa.

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta fatores de redução da resistência do aço em função da temperatura, como mostrado na Tabela 2.2 do item 2.2.2.1. Com base nesses fatores de redução, foram elaborados gráficos que mostram a redução da resistência pelo tempo nas mesas e alma do perfil, como mostrado na Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23.

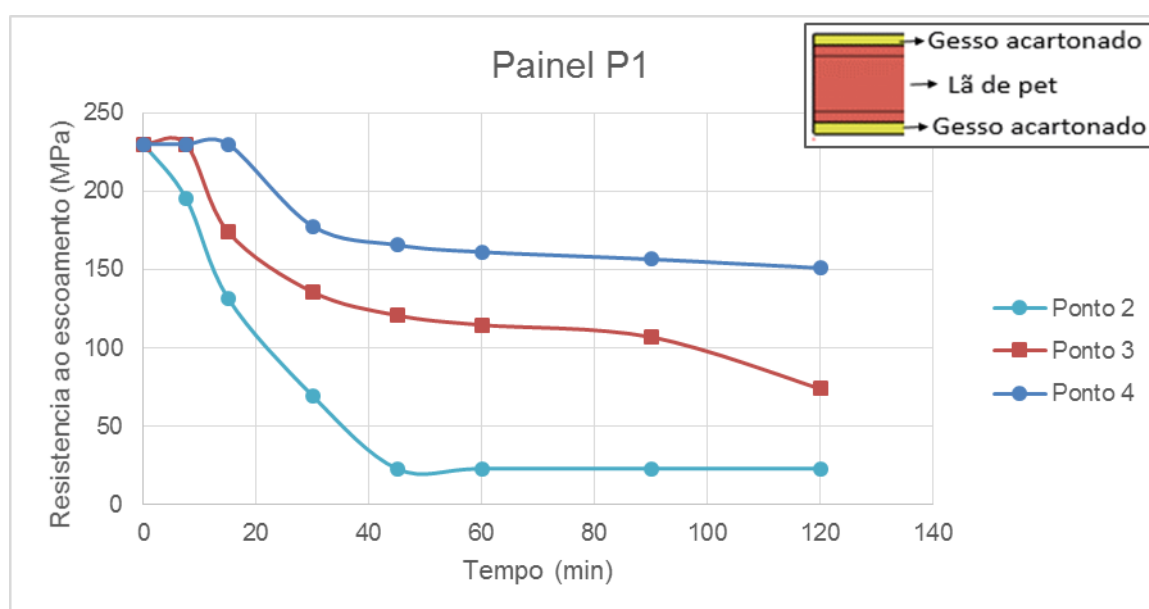


Figura 4.15 – Painel P1 – Resistência ao escoamento x Tempo
Fonte: Autoria própria

Sendo o painel P1 dotado apenas de uma placa de gesso acartonado na face exposta ao incêndio, nota-se que a queda de resistência da mesa do lado exposto decai rapidamente, atingindo a resistência mínima de acordo com os fatores utilizados. Esta observação se repete nas outras situações em que a proteção da mesa do lado exposto é feita apenas por uma placa de gesso acartonado.

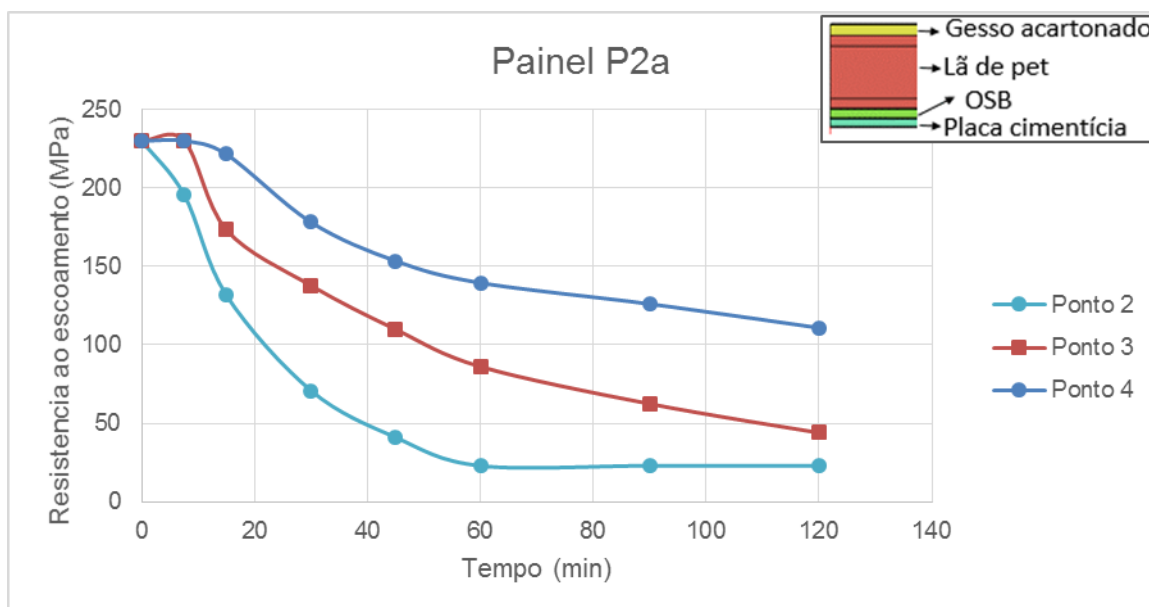


Figura 4.16– Painel P2a – Resistencia ao escoamento x Tempo
Fonte: Autoria própria

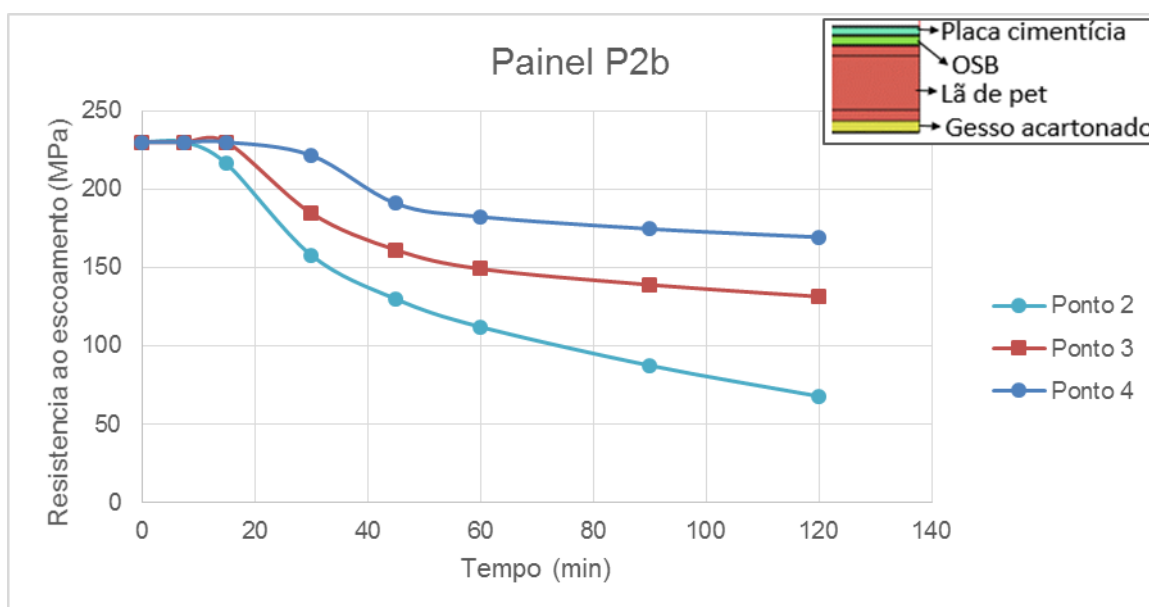


Figura 4.17 – Painel P2b – Resistencia ao escoamento x Tempo
Fonte: Autoria própria

No caso do painel P2b, a face exposta ao incêndio conta com a placa cimentícia e a placa OSB, proporcionando uma resistência final maior não só da mesa, mas do perfil como um todo.

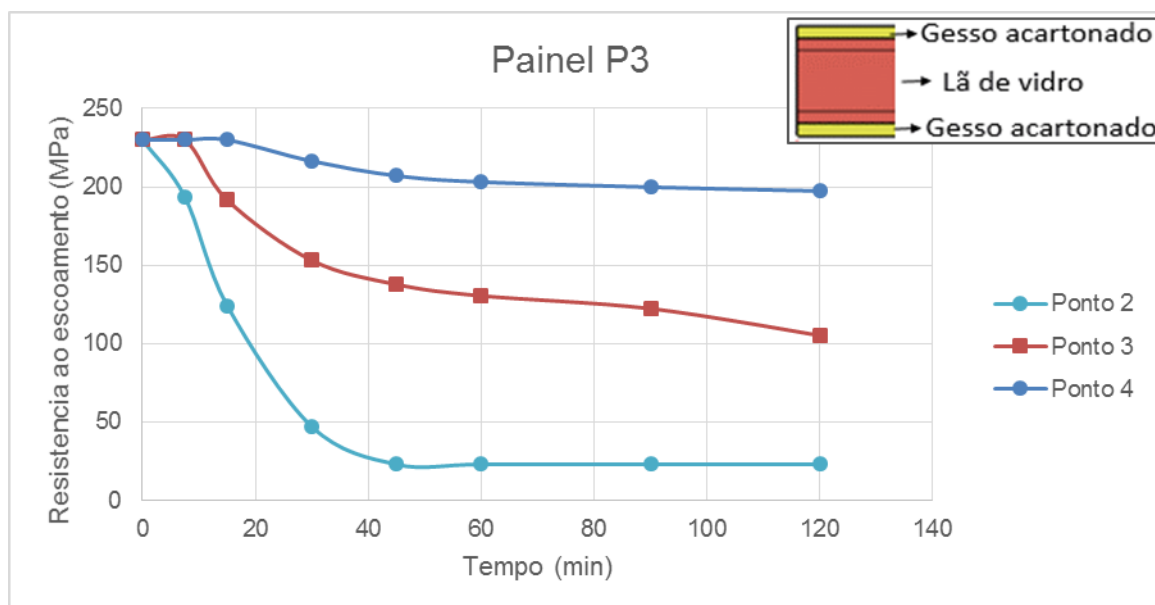


Figura 4.18 – Painel P3 – Resistência ao escoamento x Tempo
 Fonte: Autoria própria

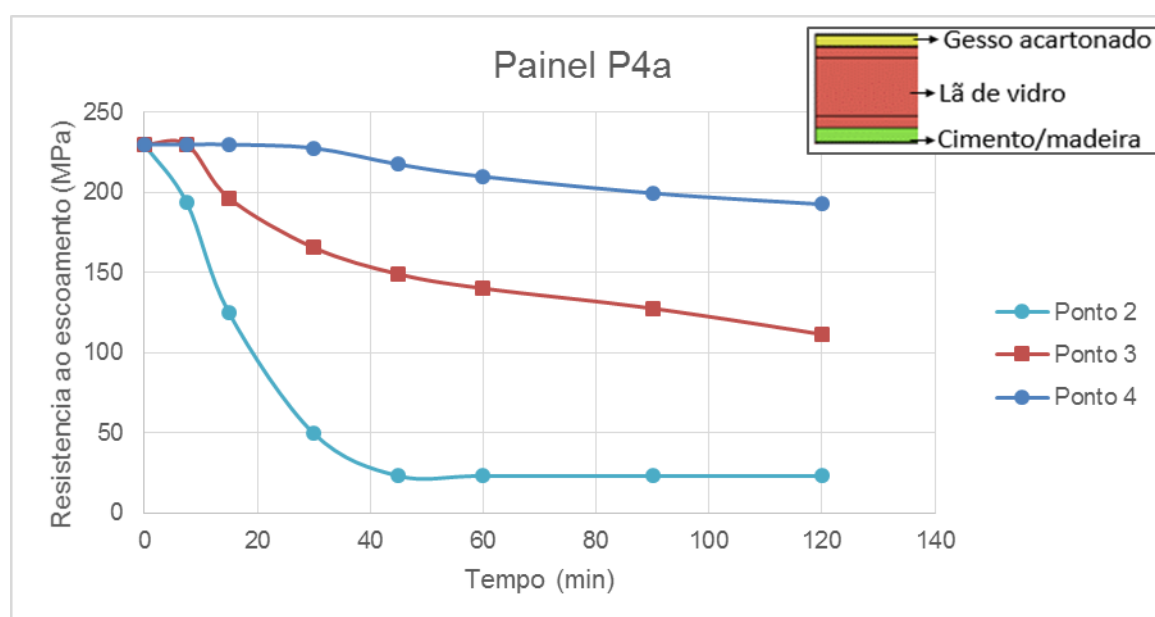


Figura 4.19 – Painel P4a – Resistência ao escoamento x Tempo
 Fonte: Autoria própria

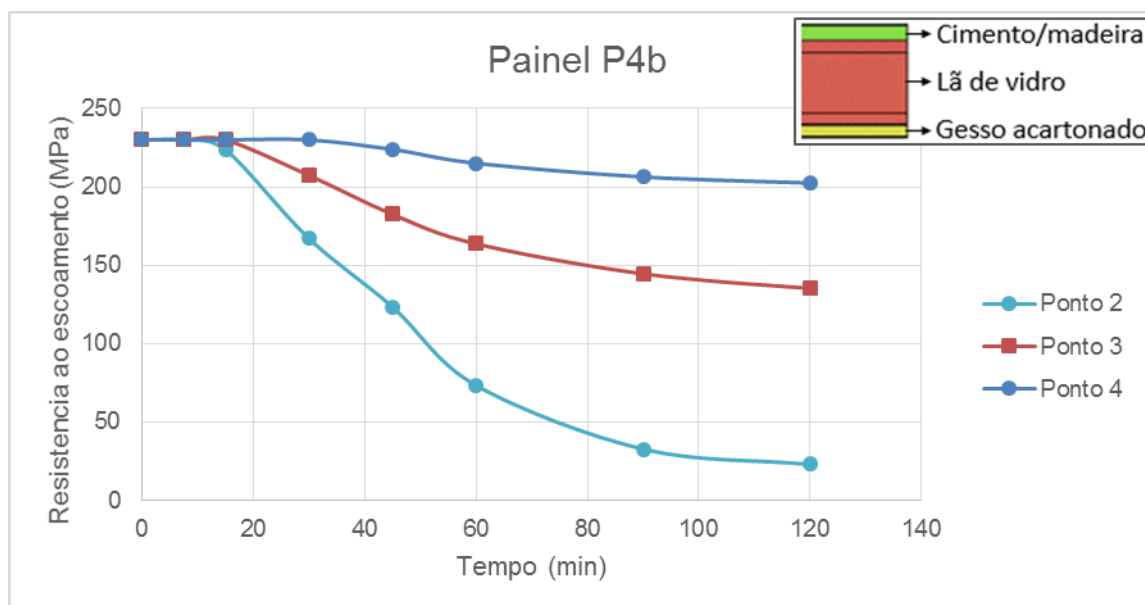


Figura 4.20 – Painel P4b – Resistência ao escoamento x Tempo
 Fonte: Autoria própria

Observa-se aqui a mesma tendência citada em relação ao painel P2b devido a placa com maior capacidade isolante, apenas com menor intensidade. Esta tendência será observada novamente ainda no painel P5b pela mesma razão.

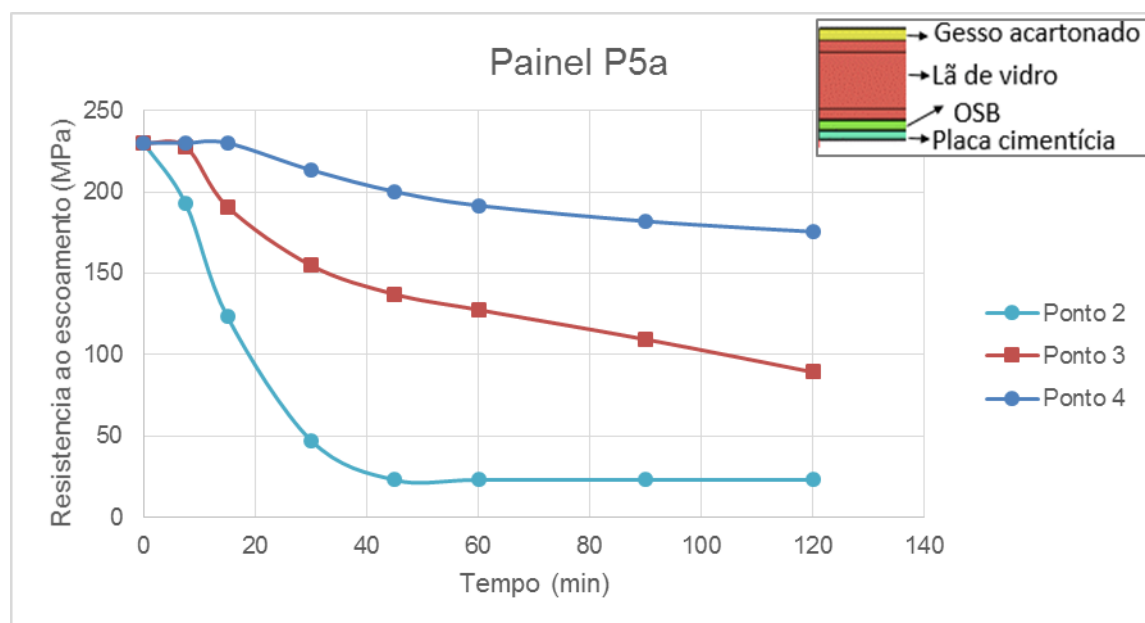


Figura 4.21 – Painel P5a – Resistência ao escoamento x Tempo
 Fonte: Autoria própria

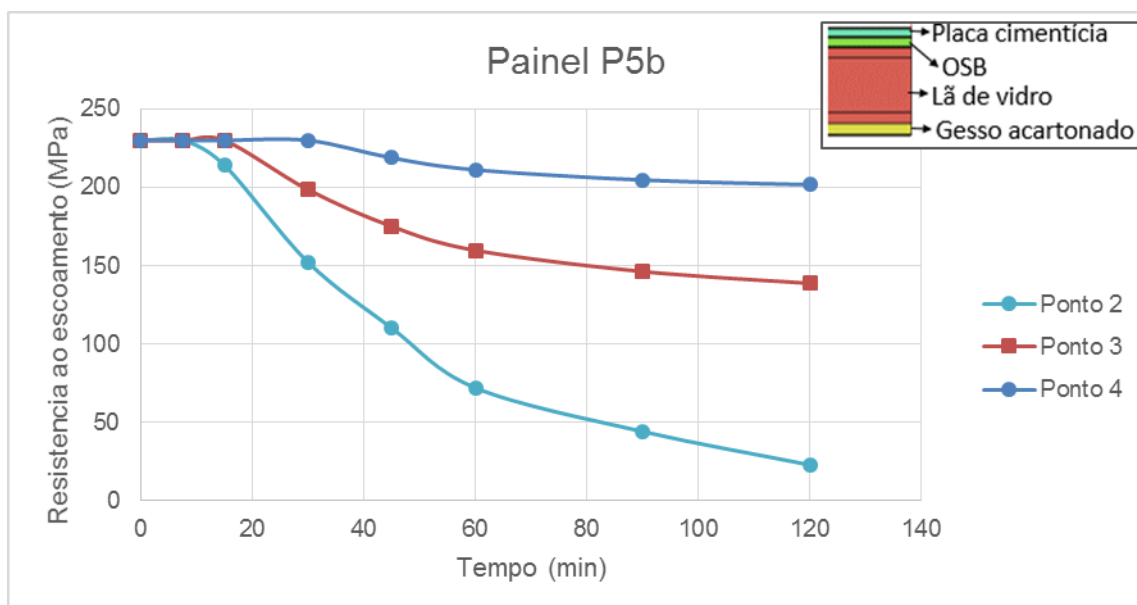


Figura 4.22 – Painel P5b – Resistência ao escoamento x Tempo
Fonte: Autoria própria

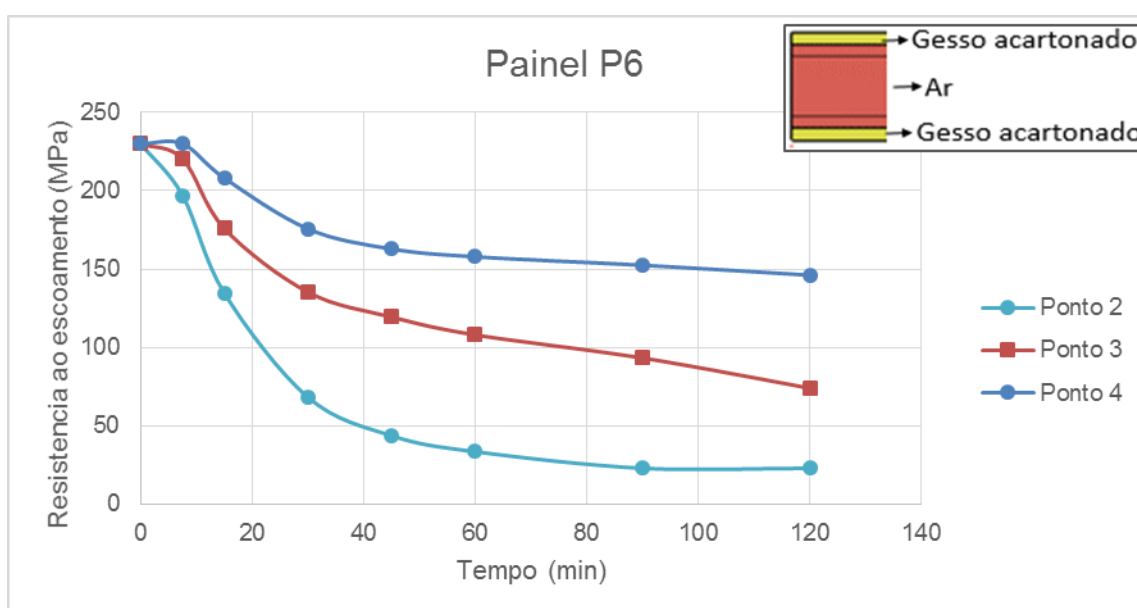


Figura 4.23 – Painel P6 – Resistência ao escoamento x Tempo
Fonte: Autoria própria

Observa-se que alguns perfis alcançam resistência mínima na mesa em contato com a face exposta à ação térmica, mas isto não acontece em nenhum deles no ponto referente a alma nem no ponto referente a mesa do lado oposto. Desta forma, pode-se afirmar que ocorre uma variação na queda de resistência do perfil ao longo da seção transversal acompanhando o aumento de temperatura. Ou seja, como a temperatura não é uniforme na seção transversal do perfil, a resistência ao escoamento do perfil também não é uniforme.

Para estudar comportamento do perfil considerando-se essa variação diferencial seria necessário prosseguir com uma análise estrutural em elementos finitos acoplada a análise térmica. Como este estudo não faz parte do escopo deste trabalho, para as considerações da TRF do painel, utiliza-se de forma simplificada a temperatura média da seção transversal do perfil.

A temperatura média foi calculada através da média ponderada da temperatura da mesa próxima ao incêndio, da alma e da mesa próxima ao ambiente pelos comprimentos de cada um destes elementos do perfil. A temperatura média do perfil metálico de cada painel para 30 min, 60 min e 120 min pode ser vista na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Temperatura média do perfil

Tempo de exposição	P1 (°C)	P2a (°C)	P2b (°C)	P3 (°C)	P4a (°C)	P4b (°C)	P5a (°C)	P5b (°C)	P6 (°C)
30 min	450	446	266	396	361	198	396	233	455
60 min	529	570	402	474	449	363	492	374	529
120 min	595	667	467	540	539	465	578	449	595

Fonte: Aatoria Própria

Na Tabela 2.2 são apresentados os fatores de redução da resistência ao escoamento para perfis metálicos sujeitos a flambagem de acordo com a temperatura sugeridos pela ABNT NBR 14323:2013.

Utilizando-se interpolação das informações da Tabela 2.2 determinou-se a temperatura que o perfil de aço sujeito a flambagem é capaz de suportar ao ser solicitado por 100 %, 70 % e 50% da sua tensão de escoamento máxima.

Utilizando como base estas temperaturas, definiu-se a TRF dos painéis para os três casos de carregamento avaliando em quanto tempo a temperatura média demora para atingir a temperatura de referência. Na Figura 4.24 apresenta-se o TRF para os painéis, considerando solicitações de 100 %, 70 % e 50% da tensão de escoamento máxima.

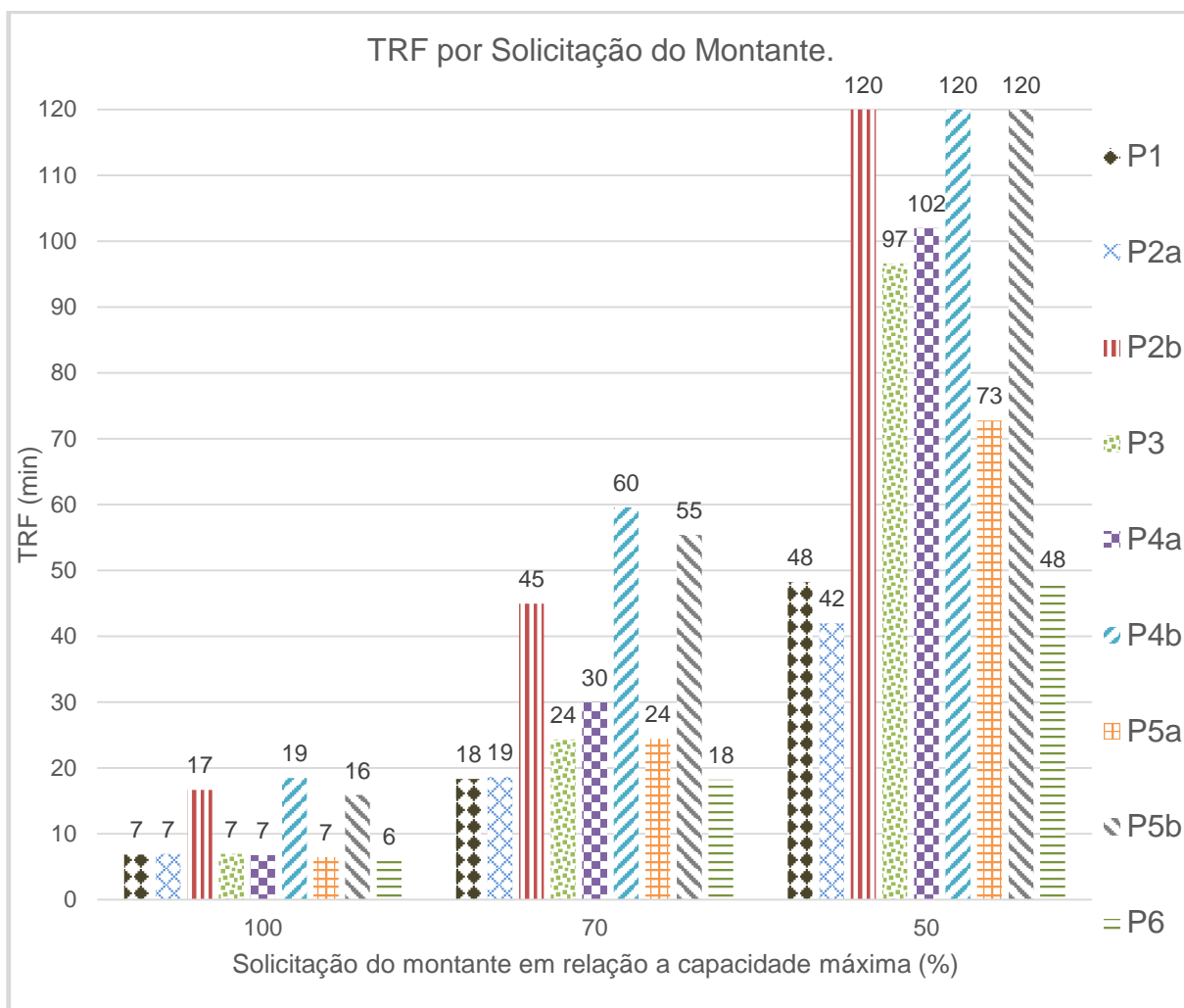


Figura 4.24 – TRF dos painéis por tensão aplicada no montante
Fonte: Autoria própria

Salienta-se que a análise foi interrompida aos 120 min, de forma que P2b, P4b e P5b, apesar de estarem representados com TRF 120 min na Figura 4.24, não apresentaram o mesmo desempenho, como já discutido no item 4.1.

Observa-se que para o perfil solicitado em 50 % de sua capacidade máxima, todos os painéis superam o TRRF de 30 min, mesmo o P6, que não possui qualquer isolamento na cavidade. Este resultado está de acordo com dados apresentados no item 2.2.6, que por meio de análise experimental, classificam painel semelhante para este tempo de resistência.

É importante frisar que para a metodologia de determinação da TRF proposta assumiu-se temperatura uniforme na seção transversal e não foram feitas verificações em relação instabilidade gerada pela flambagem. Com relação a isso, a utilização de temperatura média é comum em diversos métodos simplificados. Pela constituição do painel, com a fixação de placas nas mesas interna e externa dos perfis

metálicos, alguns autores afirmam que é possível considerar restrição lateral ao longo das mesas do perfil, proporcionando ganho na resistência a flambagem do sistema como apresentado no item 2.2.8. Desta forma, seria necessário a realização de análises experimentais para aprofundar a discussão desse método.

5. CONCLUSÃO

Apesar da utilização de apenas quatro painéis como base do estudo, devido as possibilidades de aplicação de incêndio o estudo acabou abrangendo nove análises envolvendo configurações semelhantes e utilizando-se materiais disponíveis no mercado brasileiro.

A parede com dimensões reais, ou seja, com 3,00 x 3,00 metros foi inicialmente considerada na análise numérica. Mas além de um elevado tempo de processamento, não foram observadas melhorias nos resultados que não pudessem ser obtidos com o modelo representativo de 0,60 x 3,00 metros que foi adotado, visto que a distribuição de temperatura era uniforme na área da parede. Isto acontece devido a aplicação uniforme da carga térmica sobre a superfície.

A etapa de validação do modelo numérico consistiu, inicialmente na definição da malha. Para tanto, realizou-se uma análise de convergência de forma a obter-se uma malha eficiente, capaz de obter resultados acurados com menor tempo de processamento.

Foram testadas também, várias densidades de malha, sendo observado que era necessário um refino maior apenas nas regiões onde estavam localizados os perfis de aço e no sentido transversal do painel.

O elemento finito utilizado, o sólido de 8 nós, foi suficiente para a análise realizada. Mas tendo em vista o comportamento de chapa do perfil metálico, este poderia ter sido modelado com elementos de casca, reduzindo a demanda computacional.

A lã de PET é um material novo e conta com pouca literatura técnica a respeito. Devido ao seu baixo ponto de fusão é mais indicado para isolamento térmico comum, pois como observado na comparação entre os painéis P1 e P6, após a fusão da manta, a temperatura rapidamente se iguala a de um painel sem isolamento.

A simulação da fusão da lã de PET e a consequente substituição da cavidade do painel por ar com a utilização de um material de propriedades variáveis no tempo produziu resultados coerentes com as demais análises. Mas seria desejável pesquisas experimentais de referência para melhor compreensão do fenômeno.

O fabricante dos perfis utilizados nas casas 1 e 2 não disponibiliza dados de ensaio de resistência ao escoamento do aço dos perfis, apenas garante atender as especificações da ABNT NBR 15217:2009. Adotou-se então, a tensão de

escoamento mínima exigida pela norma para os perfis considerando, portanto, o pior caso.

O melhor desempenho observado foi o do painel P4b, composto por manta isolante de lã de vidro, placa de cimento/madeira no lado exposto ao incêndio e gesso acartonado como fechamento do lado não exposto. A placa de cimento/madeira é um compósito encontrado comercialmente com grande variabilidade de componentes e proporções entre eles. Ao se optar por uma composição de painel que exponha a placa de cimento/madeira ao incêndio, recomenda-se a utilização de uma placa comprovadamente incombustível.

Na análise numérica foi desconsiderada uma possível degradação dos materiais constitutivos do painel. Não se considerou, por exemplo, a degradação do gesso acartonado devido a temperatura elevada, que foi observada por alguns autores em investigações experimentais. Para prever numericamente os efeitos da degradação dos materiais, são necessários ensaios de caracterização das propriedades térmicas dos materiais em função da temperatura no tempo, que não fez parte do escopo deste trabalho.

As casas modelo são isentas pela ABNT NBR 14432:2001 de comprovar resistência ao incêndio, e, devido ao sistema construtivo, há uma baixa solicitação dos perfis componentes do painel. Desta forma, mesmo a parede menos protegida das edificações se qualifica para um TRRF de 30 min.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item apresentam-se sugestões para continuidade e aprofundamento do presente trabalho, de forma a aumentar a abrangência do mesmo.

- Estender a pesquisa para o campo experimental para aprofundar o entendimento do comportamento dos materiais de origem nacional submetidos a ação de incêndio.
- Realizar análise de sensibilidade das propriedades dos materiais para o problema em questão.
- Aprofundar os estudos sobre projeto de prevenção contra incêndio usando os materiais abordados neste trabalho.
- Análise numérica e experimental termoestrutural de *light steel framing*.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C; BATISTA, E. M. Análise computacional do fenômeno de transferência de calor em paredes divisórias do tipo dry wall. **Rev. Esc. Minas**, v.60, n.2, Ouro Preto, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Handbook-Fundamentals**. Atlanta, 2005.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119-16: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. West Conshohocken, 2016.

ANGELOZZI, G. A. **A Água e a Cruz: Identificação Cristã pelos romanos entre 54 e 117 d.C.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense. Niteroi, 2003.

ANSYS INC. **Ansys release 14.0 – Documentation**. 2011.

ARIYANAYAGAM, A. D.; MAHENDRAN, M. Experimental Study of Load-Bearing Cold-Formed Steel Walls Exposed to Realistic Design Fires. **Journal of Structural Fire Engineering**. Brisbane 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE *DRYWALL*. **Números do Segmento**. Disponível em: <<http://www.drywall.org.br/index.php/6/numeros-do-segmento>> Acesso em: 19 abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-1**: Chapas de madeira aglomerada Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15217**: Perfis de aço para sistemas construtivos em chapas de gesso para "drywall" - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15253**: Perfis de Aço Formados a Frio, com Revestimento Metálico, para Painéis Reticulados em Edificações: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio: Padronização. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

BARBIERI INDÚSTRIA DE PERFIS DO BRASIL. **Perfis estruturais galvanizados**. Catálogo Técnico. Almirante Tamandaré, 2014.

BATEMAN, B. W. **Light gauge steel verses conventional wood framing in residential construction**. Department of construction science of A&M University. College Station. Texas, 1997.

BOUGUERRA, A. Temperature and moisture dependence on the thermal conductivity of wood-cement-based composite: experimental and theoretical analysis. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v.32, n.21, 1999.

CABRAL, C. P. T.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S.; SOARES, C. P. B.; CARVALHO, A. M. M. L. Propriedades de chapas tipo osb, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v.30, n.4, Viçosa, 2006.

CALMON, J.L.; SILVA, C.J.; MIRAMBELL, E. Análise térmica bidimensional em regime transiente pelo método dos elementos finitos. Aplicação as estruturas de concreto de alto desempenho. **IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto** São Paulo, 2000.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. CUB Médio Brasil - **Custo Unitário Básico de Construção por m²**. CBIC, 2016.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **PIB Brasil e Construção Civil**. CBIC, 2016.

CASTRO, R. C. M.; FREITAS, A. M. S. **Steel Framing: Arquitetura**. Instituto Brasileiro de siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006.

CHEN, J.; YOUNG, B. Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, v. 45, p. 96-110. **Elsevier**, 2007.

CHEN, W. JIHONG, Y.; BAY, Y.; XIAO-LING, Z. Full-scale fire experiments on load-bearing cold-formed steel walls lined with different panels. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 79, p. 242-254, 2012.

CHEN, W. JIHONG, Y.; BAY, Y.; XIAO-LING, Z. Improved fire resistant performance of load bearing cold-formed steel interior and exterior wall systems. *Thin-Walled Structures*, v.73, p. 145-157, **Elsevier**, 2013.

CLANCY, P. Advances in Modelling Heat Transfer Through Wood Framed Walls in Fire. **Fire and Materials**, v. 25, p. 241-254, 2002.

CONDEIXA, K.M.S.P. **Comparação entre materiais da construção civil através da avaliação do ciclo de vida: sistema drywall e alvenaria de vedação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Fluminense, 2013.

COOK, R. D. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4. ed. John Wiley & Sons, 2001.

COOPER, L.Y. **The Thermal Response of Gypsum-Panel/Steel Stud Wall Systems Exposed to Fire Environments—A Simulation for the use in Zone- Type Fire Models**. NIST Report NISTIR6027, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 1997.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR. **NT08**. Goiânia, 2014.

COSTA, C. N. SILVA, V. P. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Brasília, 2002.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de Elementos de Concreto Armado em Situação de Incêndio**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2008.

CZAJKOWSKI, L.; OLEK, W.; WERES, J.; GUZENDA, R. Thermal properties of wood-based panels: specific heat determination. **Wood Science and Technology**, v. 50, p -537-545, 2016.

DECORLIT. **Placa cimentícia prensada e impermeabilizada**. Manual Técnico 2015.

ETERNIT. **Eterplac Standart**. Catálogo Técnico, 2014.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire Design.** 2005.

EUROPEAN PANEL FEDERATION (EPF). **Technical information - OSB (oriented strand board).** 2001.

FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Thermal performance of cold-formed thinwalled steel panel systems in fire. **Fire Safety Journal**, v.38, p. 365-394, 2003a.

FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Axial strength of cold-formed thin-walled steel channels under non-uniform temperatures in fire. **Fire Safety Journal**, v.38, p. 679-707, 2003b.

GERLICH J. T.; COLLIER P. C. R. ; BUCHANAN A. H. Design of steel-framed walls for fire resistance. **Fire and Materials**. V.20, p. 79-96, 1996.

GUNALAN, S.; KOLARKAR, P.; MAHENDRAN, M. Experimental study of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions. **Thin-Walled Structures**, v.65, p. 72-92, 2013.

GUNALAN, S.; MAHENDRAN, M. Finite element modeling of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions. **Engineering Structures**, v.56, p. 1007-1027, 2013.

HENDERSON, J. B. A method for the determination of the specific heat and heat of decomposition of composite materials. **Thermochimica Acta**, v.57, p. 161-171, 1982.

HOFMANN, A.; MUEHLNIKEL, R. Experimental and numerical investigation of fire development in a real fire in a five-storey apartment building. **Fire and Materials**, v. 35, p. 453-462, 2010.

INTERNATIONAL STANDART. **ISO 834-1:1999/Amd.1:2012: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirement**, 2012.

ISOVER SAINT-GOBAIN. **Ficha de informação de segurança de produto químico**. Santo Amaro – SP, 2012.

JONES, B. H. **Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires**. Fire Engineering Research Report, University of Canterbury. New Zealand, 2001.

KAEFER, E. A. C.; SILVA, V. P. **Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1**. XXIV Iberian latin-american congress on computational methods in engeneering - CILAMCE. Ouro Preto, 2003.

KAITILA, O. **Finite element modelling of cold-formed steel members at high temperatures**. Licentiate Thesis, Helsinki University of Technology. Finland, 2002.

KANKANAMGE, N. D.; MAHENDRAN, M. Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. **Thin-Walled Structures**, v.49, p. 26-44, Brisbane, 2011.

KEERTHAN, P.; MAHENDRAN, M. Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions. **Fire Safety Journal**, v. 52, p. 105-119, 2012.

KIMURA, E. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2009.

KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2005.

KODUR, V.K.R.; SULTAN, M. A. Factors influencing fire resistance of load-bearing steel stud walls. **Fire Technology**, v. 42, p. 5-26, 2006.

KOLARKAR, P.N. **Structural and thermal performance of cold-formed steel stud wall systems under fire conditions**. Tese de Doutorado, Queensland University of Technology, Queensland, 2010.

KONTOGEORGOS, D. A.; SEMITELOS, G. K.; MANDILARAS, L. D.; FOUNTI, M. A. Experimental investigation of the fire resistance of multi-layer drywall systems incorporating Vacuum Insulation Panels and Phase Change Materials. **Fire SafetyJournal**, v. 81, p. 8-16, 2016.

KREITH, F. **Princípios da transferência de calor**. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2003.

KRONO France. **Kronoply – Placas OSB**. Sully-sur-Loire, 2002.

KRÜGER, E. L.; ADRIAZOLA, M. K.O.; SUZUKI, E. V. **Medições de fluxo de calor em painéis de madeira empregados em protótipos para vedação de paredes**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Fortaleza, 2008.

KRÜGER, E. L.; ADRIAZOLA, M.; MATOSKI A.; IWAKIRI, S. Thermal analysis of wood–cement panels: Heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2299- 2305, 2009.

LEROY MERLIN. **Como colocar chapas de gesso (drywall)**. Disponível em: <<http://www.leroymerlin.com.br/faca-voce-mesmo/como-colocar-chapas-de-gesso-drywall>> Acesso em: 19 mai. 2016.

LEVINSON, R.; DELP, W. W.; DICKERHOFF, D.; MODERA, M. **Effects of airflow infiltration on the thermal performance of internally insulated ducts**. *Energy and Buildings*, v.32, p.345-354, 2000.

LIMA, L. F. **Processo AQUA de certificação de edificações sustentáveis na fase de operação e uso: Estudo de caso do escritório verde da UTFPR**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MANZELLO, S. L.; PARK, S. H.; CLEARY, T. G. Investigation on the ability of glowing firebrands deposited within crevices to ignite common building materials. **Fire Safety Journal**, v.44, p. 894-900, 2009.

MEDEIROS, J. S.; MELLO, M. B.; ROGGERO, M. V. V.; PIMENTA SEGUNDO, M. J. PIETRANTONIO, V. B. **Tecnologias de vedação e revestimento para fachadas**. Manual de construção em aço. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2014.

MEHAFFEY, J. R.; CUERRIER, P.; CARISSE, G. A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire. **Fire Mater**, v.18, p. 297-305, 1994.

MORENO JUNIOR, A. L.; MOLINA, J. C. Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001. **Ambiente Construído**.v.12, n.4, p.37-53, Porto Alegre, 2012.

MOSLEMI, A. A. Emerging Technologies in Mineral-Bonded Wood and Fiber Composites. **Kluwer Academic Publishers**, v.6, p.161-179, 1999.

MOURA, M. C. S. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poli(tereftalato de etileno) reciclado (PET reciclado) com flocos de vidro**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

NASSIF, A.Y.; YOSHITAKE, I.; ALLAM, A. Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls. **Construction and Building Materials**, v.59, p. 51-61, 2014.

PENNA, F. C.F. **Análise da viabilidade econômica do sistema light steel framing na execução de habitações de interesse social: uma abordagem pragmática.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

PIERIN, I.; SILVA, V. P. Projeto de lajes mistas nervuradas de concreto em incêndio. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.7, n.2, p.193-207, 2014.

PIERIN, I.; SILVA, V. P.; LA ROVERE, H. L. Análise térmica de estruturas bidimensionais em situação de incêndio. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n.1, 2015.

PITANGA, M. A. **Análise térmica de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

PRECON GOIÁS. **Placa cimentícia.** Catálogo técnico. Anápolis, 2014.

PREVIDELLI, A. **Os maiores incêndios do Brasil antes de Santa Maria.** Disponível em: <http://exame.abril.com.br/brasil/noticias/os-maiores-incendios-no-brasil>
Acesso em: 24 de abr. de 2016.

RAHMANIAN, I. ; WANG, Y. Thermal conductivity of gypsum at high temperatures- A Combined Experimental and Numerical Approach. **Acta polytechnica, Journal of Advanced Engineering**, v.49, n.1, 2009.

REGOBELLO, R. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio.** São Carlos. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

RESENDE, P. T. V.; SOUZA, P. R. **Carência de profissionais: um desafio para as grandes empresas brasileiras.** FDC Executive, Nova Lima, 2014.

RIBAS, R. A. J. **Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

RIBEIRO, R. S. **Avaliação do desempenho acústico de um sistema de construção modular: estudo de caso.** Dissertação de mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

ROBERTS, B. C.; WEBBER, M. E.; EZEKOYE, O. A. Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 358-367, 2015.

RODRIGUES, F. C. **Steel framing: Engenharia.** Manual de construção em aço. Instituto Brasileiro de Siderurgia Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2006.

SAGON do Brasil. **Ficha técnica de produto: Lã de Pet Sagon ECO PET 90.** Taquari – RS.

SAINT-GOBAIN. **Guia de sistema para produtos planos.** Brasilit. 2011.

SAKUMOTO Y.; HIRAKAWA, T.; MASUDA, H.; NAKAMURA, K.. Fire resistance of walls and floors using light-gauge steel shapes. **Journal of Structural Engineering**, v.129, 2003.

SANTOS, R. E. **A armação do concreto no brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia.** Tese de doutorado– Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

SILVA, F. B. Sistema construtivo a seco - Light Steel Frame. **Techné Sistemas Construtivos**, ed.195, 2013.

SILVA, V. P. **Segurança contra incêndio em edifícios: considerações para o projeto de arquitetura.** Ed.Blucher. São Paulo, 2014.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 44-53, 2012.

SOUZA, A. M. **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de Pinus com inclusão de telas metálicas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. São Carlos, 2012.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 1391**. Methods for tensile testing of metal. Sydney, 1991.

SULTAN, M. A. A model for Predicting Heat Transfer Through Noninsulated Steel-Stud Gypsum Board Wall assemblies Exposed to Fire. **Fire Technology**, v. 32, p. 239-259, Third Quarter, 1996.

SUSANTI, L.; HOMMA, H.; MATSUMOTO, H. A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 211- 218, 2011.

SUZUKI, E. V.; KRÜGER, E. L. Simulação do desempenho térmico de painéis de madeira em situação de verão. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia e Ambiente Construído**. Canela, 2010.

TENWOLDE, A.; MCNATT, J. D. ; KRAHN, L. **Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings**. Oak ridge national laboratory, United States Department of Energy. Springfield, 1988.

THANASOULAS, I. D.; VARDAKOULIAS, I.; KOLAITIS, D. I.; FOUNTI, M. A. Thermal and mechanical computational study of load-bearing cold-formed steel drywall systems exposed to fire. **Fire Tecnology**. V. 52, New York, 2016.

THOMAS, G. C. Modelling thermal performance of gypsum plasterboard-lined light timber frame walls using SAFIR and TASEF. **Fire Mater**, v.34, p. 385-406, 2010.

THOMAS, G. C. **Fire resistance of light timber framed walls and floors**. Licentiate Thesis, University of Canterbury. Canterbury, 1996.

WAKILI, K. G.; HUGI, E.; WULLSCHLEGER, L.; FRANK, T. H. Gypsum Board in Fire - Modelling and Experimental Validation. **Journal of Fire Sciences**, v.25, 2007.

WANG, Y. C. **Steel and Composite Structures – Behaviour and Design for Fire Safety**. Spon Press. London, 2002.

WANG, L. CHEN, S. S.; TSANG, D. C. W.; POON, C. S.; SHIH, K. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 316-325, 2016.

WEI, C.; JIHONG, Y. Mechanical properties of G550 cold-formed steel under transient and steady state conditions. **Journal of Constructional Steel Research**. V.73, p. 1-11, 2012.

WOOD PANEL INDUSTRY FEDERATION (WPIF). **Panel Guide**. Grantham, 2014. XU, Y. **Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement**. Cement and Concrete Research, 2000.

YU, W.W.; LABOUBE, R.A. **Cold-formed Steel Design**. 4.ed. New York: John Wiley, 2010.