



# **RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES NÃO PORTANTES DE AÇO LEVE CONSIDERANDO REGIÕES SÓLIDAS E FLUIDAS**

**Stephan Graciano da Cruz Gomes**

Relatório final da Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

**2025**





# **RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES NÃO PORTANTES DE AÇO LEVE CONSIDERANDO REGIÕES SÓLIDAS E FLUIDAS**

**Stephan Graciano da Cruz Gomes**

Relatório final da Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Supervisor:

**Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto (IPB)**

2025

## **Abstract**

With the growing demand for faster and more cost-effective construction solutions, it is necessary to evaluate the performance of these structures in terms of safety, particularly regarding their resistance to fire propagation. Several studies have been conducted to provide a better understanding of the phenomena occurring in LSF walls exposed to fire. These investigations are based on experimental tests and computational analyses, assessing fire insulation performance, integrity, and fire resistance ratings.

This research numerically investigates, in two dimensions, the behavior of LSF walls when exposed to fire and proposes a simplified method to determine the fire insulation of LSF walls. It comparatively evaluates the experimental results of three distinct numerical models against the experimental results and compares the accuracy of the three models by calculating the relative error. To gain a better understanding of the influence of structural configuration on fire resistance time, a parametric study is carried out by varying the type of gypsum, as well as the number and thickness of the boards used.

The numerical validation of the three numerical models and the parametric analysis are performed using ANSYS software. The results provide a precise comparison between the experimental tests and numerical simulations, demonstrating the reliability of computational simulations as an alternative solution to experimental tests, which are more costly.

Finally, a new proposal is presented, based on the Additive Components Method, to determine the insulation fire resistance time of LSF walls.

**Key words:** Fire resistance; LSF walls; 2D numerical simulations.



## **Resumo**

Com a crescente procura por soluções construtivas mais rápidas e com menos custos, é necessário avaliar o desempenho destas estruturas em contexto de segurança, nomeadamente na resistência que oferecem a propagação do fogo. Vários estudos têm sido realizados para oferecer uma melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem nas paredes LSF expostas ao fogo. Estas investigações assentam-se em ensaios experimentais e análises computacional, avaliando o desempenho de isolamento ao fogo, estanquidade e classificações de resistência ao fogo.

Esta investigação estuda numericamente, em duas dimensões, o comportamento de paredes LSF quando expostos ao fogo, e apresenta uma proposta do método simplificado para determinação do isolamento ao fogo em paredes LSF. Avalia comparativamente os resultados numéricos de quatro modelos distintos, com os resultados experimentais e, compara por meio do cálculo do erro relativo a precisão de três métodos diferentes. Para uma melhor compreensão da influência da estrutura no tempo de resistência ao fogo por isolamento, é feito um estudo paramétrico com variação do tipo de gesso, da quantidade e da espessura das placas usadas.

A validação numérica dos quatro modelos e a análise paramétrica é feita através do software ANSYS. Os resultados apresentam uma comparação precisa entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas, demonstrando a confiabilidade das simulações computacionais, sendo uma solução alternativa para ensaios experimentais que tem um custo maior.

É apresentada uma nova proposta, baseada no Método dos Componentes Aditivos para determinar o tempo de resistência ao fogo de paredes LSF.

Palavras-chave: Resistência ao fogo, Paredes LSF, Simulações numéricas 2D.



## Índice

Abstract .....	i
Resumo.....	iii
1. Introdução.....	1
1.1. Estado da arte .....	2
2. Materiais e Métodos.....	8
2.1. Materiais .....	8
2.2. Métodos numéricos .....	8
3. Simulação Numérica.....	13
3.1. Propriedade dos Materiais das Paredes LSF .....	13
3.2. Modelos numéricos bidimensionais .....	15
3.3. Condições de fronteira aplicadas aos modelos bidimensionais .....	16
3.4. Estrutura das malhas bidimensionais.....	17
4. Validação numérica bidimensional .....	19
4.1. Validação numérica do Modelo 1 .....	20
4.2. Validação numérica do Modelo 2 .....	23
4.3. Validação numérica do Modelo 3 .....	26
4.4. Validação numérica do Modelo 4.....	29
5. Estudos paramétricos bidimensionais .....	32
6. Método simplificado de cálculo .....	36
6.1. Tempo de proteção.....	37
6.2. Tempo de isolamento .....	38
6.3. Resultados do método simplificado.....	39
7. Conclusões .....	41
Referências .....	42
Anexos.....	44
Anexo 1 – Método simplificado nos modelos A e I.....	45

Anexo 2 – Método simplificado nos modelos C e K.....	47
Anexo 3 – Método simplificado nos modelos E e M.....	49
Anexo 4 – Método simplificado nos modelos G e O.....	51

## Índice de Figuras

Figura 1 - Método de solução 1 .....	9
Figura 2 - Método de solução 2 .....	10
Figura 3 - Método de solução 3 .....	10
Figura 4 - Propriedades térmicas do aço .....	14
Figura 5 - Propriedades térmicas do gesso .....	14
Figura 6 - Propriedades do ar .....	14
Figura 7 - Modelo 1 (Parede com uma placas de gesso, montantes C e cavidade vazia). ...	15
Figura 8 - Modelo 2 (Parede com duas placas de gesso, montantes C e cavidade vazia)....	15
Figura 9 - Modelo 3 (Parede com montantes $\Sigma$ com cavidade vazia).....	16
Figura 10 - Modelo 4 (Parede com montantes $\Sigma$ e lã de rocha na cavidade). .....	16
Figura 11 - Malhas bidimensionais dos modelos FVM para paredes LSF.....	17
Figura 12- Malhas bidimensionais dos modelos FEM para paredes LSF.....	18
Figura 13 - Malhas bidimensionais dos modelos H-FEM para paredes LSF.....	18
Figura 14 - Malha bidimensional do modelo FEM para o Modelo 4 com isolamento na cavidade.....	18
Figura 15 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 1.....	21
Figura 16 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 2.....	21
Figura 17 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 3.....	21
Figura 18 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 1.....	24
Figura 19 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 2.....	24
Figura 20 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 3.....	24
Figura 21- Resultados do Modelo 3 aplicando o método 1.....	27
Figura 22 - Resultados do Modelo o 3 aplicando o método 2.....	27
Figura 23 - Resultados do Modelo 3 aplicando o método 3.....	27
Figura 24- Resultados do Modelo 4 aplicando o método 1.....	30
Figura 25 - Resultados do Modelo 4 aplicando o método 2.....	30
Figura 26 - Resultados paramétricos para testes com montantes tipo C e gessos tipo F e tipo X.....	33
Figura 27 - Resultados paramétricos para testes com montantes tipo $\Sigma$ e gessos tipo F e tipo X.....	34
Figura 28 - Resistência ao fogo dos diferentes tipos de gesso .....	35
Figura 29 - Camadas da parede LSF.....	36

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 1.....	21
Tabela 2 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 2.....	22
Tabela 3 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 3.....	22
Tabela 4 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 1 .....	22
Tabela 5 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 1.....	25
Tabela 6 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 2.....	25
Tabela 7 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 3.....	25
Tabela 8 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 2 .....	26
Tabela 9 - RSME Modelo 3 aplicando o método 1.....	28
Tabela 10 - RSME Modelo 3 aplicando o método 2.....	28
Tabela 11 - RSME Modelo 3 aplicando o método 3.....	28
Tabela 12 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 3 .....	29
Tabela 13 - RSME Modelo 4 aplicando o método 1.....	30
Tabela 14 - RSME Modelo 4 aplicando o método 2.....	31
Tabela 15 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 4 .....	31
Tabela 16 – Modelos usados no estudo paramétrico .....	32
Tabela 17 - Resistência ao fogo obtido nos estudos paramétricos.....	34
Tabela 18 - Validação do método simplificado.....	40

## 1. Introdução

As paredes em *Light Steel Framing* (LSF) atualmente são amplamente utilizadas na construção devido à sua elevada relação resistência-peso, rapidez de execução e versatilidade construtiva. Estas paredes podem ter a cavidade vazia ou ser preenchidas por um material de isolamento que reforçam o isolamento que estes oferecem ao fogo. No entanto, a presença de cavidades vazias pode conduzir a um comportamento ao fogo distinto, que necessita de ser devidamente avaliado de forma a garantir níveis adequados de segurança contra incêndio.

A modelação térmica constitui uma ferramenta fundamental para a análise do comportamento das paredes LSF com cavidades vazias em situação de incêndio. Estes modelos permitem simular a propagação do calor no interior da cavidade e nos elementos estruturais, possibilitando a identificação de potenciais riscos e a otimização do projeto com vista à mitigação desses efeitos. Paralelamente, os ensaios experimentais de resistência ao fogo são amplamente utilizados para avaliar o desempenho das paredes LSF, sendo geralmente realizada a exposição de um dos lados do sistema a um incêndio padrão. O desempenho é avaliado com base nos critérios de estabilidade estrutural (R), integridade (E) e isolamento térmico (I).

Apesar da existência destas técnicas de projeto e avaliação, a análise do comportamento do fogo na região da cavidade apresenta desafios significativos. Um dos principais problemas encontra-se na dificuldade em prever o comportamento térmico e fluido dinâmico no interior da cavidade. A complexidade dos fenómenos que ocorrem no interior da cavidade envolve a transferência de calor, a circulação de gases quentes e a interação entre os materiais, tornando a modelação numérica particularmente exigente.

Métodos computacionais e simulações numéricas são amplamente utilizados para prever o desempenho ao fogo das paredes LSF e para validar estudos experimentais desenvolvidos. Os erros entre os resultados numéricos e experimentais são geralmente atribuídas a fatores como simplificações do modelo, limitações das abordagens numéricas e variabilidades experimentais. Para reduzir estas diferenças, podem ser aplicadas técnicas como a validação sistemática dos modelos, análises de sensibilidade e a combinação de diferentes estratégias de modelação.

O principal objetivo desta investigação consiste em estudar o efeito provocado pelo fogo em paredes LSF através de análises baseadas nos métodos dos elementos finitos, métodos dos volumes finitos e no método híbrido, com o desenvolvimento de modelos numéricos precisos fundamentados na análise térmica com interação ar estrutura. Pretende-

se, ainda, comparar os resultados numéricos obtidos com dados experimentais, comparar os métodos aplicados e realizar estudos paramétricos. Adicionalmente, esta investigação propõe o desenvolvimento de um modelo simplificado para a determinação da resistência ao fogo por isolamento.

A presente tese encontra-se organizada em sete capítulos, sendo que no primeiro capítulo é apresentado o estado da arte, no segundo capítulo os materiais e os métodos utilizados. No terceiro capítulo são apresentados os modelos numéricos e as condições de fronteira. No quarto capítulo é apresentada a validação computacional dos modelos desenvolvidos. No quinto capítulo é apresentado um estudo paramétrico que avalia a influência do tipo de gesso e da espessura das placas de gesso. No sexto capítulo é introduzido o método simplificado de cálculo proposto para a determinação da resistência ao fogo por isolamento. Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões da investigação.

### **1.1. Estado da arte**

Muitos estudos numéricos têm sido utilizados para estudar o comportamento ao fogo de paredes LSF e evitar condições de ensaios experimentais dispendiosas. Estas simulações também são usadas para análises paramétricas com o objetivo de encontrar o efeito dos parâmetros de projeto.

Em 1996, Mohamed Sultan [1] apresentou os resultados determinados pelo método de diferenças finitas unidimensional desenvolvido para determinar a temperatura dos componentes das paredes LSF e comparou os valores obtidos com os resultados experimentais. O modelo considera a convecção e a radiação das duas camadas de gesso que enfrentam a região da cavidade, mas não considera o calor por radiação dos elementos de aço para a superfície do gesso. De acordo com este autor, o efeito do elemento de aço na transferência de calor através das camadas de gesso pode ser considerado insignificante. Esta omissão pode justificar a diferença entre os resultados experimentais e as previsões do modelo. Este modelo apresenta classificações de resistência ao fogo conservadoras quando comparado com os resultados experimentais. Esta investigação também apresenta as propriedades térmicas e físicas do gesso tipo X.

Geoff Thomas [2] em 2002, estudou o efeito das propriedades térmicas em placas de gesso a temperaturas elevadas e desenvolveu um modelo térmico de elementos finitos para paredes LTF. As propriedades térmicas foram ajustadas para imitar eventos físicos, como

ablação e fissuras, e foram modificadas para evitar instabilidades numéricas. O modelo apresentou resultados conservadores quando comparado com medições experimentais.

As propriedades térmicas foram consideradas como efetivas e assumidas como adequadas para uso nos métodos de elementos finitos. C. Ang e Y. Wang em 2004 [3] investigaram o efeito do movimento de umidade nas camadas de gesso, com base em transferência de calor e massa. Os autores decidiram usar um calor específico equivalente (efetivo), superior ao calor latente da evaporação da água, para evitar a análise de massa e usar apenas na análise térmica da região sólida, sem considerar explicitamente o movimento de umidade.

Keerthan P. e Mahendran M. em 2012 [4] estudaram o desempenho ao fogo de múltiplas camadas de placas de gesso (sem modelar o sistema LSF) usando o software SAFIR e alguns testes experimentais anteriores para validar os resultados. Este estudo foi desenvolvido com espécimes de escala reduzida para testar o desempenho térmico sob fogo usando diferentes propriedades térmicas do gesso. Esta investigação destaca o risco de ignorar o processo de evaporação do material de gesso. Para reduzir este risco, os autores usaram o calor específico definido pela equação de entalpia. O SAFIR também usa propriedades térmicas efetivas e não consegue modelar a ablação. Novas equações simplificadas foram propostas para prever a evolução da temperatura no lado não exposto das camadas de gesso ao usar espessuras variáveis. Esta investigação também estudou o efeito de uma cavidade vazia de 16 mm entre duas placas de gesso (13 mm), assumindo o fluxo de calor apenas por radiação entre as duas placas de gesso, e concluiu que o efeito da cavidade poderia ser negligenciável quando comparado com a solução de ambas as placas de gesso sem a região da cavidade. Ignorar o fluxo de calor por convecção fará aumentar a temperatura das placas de gesso menos expostas que enfrentam a cavidade.

Keerthan e Mahendran em 2013 [5] simularam os painéis compostos usando o SAFIR. Estes autores discutiram a necessidade de usar propriedades térmicas efetivas, especialmente no caso de softwares que não permitem a possibilidade de eliminar elementos para ablação ou de considerar o movimento da umidade dentro das camadas de gesso. Estes autores identificaram novamente o risco de ignorar o processo de evaporação durante a simulação, quando não se usa o calor específico definido pela equação da entalpia.

Gunalan e Mahendran, em 2013 [6] desenvolveram ensaios experimentais e estudos numéricos com carga para provar que preencher a região da cavidade com material isolante reduz a resistência ao fogo R (capacidade de carga). Alternativamente, o uso de camadas compostas com material isolante entre as placas de gesso, assumindo uma cavidade vazia,

aumentou o desempenho da resistência ao fogo por isolamento e capacidade de carga. Estes investigadores usaram software de elementos finitos para simular o desempenho estrutural das paredes LSF, utilizando evoluções de temperatura dos experimentos. O modelo foi capaz de prever a resistência ao fogo dentro de uma tolerância de 5 minutos. Estes autores não realizaram nenhuma análise térmica individual de elemento ou da parede como um conjunto, em vez disso, simplificaram a distribuição de temperatura não uniforme, usando temperaturas lineares e multilinhas através da alma do elemento de aço, com base em medições de temperatura.

Rusthi *et al.* em 2015 [7] usaram o modelo 3D de elementos finitos, aplicando apenas radiação dentro da região da cavidade. As propriedades térmicas do gesso foram consideradas como efetivas, sendo parte delas, para alguns níveis de temperatura, determinadas a partir de medições experimentais. O modelo térmico 3D ABAQUS foi validado com experimentos desenvolvidos em 2010, mas nenhuma informação sobre erro foi fornecida. Estes autores também desenvolveram simulações numéricas com outros sistemas de revestimento, como placas de óxido de magnésio, placas de fibra de cimento e placas de perlita.

Jonathan Vallée [8] em 2016 desenvolveu modelos térmicos 3D ABAQUS usando radiação e condução na região da cavidade. O autor comparou apenas a resistência ao fogo, usando o erro relativo, e encontrou diferenças entre os resultados numéricos e experimentais, variando de 6% a 28%. Este estudo não comparou os resultados ao longo do tempo. Os autores também analisaram o impacto de imperfeições (pequenos buracos) na superfície exposta e concluíram que a resistência ao fogo poderia diminuir em 20% quando o diâmetro das imperfeições (buraco) aumentasse 5 vezes.

Tao *et al.* [9] em 2021 também fizeram simulações numéricas usando ANSYS para validar os testes desenvolvidos com elementos ocos de parede fina SHS. Os autores fizeram ajustes na condutividade térmica para incluir a ablação potencial nas camadas de gesso e aerogel. Estes autores usaram modelos 3D de elementos finitos, baseados em elementos finitos de casca e sólidos. O modelo usou radiação térmica dentro da seção oca com emissividade dependente da temperatura e emissividades constantes para as regiões da cavidade. Este comportamento diferenciado não é explicado pelos autores. O efeito térmico dos parafusos também foi negligenciado, mas normalmente é um efeito muito pequeno. De acordo com os autores, foram feitos alguns ajustes para garantir que os resultados da modelação se ajustassem melhor aos resultados experimentais. O gesso foi modelado com “uma reação apenas” ou dois processos consecutivos de desidratação sobrepostos por

temperatura (evaporação de água livre) que normalmente ocorrem entre 80 °C e 250 °C, e a condutividade térmica foi altamente modificada a temperaturas elevadas (ablação). Estes autores também encontraram uma evolução de temperatura similar para a mesma configuração de parede LSF, ao testar amostras de escala reduzida e de escala real.

Tao *et al.* [10] em 2021, realizaram a validação de modelos numéricos usando paredes LSF feitas com elementos de aço oco enformados a frio, destacando a vantagem de usar esses tipos de seção transversal sem material isolante na cavidade, e usando o material isolante numa solução externa composta. A simulação térmica foi desenvolvida usando ANSYS e a transferência de calor na região da cavidade foi feita apenas por radiação, usando emissividade constante para radiação na região da cavidade e assumindo emissividade dependente da temperatura para as seções ocas. Os efeitos da queda localizada de placas de gesso não foram incluídos na simulação devido à sua imprevisibilidade. Os resultados numéricos foram razoavelmente compatíveis com os resultados experimentais. Foram testadas técnicas especiais de modelação para explorar os efeitos da queda localizada de gesso na parede, usando áreas quadradas bem definidas para avaliar o efeito de ponto quente no desempenho ao fogo.

Samiee *et al.* [11] em 2022, realizaram uma investigação numérica 3D usando ABAQUS para investigar o efeito do revestimento de placas de aço e sua posição, bem como o efeito de tiras de gesso próximas dos elementos (montantes). A análise térmica na região da cavidade considerou apenas radiação, e os autores negligenciaram a convecção devido ao fluxo de ar ser considerado muito limitado dentro da cavidade da parede. A placa de aço não modificou a temperatura da flange quente (HF) dos elementos, mas a posição interna reduziu a temperatura da flange fria (CF). Essa posição é responsável pelo aumento do gradiente de temperatura na seção transversal da viga. Os autores também observaram que aumentar a profundidade da alma do elemento (montante) diminui a temperatura no lado não exposto, levando a um aumento na resistência ao fogo do isolamento (I). As tiras extras de gesso têm um efeito positivo, atuando como isolamento térmico adicional na temperatura dos elementos verticais, tornando-se muito úteis quando sobrepostas às juntas das placas de gesso. O uso de tiras de gesso pode evitar um aumento súbito na temperatura do banzo quente dos elementos (montantes) (HF). A modelação da região da cavidade foi desenvolvida com transferência de calor por radiação apenas.

Upasiri *et al.* [12] em 2022, realizaram simulações numéricas 2D e 3D usando ABAQUS para testar materiais de isolamento à base de betão colocados na região da cavidade, comparando betão areado autoclavado e espuma de betão. A evolução da

temperatura foi similar, quando determinada no plano central da parede. Os resultados numéricos foram comparados com paredes LSF padrão sem e com materiais de isolamento na cavidade (lã de rocha), para diferentes cenários de fogo padrão. A resistência ao fogo (I) aumentou com a cavidade preenchida com lã de rocha e ainda mais com espuma de concreto, para ambos os cenários de fogo (padrão e hidrocarbonetos). A simulação da região da cavidade foi desenvolvida apenas por radiação, porque, segundo os autores, a radiação domina sobre a condução e a convecção. Um maior valor do coeficiente de convecção foi aplicado na superfície não exposta quando comparado com o EN1991-1-2, ao usar ambos os modos de transferência de calor (radiação e convecção).

Perera *et al.* [13] em 2022, realizaram uma investigação numérica usando ABAQUS, com o objetivo de melhorar a resistência ao fogo das paredes LSF. O uso de tiras de bloqueio de gesso nos dois banzos dos elementos verticais (montantes) (HF e CF) e o uso de isolamento de cavidade descontínuo com lã de rocha (sem tocar nos elementos de aço), melhorou a resistência ao fogo do isolamento. Os autores usaram apenas radiação para modelar o comportamento térmico da região da cavidade, negligenciando a convecção.

Peiris e Mahendran [14] em 2023, realizaram uma investigação numérica para analisarem o desempenho térmico e estrutural de paredes LSF, considerando diferentes níveis de carga, espessuras e configurações dos montantes, graus de restrição e tipos de revestimento. Os resultados deste estudo evidenciam que a interação entre as ações de compressão e flexão reduz de forma significativa a capacidade de resistência e a estabilidade das paredes durante o tempo de exposição ao fogo. A validação dos modelos numéricos com resultados experimentais demonstrou boa concordância, confirmando a eficácia das análises numéricas para prever o desempenho ao fogo de paredes LSF sob condições de carregamento combinadas. O estudo destaca a importância de considerar os efeitos interativos de compressão e flexão em situações de fogo, contribuindo para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento mais rigorosos, realistas e seguros para paredes LSF resistentes ao fogo.

Tung Vy e Tuan Vu [15] em 2025, realizaram um estudo do comportamento da resistência ao fogo e os níveis de resistência ao fogo (FRLs) de paredes LSF com ênfase no alongamento térmico restrito. Os autores por meio de análises numéricas de elementos finitos térmicas e estruturais acopladas, concluíram que as cargas de compressão geradas pelo fogo e pela restrição ao alongamento térmico provocam colapsos prematuros dos montantes, reduzindo os níveis de resistência ao fogo. A investigação propõe uma equação

simplificada para o dimensionamento e fornece recomendações práticas para uso em projetos de paredes LSF não portantes.

## **2. Materiais e Métodos**

Neste capítulo são apresentados os materiais usados para criação dos modelos, apresentando os artigos selecionados que foram usados como base para a realização dos estudos, e os softwares usados na criação dos modelos e nas simulações. Apresentam-se também os métodos que foram aplicados para simular o comportamento do fogo nas paredes LSF.

### **2.1. Materiais**

Para estudar numericamente a resistência que as paredes LSF oferecem na propagação do fogo foram selecionados dois artigos de referência com modelos distintos. O artigo publicado em 2012, desenvolvido por Kolarkar e Mahendran [16], que aborda os ensaios experimentais realizados a uma parede LSF com montantes do tipo C e placas de gesso tipo F de 16mm. O segundo artigo desenvolvido por Dias *et al.* [15] publicado em 2018 e que apresenta ensaios experimentais realizados numa parede LSF com montantes do tipo sigma e gesso resistente ao fogo de 16mm. Os estudos foram realizados com base no incêndio padrão ISO834-1 [17]. Alguns modelos foram estudados com base na norma AS1530.4 [18] que tem a mesma curva do fogo que a norma ISO834-1[17].

Para realização dos estudos numéricos recorreu-se ao uso do programa de modelação Solidworks para definição geométrica das estruturas bidimensionais e o programa Ansys para realização das simulações. Estes programas permitiram ter modelos muito próximos das estruturas analisadas fisicamente nos ensaios experimentais e simular a evolução da temperatura ao longo do tempo, tendo assim um meio de realizar estudos não destrutivos apresentado resultados muito próximos dos reais.

### **2.2. Métodos numéricos**

Para simular o comportamento e a evolução que a temperatura apresenta nos elementos que compõem a parede em função do tempo, foram usados três métodos numéricos distintos. Estes métodos permitiram analisar a resistência que as paredes LSF oferecem a propagação do fogo.

O método dos volumes finitos (FVM) foi o primeiro método de solução aplicado. Com interação térmica para ambas as partes sólidas e fluidos, esse método considera fluxo laminar e é baseado na variação da densidade. O movimento do fluido é induzido pela transferência de calor, e a solução é transitória e não linear. O método de solução baseado em densidade resolve simultaneamente as equações de continuidade, momento e energia. A

pressão é obtida através da equação de estado. As equações utilizadas para escalares adicionais são resolvidas posteriormente e sequencialmente (radiação). O tempo de integração para cada passo de tempo foi de 60 segundos, com a possibilidade de ser reduzido para 1 segundo. O critério de convergência foi baseado nos resíduos para cada equação. O modelo numérico divide a seção transversal em células finitas. As variáveis do domínio (pressão, velocidade e temperatura) são calculadas em cada célula, ao mesmo tempo. O modelo utilizado para todos os domínios (sólido e fluido) é apresentado na Figura 1, usando o tamanho mínimo de célula igual a 0,0003 m. Este tamanho mínimo está relacionado com a pequena espessura da parte sólida dos perfis em aço.

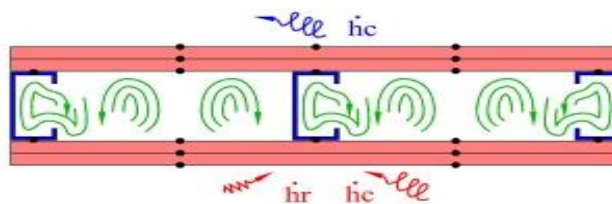


Figura 1 - Método de solução 1

O segundo método aplicado foi o método dos elementos finitos (FEM), que considera apenas a análise térmica na região sólida, assumindo contato perfeito entre os materiais. A análise térmica transitória e não-linear é resolvida, com método de solução transiente de opção completa. A equação de energia é resolvida pelo método de resíduo ponderado e pelo método Galerkin, com aplicação da formulação integral fraca. O mesmo intervalo de tempo foi utilizado para a solução incremental, considerando o critério de convergência baseado no fluxo de calor. Uma condição de contorno adicional é aplicada na região da cavidade, assumindo transferência de calor por radiação entre todas as faces internas. Esse modelo é capaz de prever a temperatura média da região da cavidade (zona de fluido), apenas realizando o equilíbrio térmico das faces internas dessa região. As análises bidimensionais foram feitas usando o elemento finito PLANE55 e SURF151, ambos disponíveis na biblioteca Ansys. O elemento PLANE55 é definido por quatro nós com um único grau de liberdade (temperatura), usa funções interpoladoras lineares e integração gaussiana completa (2x2) para definir a matriz de condutividade. O elemento finito SURF151 é sobreposto na fronteira do elemento finito PLANE55, representando um elemento de interface com gesso ou representando um elemento de interface com aço, para definir o fluxo de calor por radiação entre essa superfície de fronteira e a temperatura média nodal da cavidade. Esse elemento é definido por três nós, sendo dois nós coincidentes com a região em contato com

a cavidade e o terceiro nó para definir a evolução da temperatura média (centro geométrico da região da cavidade). As funções interpoladoras também são lineares e o número de pontos de integração é dois, ver Figura 2

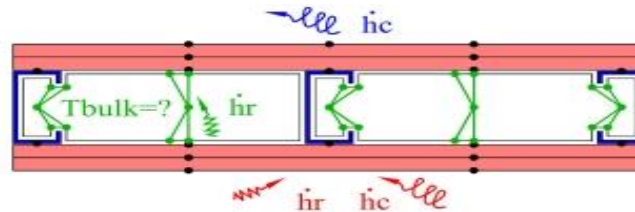


Figura 2 - Método de solução 2

O método 3, demonstrado na Figura 3, utiliza o método híbrido de elementos finitos (H-FEM) para simular a transferência de calor por radiação e convecção na região da cavidade. Esse modelo pode ser usado para determinar a resistência ao fogo de paredes de aço leve com cavidades vazias, assumindo-se que se conhece o comportamento da temperatura média na região de fluido. Essas temperaturas médias podem ser determinadas por ensaios experimentais anteriores, seja pela medição da temperatura da cavidade, seja pela temperatura média entre as faces internas em contato com a cavidade, da camada mais exposta (quente) e da camada menos exposta (fria), ou pela temperatura média do Flange Quente (HF) e do Flange Frio (CF). A principal vantagem do método de solução híbrido é que ele considera qualquer evento de temperatura na região da cavidade, seja pela presença de qualquer evento de fissura, queda, combustão ou qualquer outro tipo de liberação de calor proveniente dos materiais. Esse método de solução requer a existência de radiação e convecção dentro da região da cavidade. O coeficiente de convecção deve ser assumido como  $17 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ , a média entre a exposta ( $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) e a não exposta ( $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Essa suposição é fisicamente admissível se considerarmos que a região da cavidade é protegida na primeira parte do teste e totalmente exposta ao fogo no final do teste. As análises bidimensionais foram feitas usando apenas o elemento finito PLANE55, aplicado na região sólida, impondo a temperatura média na cavidade.

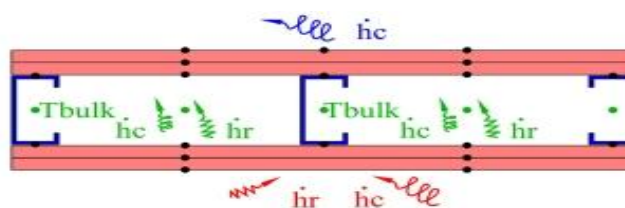


Figura 3 - Método de solução 3

Para resolução da análise térmica de regiões sólidas e fluídas, um conjunto de equações do método dos Elementos Finitos (FEM) e método dos Volumes Finitos (FVM) são utilizados.

Uma das equações resolvidas é a equação da continuidade, que expressa o princípio da conservação da massa num sistema de fluido. Esta equação garante que não há criação ou perda da massa a medida que o fluido se move através de um sistema fechado. Para um fluido compressível, a equação da continuidade é dada por Eq.1:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Em que:

- $\rho$  é a densidade do fluido,
- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  é a variação da densidade em função do tempo.
- $\vec{\nabla} = (\partial/\partial x \mid \partial/\partial y \mid \partial/\partial z)$  é o operador delta (vetor).
- $\vec{V} = (V_x \mid V_y \mid V_z)$  representa a velocidade de cada partícula.

Para obter uma descrição completa do escoamento, devem ser aplicadas, junto com a equação da continuidade as equações de Navier-Stokes. Estas equações descrevem o movimento do fluido e baseiam-se no princípio da conservação do momento linear (Segunda Lei de Newton). Constituem um conjunto das equações do momento em 3D ou 2D para qualquer fluido Newtoniano.

A equação de Navier-Stokes, Eq.2, descreve o equilíbrio na direção Y. As outras direções espaciais também se aplicam numa análise 3D, com exceção do efeito da gravidade, que pode variar consoante a direção considerada.

$$\frac{\partial(\rho V_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = (\Delta \rho + \rho_0) g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \vec{\nabla} \cdot \text{grad}(\mu_e V_y) + T_y \quad (2)$$

Onde:

- $g_y$  é aceleração da gravidade que atua na direção Y;
- $\mu_e$  é a viscosidade efetiva do fluido;
- $T_y$  refere-se aos termos de perdas viscosas;
- $p$  é a pressão;
- $\rho$  representa a massa volúmica (densidade) específica;
- $\rho_0$  corresponde à densidade de referência.

A definição de  $\rho_0$  requer uma escolha cuidadosa, sendo este tem impacto direto e significativo na taxa de convergência. Para problemas em volumes fechados, deve ser usada uma densidade que represente um valor médio típico no escoamento.

Outra equação aplicada na solução do problema é a primeira lei da termodinâmica, Eq.3 que estabelece o princípio da conservação de energia num domínio 3D ou 2D. A equação, abaixo apresentada, é fundamental para a análise térmica em sólidos e fluidos

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x C_p T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_p T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z C_p T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

### **3. Simulação Numérica**

Para realização das simulações numéricas é necessário seguir as recomendações de um conjunto de normas. Estas definem a curva do fogo e as propriedades dos materiais usados.

As normas EN1363-1 [19], ISO834-1 [17] e AS1530.4 [18], especificam os procedimentos para determinar a resistência ao fogo de vários elementos de construção. Estas normas descrevem um método de teste de fogo que é usado para avaliar a resistência que componentes de construção oferecem ao fogo, como paredes, pisos e tetos. Estas normas são amplamente utilizadas por fabricantes, projetistas e reguladores de construção com o objetivo de avaliar a resistência ao fogo de materiais e sistemas de construção. Essas normas foram adotadas por muitos países como base para regulamentações nacionais relacionadas com a segurança contra incêndios em edifícios.

A norma europeia EN1993-1-2 [20] que faz parte do euro código 3 e estabelece regras e procedimentos para projetos de estruturas de aço. Essa norma específica trata do projeto estrutural para resistência ao fogo de elementos de aço e estruturas compostas de aço e concreto. Ela descreve o comportamento do fogo em elementos estruturais, incluindo as curvas de temperatura em função do tempo, que são usadas para avaliar a resistência ao fogo de elementos estruturais de aço e aços compostos, e fornece também métodos de cálculo para determinar a resistência ao fogo de elementos de aço.

Outra norma europeia usada foi a EN1363-1 [19] que descreve o método de ensaio experimental para a determinação da resistência ao fogo de elementos construtivos, tais como paredes, pisos, portas, janelas, entre outros. Essa norma especifica um método de ensaio que simula as condições de incêndio, utilizando um forno que expõe a amostra de teste a uma curva de tempo-temperatura padronizada. A amostra de teste é então avaliada por sua capacidade de manter sua integridade estrutural, isolamento térmico e estanquidade ao fogo durante o período de exposição ao fogo.

#### **3.1. Propriedade dos Materiais das Paredes LSF**

Por ser uma alternativa muito econômica e com elevado rácio de resistência em relação ao peso próprio, a construção em LSF tem ganhado cada vez mais mercado por ser um sistema de construção leve, mais sustentáveis e versáteis com custos reduzidos no processo de edificação. Paredes LSF são paredes compostas por uma estrutura metálica composta por perfis de aço enformado a frio de pequena espessura, e revestidos com placas, que podem ser gesso outros materiais. As paredes LSF podem ter normalmente uma ou mais

camadas de gesso de cada lado, que podem ser gesso do tipo F ou gesso do tipo X. Estas paredes podem conter na cavidade diferentes tipos de perfis (abertos ou fechados). Este sistema construtivo pode ser facilmente adaptado para incluir materiais isolantes, trazendo maior durabilidade, e resistência a estrutura. Essas paredes podem apresentar uma boa resistência ao fogo quando projetadas e construídas com materiais e técnicas adequadas.

Seguindo a validação dos modelos numéricos com ensaios experimentais, todos os modelos numéricos apresentados neste documento foram realizados com os mesmos materiais. Os modelos bidimensionais de validação dos ensaios experimentais, são constituídas por montantes G500 com uma espessura de 1.15 mm e gesso do tipo F de 16 mm.

Para os estudos paramétricos, com o objetivo de comparar a resistência oferecida pelo gesso mais comumente usado nas construções, foi usado nas simulações numéricas o gesso tipo X e o gesso tipo F, variando a espessura em ambos os tipos de gesso com 12.5mm e 16mm.

As propriedades térmicas do aço, apresentados na Figura 4 foram definidas segundo a norma EN1993-1-2 [20], que especifica a emissividade do aço igual a 0.7. Para o ar, gesso tipo F e tipo X foram definidas as propriedades térmicas, apresentados nas Figura 5 e Figura 6 segundo a norma EN1995-1-2 [21].

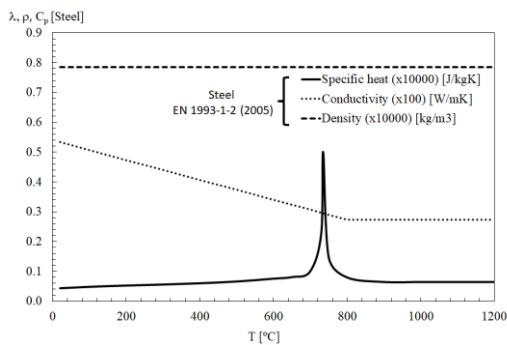


Figura 4 - Propriedades térmicas do aço

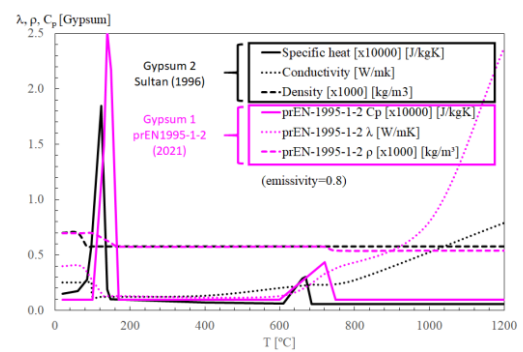


Figura 5 - Propriedades térmicas do gesso

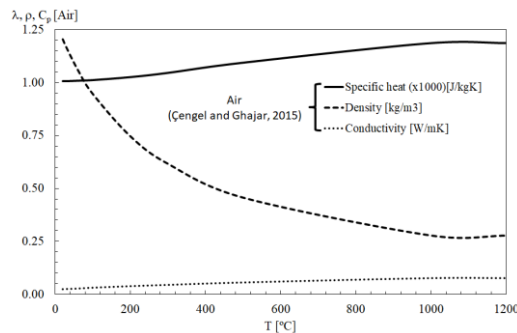


Figura 6 - Propriedades do ar

### 3.2. Modelos numéricos bidimensionais

O primeiro modelo foi baseado nos ensaios experimentais realizados em 2012 por Kolarkarn e Mahendran [14]. Neste estudo é analisada a resistência ao fogo de uma parede LSF com 1280 mm de comprimento e 1015 mm de altura, composta por placas de gesso tipo F e perfis montantes em C com um espaçamento de 500 mm entre eles. Neste estudo também são apresentados resultados experimentais realizados em paredes LSF com ar no interior da cavidade e resultados com isolamento na cavidade. Para efeitos de validação numérica, foram selecionadas as amostras 1 e 3.

Nos modelos apresentados de seguida, a localização dos termopares utilizados para a medição das temperaturas encontra-se representada por círculos a preto.

O modelo 1 referente à amostra 1, é construído por uma parede composta por três montantes de perfis “C” e gesso tipo F de 16 mm, sendo constituído por uma placa de gesso no lado exposto e uma no lado não exposto, sendo a cavidade ausente de qualquer isolamento, preenchida apenas com ar, ver Figura 7.

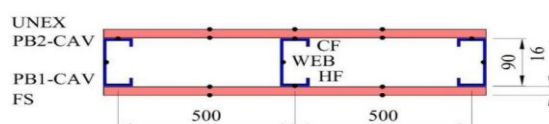


Figura 7 - Modelo 1 (Parede com uma placas de gesso, montantes C e cavidade vazia).

O Modelo 2 referente à amostra 3, é definido por uma parede composta por três montantes “C” e gesso tipo F de 16 mm, com duas placas de gesso no lado exposto e duas placas de gesso lado não exposto, totalizando uma camada de proteção de 32 mm em cada lado, com a cavidade preenchida com ar, demonstrado na Figura 8.

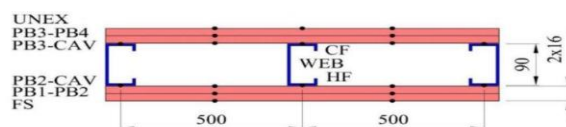


Figura 8 - Modelo 2 (Parede com duas placas de gesso, montantes C e cavidade vazia).

Os Modelos 3 e 4 foram criados com base nos estudos experimentais realizados em 2019, pelos investigadores Dias, Keerthan e Mahendran\* [15], que elabora um conjunto de ensaios experimentais em pequenas escalas de paredes LSF com gesso tipo F de 16mm e um perfil montante em “Σ”.

Este estudo originou o modelo 3, baseado na amostra 8, com 940 mm de comprimento e 1000 mm de altura, sendo composta por três montantes e gesso tipo F de 16

mm, com duas placas de gesso no lado exposto e duas placas de gesso lado não exposto, totalizando uma camada de proteção de 32mm em cada lado, com a cavidade preenchida com ar, ver Figura 9.

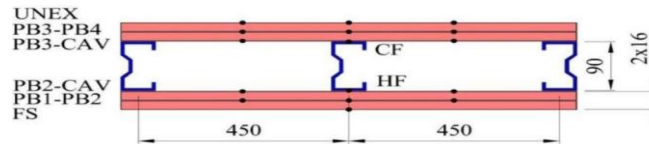


Figura 9 - Modelo 3 (Parede com montantes  $\Sigma$  com cavidade vazia).

O Modelo 4 referente à amostra 12, com 940 mm de comprimento e 1000 mm de altura, é definido por uma parede composta por três montantes “ $\Sigma$ ” e gesso tipo F de 16 mm, com duas placas de gesso no lado exposto e duas placas de gesso lado não exposto e com a cavidade preenchida com lã de rocha com densidade de  $100\text{kg/m}^3$  e espessura de 100mm, comprimidas na cavidade com profundidade de 90mm, ver Figura 10. Para este modelo, tratando-se de um modelo com a cavidade preenchida por lã de rocha, o método de solução 3 não é aplicável nos estudos numéricos.

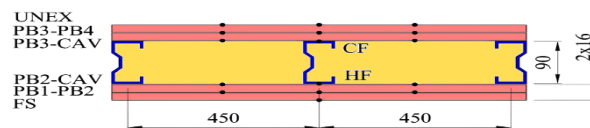


Figura 10 - Modelo 4 (Parede com montantes  $\Sigma$  e lã de rocha na cavidade).

### 3.3. Condições de fronteira aplicadas aos modelos bidimensionais

As condições de fronteiras nos modelos bidimensionais foram definidas de modo que o fluxo de calor é conhecido e entra pela parte exposta ao fogo, transferindo-se para a parte não exposta, definindo deste modo as seguintes condições:

- Face exposta aplicada, onde há trocas de calor por convecção com coeficiente de transferência de calor igual a  $25\text{W/m}^2\text{k}$ , emissividade externa igual a 0.8, conforme definido na curva da ISO834 e, radiação com emissividade das chamas igual a 1.
- Face não exposta aplicada as condições de acordo com a EN1991-1-2 [22] com o coeficiente de transferência de calor por convecção igual a  $9\text{W/m}^2\text{k}$ , com perda de calor para a temperatura ambiente de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (equivalente a 293.15 K na escala absoluta);
- Faces laterais definidas nos modelos, com fluxo de calor igual a zero (isoladas termicamente) sendo que não há trocas de calor nessas direções;

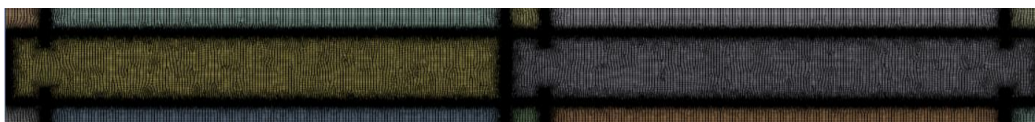
- Interior da cavidade definida como preenchida por ar, modelado com fluxo de calor por radiação e convecção no caso de modelos de elementos finitos e movimento de fluido no caso de volumes finitos.

### 3.4. Estrutura das malhas bidimensionais

Todas as malhas foram criadas seguindo os mesmos critérios. Para criação das malhas para o método de solução 1 foram usadas as seguintes configurações:

- Preferência de análise: CFD;
- Preferência de programa: *fluent*;
- Comportamento da ordem do elemento: linear;
- Tamanho da célula: 3.0mm;
- Tamanho da fronteira da célula: 0.3mm.

Na validação bidimensional, com a aplicação do método de solução 1 segundo as condições acima referidos, foram gerados para o Modelo 1 um total de 143491 nós e 135200 células; enquanto no Modelo 2 foram utilizados 155797 nós e 147303 células; e nos modelos 3 e 4 foram utilizados 14145025 nós e 136767 células, ver Figura 11.



a) Malha do Modelo 2



b) Malha do Modelo 3

Figura 11 - Malhas bidimensionais dos modelos FVM para paredes LSF.

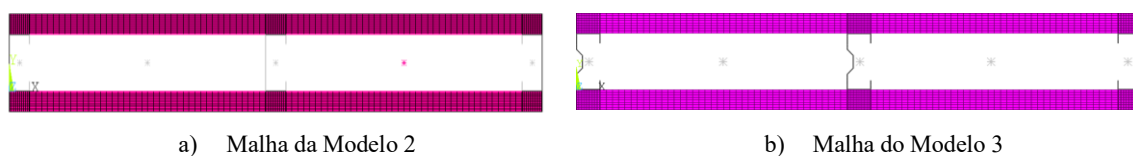
A criação de malhas em elementos com espessura pequena (*studs e tracks*) geram sobreposições indesejadas (*overlapping*) entre os elementos que formam os modelos. Estas sobreposições dão origem a erros nos contactos entre as superfícies que deveriam estar ligadas apenas por contacto perfeito, criando assim, para uma única aresta mais do que um contacto. Esta sobreposição de elementos impossibilita o avanço das simulações e compromete a estabilidade e a precisão dos resultados.

Para corrigir e contornar este problema é necessário refinar e redimensionar as células nas zonas de contacto múltiplo de forma que os tamanhos das células não sejam

maiores do que a zona de contacto entre os elementos. Para o caso de paredes LSF, com estruturas formadas por elementos que possuem espessuras pequenas, é necessário definir uma tolerância menor que o elemento de menor espessura presente na estrutura da parede LSF.

Para o caso dos modelos estudados foram geradas conexões entre os elementos que compõem a parede do tipo *edge to edge*, ou seja, para estes foi definido que o contacto é entre as arestas dos elementos que constituem a parede LSF. Para eliminar a formação de mais do que um contacto numa única arresta foi definido uma tolerância de 1mm entre contactos, que é inferior à espessura de 1.15 dos montantes, tendo deste modo um contacto único e entre as arestas.

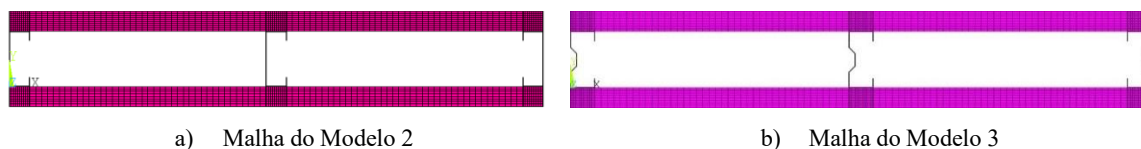
Com a aplicação do método de solução 2 e o método de solução 3, foram gerados para o Modelo 1 um total de 3357 nós e 3380 elementos e para o Modelo 2 um total de 155797 nós e 147303 células e para Modelo 3 um total de 3802 nós e 3368 elementos. Demonstrado na Figura 12 e na Figura 13.



a) Malha da Modelo 2

b) Malha do Modelo 3

Figura 12- Malhas bidimensionais dos modelos FEM para paredes LSF.



a) Malha do Modelo 2

b) Malha do Modelo 3

Figura 13 - Malhas bidimensionais dos modelos H-FEM para paredes LSF.

Na malha gerada para aplicação do método de solução 2 na validação do Modelo 4 foram gerados no total 7951 nós e 7748 elementos, demonstrada na Figura 14. Para a aplicação do método de solução 1 no Modelo 4 foi usado a mesma malha aplicada na resolução pelo método de solução 1 no Modelo 3. Neste modelo foi utilizado para validação os métodos de solução 1 e 2.

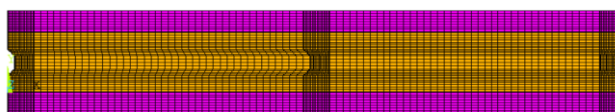


Figura 14 - Malha bidimensional do modelo FEM para o Modelo 4 com isolamento na cavidade

#### 4. Validação numérica bidimensional

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelos quatro modelos nos estudos numéricos, e a comparação gráfica entre estes resultados com os ensaios experimentais. É apresentada graficamente a evolução da temperatura em cada ponto de comparação, sendo também apresentados os campos de temperatura e velocidade e por meio de tabelas feita uma análise comparativa dos três métodos usados.

A validação dos modelos numéricos é feita através cálculo do *Root Mean Square Error* (RMSE). A Eq.4 permite quantificar a precisão das simulações, indicando a percentagem de aproximação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (NUM - EXP)^2} \quad (4)$$

Onde:

- REME - Raiz do Erro Quadrático Médio;
- NUM - Resultado numérico;
- EXP - Resultado obtido no teste experimental.

Para determinar qual dos métodos aplicados nos estudos numéricos que melhor aproxima aos resultados experimentais dos modelos é feita uma comparação através do tempo de falha por isolamento (TFI). Segundo a EN1363-1[19] considera-se que ocorre falha do critério de isolamento quando, no lado não exposto ao fogo, a elevação da temperatura média excede 140°C relativamente à temperatura inicial, ou quando a elevação da temperatura máxima pontual ultrapassa 180°C. O instante em que um destes limites é atingido define o tempo de falha por isolamento.

Para as validações realizadas, tendo como temperatura inicial 20°C, o critério de falha de isolamento ocorre quando a temperatura média excede 160°C (140 acima da temperatura inicial) e a temperatura máxima pontual ultrapassa 200°C (180 acima da temperatura inicial).

Segundo a norma EN 1363-1[19], durante a realização dos ensaios de resistência ao fogo, o controlo da temperatura no interior do forno constitui um aspeto fundamental para garantir a conformidade com as condições de exposição previstas. Assim, após os primeiros 10 minutos de ensaio, a temperatura medida por qualquer termopar localizado no interior do forno não deverá apresentar uma diferença superior a 100 K relativamente à temperatura correspondente da curva normalizada da temperatura. No caso de ensaios em que a amostra apresenta combustão rápida, admite-se que possa ocorrer um desvio superior a 100 K acima

da curva normalizada temperatura, desde que tal desvio não exceda um período de 10 minutos. Estas situações deverão ser devidamente identificadas e justificadas, sendo associadas à ignição súbita de quantidades significativas de materiais combustíveis, a qual conduz a um aumento temporário da temperatura dos gases no interior do forno.

#### **4.1. Validação numérica do Modelo 1**

De acordo com os resultados dos investigadores [14] o Modelo 1 (amostra 1) foi construída com uma camada de gesso em cada lado, onde as camadas foram fixadas aos montantes por parafusos autoperfurantes com cabeça chata de 25 mm de comprimento, distanciados de 300 mm. Segundo Kolarkar e Mahendram [14], a resistência ao fogo por isolamento deste ensaio ocorreu aos 89 minutos. Nesse momento, a temperatura média da superfície não exposta do teste 1 excedeu o critério da temperatura média inicial de 30 °C em 140 °C. Uma única camada de gesso de 16 mm no lado do fogo proporcionou uma proteção inicial de cerca de 20 minutos para os montantes, tendo as temperaturas dos montantes aumentaram rapidamente após este instante.

A evolução da curva da temperatura no lado não exposto nos ensaios experimentais neste teste apresenta uma evolução estranha após 100 minutos. Após este tempo não há grande evolução da temperatura mantendo-se quase constante. Por essa razão, decidiu-se analisar e apresentar a comparação até este intervalo de tempo.

Na Figura 15, Figura 16 e Figura 17, apresenta-se as curvas da evolução da temperatura em função do tempo e os campos de temperaturas para todos os métodos de solução aplicadas, e também o campo de velocidade para o método de solução 1. Nas tabelas 1, 2 e 3 são os erros médios (RMSE) para os diferentes pontos de medição, para diferentes períodos de análise (0-60 min, 0-100 min, 0-120 min). Os erros médios aumentam com o período de análise, conforme seria esperado. A principal razão está relacionada com a degradação dos materiais durante os ensaios experimentais.

Na tabela 4, e feita a comparação do tempo de resistência ao fogo, sendo apresentadas as temperaturas máximas (TMAX) e as temperaturas médias (TAVE) numéricas obtidas por meio dos três métodos aplicados ao modelo. Considerando os diferentes métodos aplicados ao Modelo 1, apresentando a aproximação em percentagem do método de solução aos resultados obtidos nos ensaios experimentais, realizados por Kolarkar e Mahendran [14]

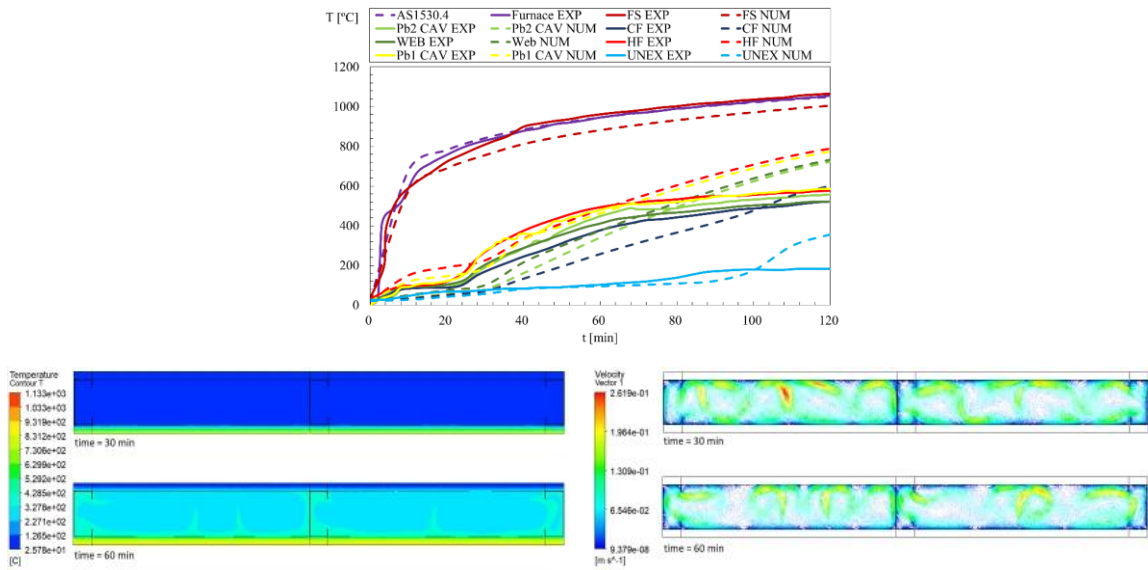


Figura 15 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 1

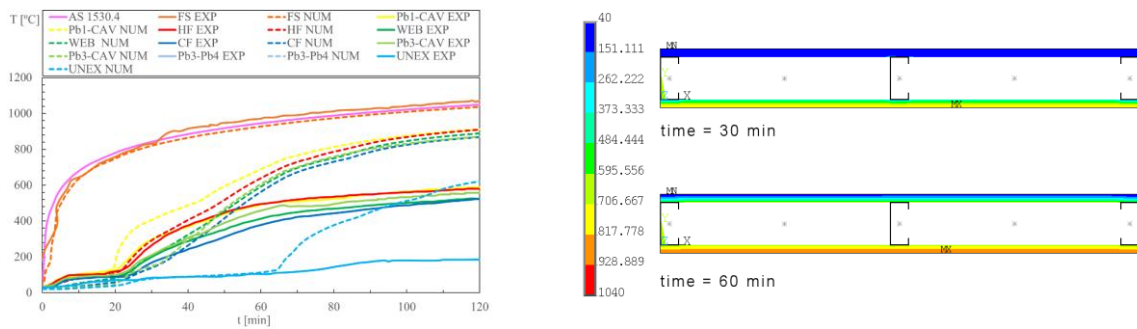


Figura 16 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 2

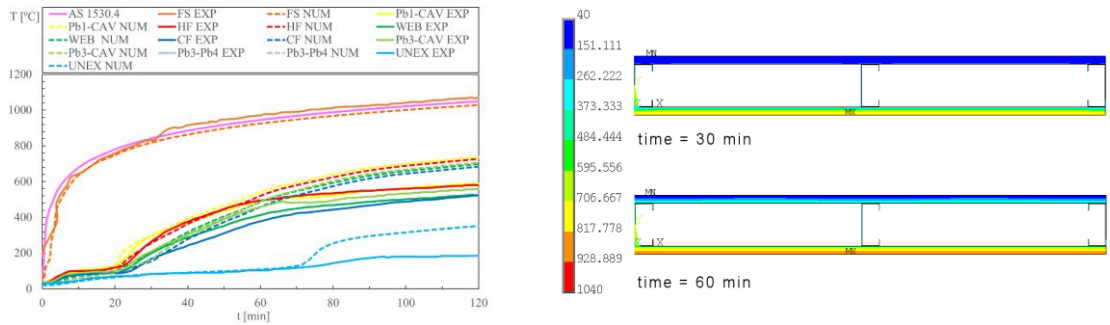


Figura 17 - Resultados do Modelo 1 aplicando o método 3

Tabela 1 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 1

Instantes	Intervalos de tempo	FS	Pb1 CAV	HF	WEB	CF	Pb2-CAV	UNEX	Media
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
6	0-60 min	86.7	52.3	44.6	59.6	95.5	112.4	18.3	67.1
10	0-100 min	82.4	66.2	72.3	70.2	87.8	94.8	26.0	71.4
12	0-120 min	79.9	93.2	104.9	102.8	84.7	105.0	63.6	90.6
									76.3

Tabela 2 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 2

Instantes	Intervalos de tempo	FS	PB1-CAV	HF	WEB	CF	Pb2-CAV	UNEX	Media
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
6	0-60 min	33.8	123.0	68.2	86.1	90.1	79.0	16.6	71.0
10	0-100 min	34.1	206.5	176.6	201.1	201.7	179.8	161.5	165.9
12	0-120 min	33.9	229.9	208.9	235.3	231.8	206.3	224.6	195.8
									144.2

Tabela 3 - RSME do Modelo 1 aplicando o método 3

Instantes	Intervalos de tempo	FS	PB1-CAV	HF	WEB	CF	PB2-CAV	UNEX	Media
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
6	0-60 min	35.6	25.4	13.0	38.6	44.4	26.1	5.1	26.9
10	0-100 min	38.3	77.3	64.9	88.7	92.5	73.5	67.6	71.8
12	0-120 min	38.8	92.8	82.9	106.4	106.5	88.5	89.5	86.5
									61.7

Tabela 4 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 1

	Método de Solução 1				Método de Solução 2				Método de Solução 3			
	T <sub>MAX</sub>	T <sub>AVE</sub>	t <sub>fi</sub>	Rel.	T <sub>MAX</sub>	T <sub>AVE</sub>	t <sub>fi</sub>	Rel.	T <sub>MAX</sub>	T <sub>AVE</sub>	t <sub>fi</sub>	Rel.
	[min]	[min]	NUM	Dif.	[min]	[min]	NUM	Dif.	[min]	[min]	NUM	Dif.
EXP [min]			[min]	[%]			[min]	[%]			[min]	[%]
89	99	100	99	11	65	65	65	26	73	73	73	18

Quando aplicado os métodos de solução 1 e 3, o erro RMSE apresenta valores bastante satisfatórios. considerando que resultados com erro RMSE inferior a 100 K em cada componente são adequados, uma vez que, de acordo com a norma EN 1363-1[19], em qualquer instante após os primeiros 10 minutos de ensaio, a temperatura registada por qualquer termopar no forno não deve diferir da temperatura correspondente da curva de incêndio padrão em mais de 100 K.

Verifica-se que o método de solução 2 apresenta valores mais elevados de erro RMSE, o que pode ser explicado pela ausência do fluxo de calor por convecção. Este fluxo de calor em falta é responsável pelo aumento da temperatura na região da cavidade, sendo observadas discrepâncias mais significativas nas zonas HF, WEB e CF, bem como nas temperaturas de ambas as placas de gesso em contacto com a região da cavidade.

## 4.2. Validação numérica do Modelo 2

O Modelo 2 foi construída com duas camadas de gesso de 16 mm em cada lado [14], totalizando uma camada de proteção de 32 mm de cada lado da parede. De acordo com Kolarkar e Mahendram [14], as camadas internas foram primeiramente fixadas aos montantes por parafusos autoperfurantes com cabeça chata de 25 mm de comprimento, em centros de 300 mm. As placas externas de gesso foram então fixadas por parafusos autoperfurantes com cabeça chata de 45 mm de comprimento, em centros de 300 mm.

Esta parede foi submetida a um teste de fogo com duração de 3 horas, e após o teste, durante a inspeção final, Kolarkar e Mahendram mencionaram que tanto a placa PB1 quanto a placa PB2 (ambas do lado exposto) ainda estavam intactos e os montantes estavam em boas condições. Neste ensaio, a temperatura não aumentou tão rapidamente quanto nos ensaios com isolamento na cavidade, uma vez que, nesta amostra, a placa PB2 (lado exposto ao fogo em contato com a cavidade) foi transferindo calor por radiação e convecção através da região da cavidade.

O fluxo de calor através da cavidade em direção ao PB3 (lado não exposto) serviu como um dissipador de calor para as placas de gesso no lado exposto ao fogo. A temperatura média da superfície PB2-CAV é ligeiramente superior à temperatura média de PB3-CAV e nunca ultrapassou 70 K. A temperatura média entre as placas PB3 e PB4 apresentou um patamar até 131 minutos, após o qual subiu muito gradualmente para 220 °C aos 170 minutos. O aumento gradual da temperatura de PB3-PB4 foi explicado porque as camadas de gesso do lado do fogo ainda estavam visualmente intactas sem perder sua integridade material. De acordo com a Figura 18, o aumento inicial na temperatura do aço foi seguido por um patamar muito mais longo que se estendeu até 60 minutos. A temperatura estava abaixo de 120 °C no final do patamar. Esse patamar foi seguido por um aumento gradual da temperatura, alcançando 400 °C após 115 minutos.

A Figura 18, Figura 19 e Figura 20 abaixo apresentadas, mostram as curvas da evolução da temperatura em função do tempo e os campos de temperaturas para todos os métodos de solução aplicados, e também o campo de velocidade para o método de solução 1. Nas tabelas 5, 6 e 7 são apresentados os erros RMSE para cada ponto de medição e período de observação.

Na tabela 8, e feita a comparação dos métodos aplicados ao Modelo 2, com apresentação dos critérios para a temperatura máxima (TMAX) e a temperatura média (TAVE) numéricas obtidas por meio dos três métodos de solução aplicados ao Modelo 2. É

apresentada uma aproximação em percentagem do método de solução aos resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentados por Kolarkar e Mahendram [14].

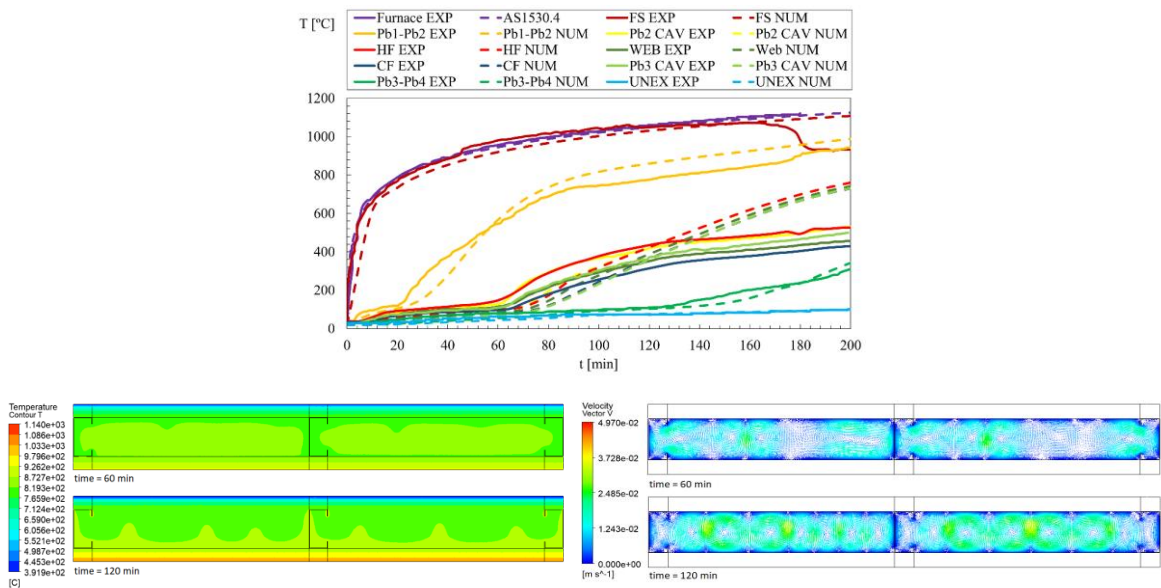


Figura 18 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 1

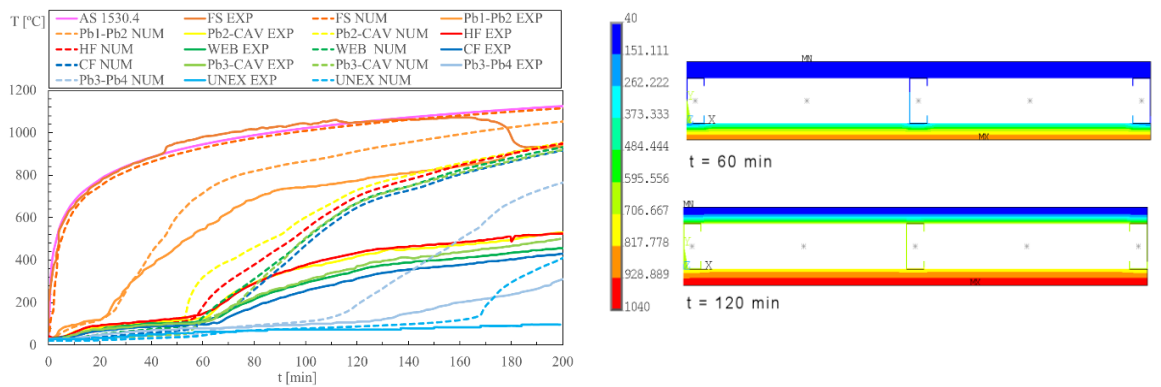


Figura 19 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 2

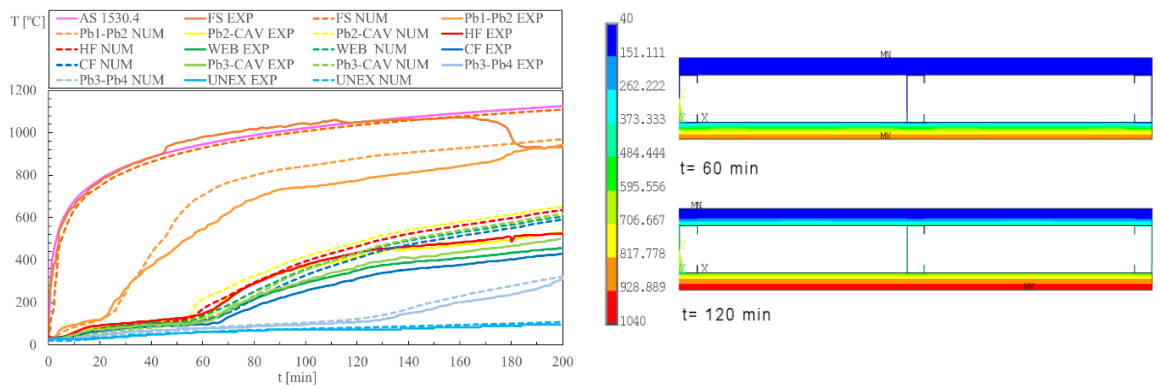


Figura 20 - Resultados do Modelo 2 aplicando o método 3

Tabela 5 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 1

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	46.8	67.0	22.5	34.6	27.7	24.9	36.7	25.0	14.8	33.3
10	0-100 min	47.1	61.2	56.5	63.9	40.1	33.5	64.6	21.6	13.5	44.7
12	0-120 min	49.2	66.5	56.6	65.0	40.2	34.2	66.0	21.7	13.5	45.9
											41.3
14	0-140 min	41.8	68.2	52.1	57.5	48.0	49.5	58.4	23.1	11.5	45.6
18	0-180 min	45.5	70.2	90.3	89.3	103.4	111.0	90.5	25.3	10.2	70.6
											48.0
20	0-200 min	69.2	68.2	110.8	110.4	131.4	139.9	111.3	25.5	9.7	86.3
											54.4

Tabela 6 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 2

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	34.5	93.6	78.0	22.3	21.6	24.4	41.2	27.5	15.1	39.8
10	0-100 min	36.7	110.6	134.1	77.4	89.4	87.8	82.4	21.9	11.8	72.5
12	0-120 min	35.1	114.8	172.0	121.8	145.5	149.9	135.7	31.6	12.0	102.0
											71.4
14	0-140 min	32.6	119.2	203.9	160.3	188.7	195.5	176.0	70.7	13.4	128.9
18	0-180 min	40.7	125.2	257.8	225.4	259.0	266.8	237.4	173.2	54.8	182.3
											105.1
20	0-200 min	68.6	124.0	278.2	250.9	287.0	294.9	260.6	218.8	104.8	209.8
											122.5

Tabela 7 - RSME do Modelo 2 aplicando o método 3

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	34.6	88.9	36.1	13.7	9.6	9.3	13.2	6.8	3.0	23.9
10	0-100 min	37.3	99.4	38.1	12.7	28.9	31.7	21.2	6.5	3.2	31.0
12	0-120 min	35.9	100.1	43.4	15.5	40.5	47.0	30.4	7.9	4.5	36.1
											30.4
14	0-140 min	33.4	99.9	50.7	23.9	51.7	60.2	41.3	10.6	5.9	41.9
18	0-180 min	40.1	95.4	69.1	44.8	73.2	83.3	61.2	18.8	6.8	54.7
											37.5
20	0-200 min	66.6	91.0	75.8	53.8	83.1	93.2	68.7	68.7	7.4	67.6
											42.6

Tabela 8 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 2

	Método de Solução 1				Método de Solução 2				Método de Solução 3			
$t_{fi}$	$T_{MAX}$	$T_{AVE}$	$t_{fi}$	Rel.	$T_{MAX}$	$T_{AVE}$	$t_{fi}$	Rel.	$T_{MAX}$	$T_{AVE}$	$t_{fi}$	Rel.
EXP [min]	[min]	[min]	NUM [min]	Dif. [%]	[min]	[min]	NUM [min]	Dif. [%]	[min]	[min]	NUM [min]	Dif. [%]
>200	241	240	240	NA	169	168	168	NA	>200	>200	>200	NA

Mais uma vez observe-se que o método de solução 2 apresenta os valores mais elevados de erro RMSE, sendo a ausência do fluxo de calor por convecção o responsável pelo aumento da temperatura na região da cavidade, originando discrepâncias mais significativas nos materiais em contacto direto com essa região.

### 4.3. Validação numérica do Modelo 3

Segundo Dias, Keerthan, e Mahendran [23] o teste 8 foi construída com duas placas de gesso em cada lado da parede. Ambas as placas tinham um comprimento maior em comparação com a distância entre os montantes. Essa extensão foi coberta com gesso adicional de 100 mm de largura. Os perfis de temperatura média para este modelo são apresentados na Figura 21. O termopar FS segue um crescimento monótono até 200 minutos. Após esse período, o FS apresenta uma queda de temperatura, com um aumento repentino no PB1-PB2. De acordo com Dias, Keerthan, e Mahendran [23], este comportamento sugere que ocorreu uma queda repentina na camada de gesso PB1.

A falha de isolamento foi definida pelo critério de temperatura média após 252 minutos de exposição ao fogo. O histórico de temperatura do aço também exibe um padrão semelhante, onde após um patamar inicial na temperatura ambiente, os termopares registaram um aumento gradual e atingem outro patamar prolongado. esta evolução é seguida por um aumento gradual na temperatura, mas após 220 minutos, tanto as temperaturas HF quanto CF sobem rapidamente novamente. Esse comportamento está de acordo com a explicação sobre a queda repentina na camada externa de gesso acartonado mais exposta do lado do fogo após 210 minutos.

A Figura 21, Figura 22, e a Figura 23, apresentam as curvas da evolução da temperatura em função do tempo e os campos de temperaturas para todos os métodos de solução aplicadas. É ainda apresentado o campo de velocidade para o método de solução 1. Nas tabelas 9, 10 e 11 são apresentados os erros médios (RMSE) para cada método de solução. São apresentados os erros acumulados médios para diferentes tempos da evolução.

Na tabela 12 é apresentada a resistência ao fogo por isolamento, tendo em consideração o critério da temperatura máxima (TMAX) e da temperatura média (TAVE), assim como o erro relativo por comparação com os resultados experimentais realizados por Dias, Keerthan, e Mahendran [15].

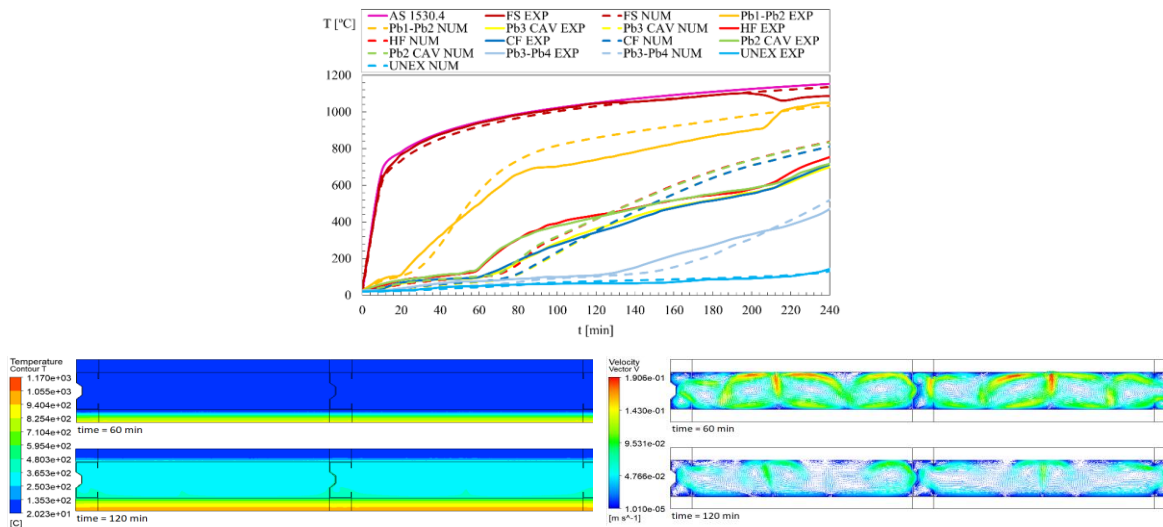


Figura 21- Resultados do Modelo 3 aplicando o método 1

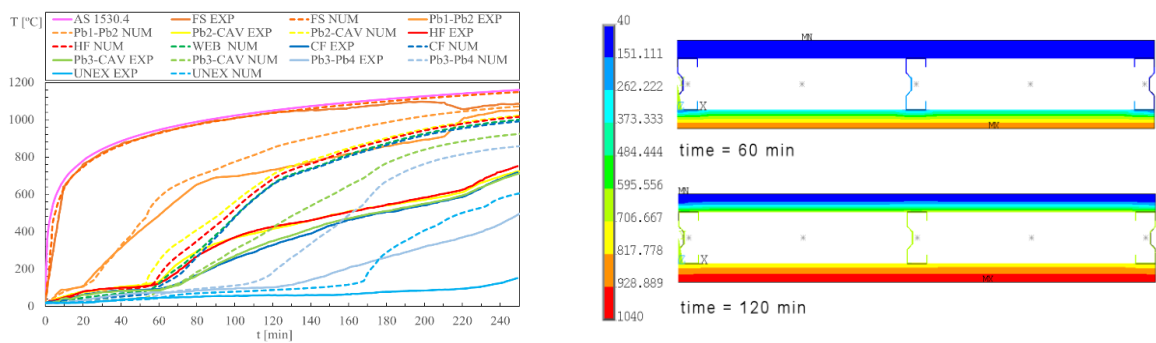


Figura 22 - Resultados do Modelo 3 aplicando o método 2

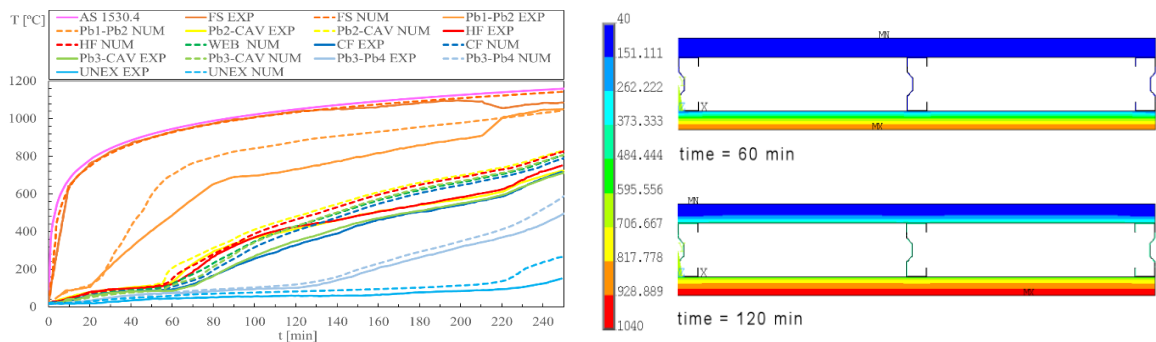


Figura 23 - Resultados do Modelo 3 aplicando o método 3

Tabela 9 - RSME Modelo 3 aplicando o método 1

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	23.6	45.5	27.5	27.7		26.1	26.5	19.3	6.4	25.3
10	0-100 min	20.5	67.4	66.5	73.0		41.4	42.5	17.6	6.1	41.9
12	0-120 min	19.5	78.4	61.5	68.7		38.1	40.7	16.3	6.9	41.3
											36.2
14	0-140 min	18.2	84.3	57.9	64.3		38.2	38.3	18.0	8.6	41.0
18	0-180 min	15.3	81.9	63.6	69.3		52.2	50.3	30.4	9.1	46.5
											39.2
20	0-200 min	15.4	85.8	78.8	85.0		69.9	67.6	32.0	9.4	55.5
											41.9

Tabela 10 - RSME Modelo 3 aplicando o método 2

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	7.9	43.3	44.1	20.2		25.0	34.6	17.7	3.4	24.5
10	0-100 min	6.4	52.6	96.5	71.9		93.4	30.5	15.4	11.7	47.3
12	0-120 min	5.8	65.2	140.6	115.3		150.5	37.1	28.4	14.9	69.7
											47.2
14	0-140 min	5.9	77.2	177.1	154.4		189.8	55.1	69.9	19.2	93.6
18	0-180 min	9.0	90.7	224.9	208.0		233.5	106.5	164.3	59.8	137.1
											74.4
20	0-200 min	10.0	94.8	243.8	227.4		250.7	135.3	208.8	109.4	160.0
											88.7

Tabela 11 - RSME Modelo 3 aplicando o método 3

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	7.9	127.2	28.9	12.1		7.4	14.4	3.4	10.4	26.5
10	0-100 min	6.5	139.1	29.8	17.1		26.2	36.8	5.9	14.3	34.5
12	0-120 min	6.1	140.4	36.8	20.8		38.9	46.4	8.3	15.8	39.2
											33.4
14	0-140 min	5.8	140.2	45.8	30.1		47.7	53.9	10.7	17.8	44.0
18	0-180 min	7.5	133.9	64.1	51.7		59.2	69.0	69.0	20.5	59.4
											40.7
20	0-200 min	7.9	130.0	72.6	59.7		65.2	75.6	18.1	21.3	56.3
											43.3

Tabela 12 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 3

	Método de Solução 1				Método de Solução 2				Método de Solução 3			
	T <sub>MAX</sub> [min]	T <sub>AVE</sub> [min]	t <sub>fi</sub> NUM [min]	Rel. Dif. [%]	T <sub>MAX</sub> [min]	T <sub>AVE</sub> [min]	t <sub>fi</sub> NUM [min]	Rel. Dif. [%]	T <sub>MAX</sub> [min]	T <sub>AVE</sub> [min]	t <sub>fi</sub> NUM [min]	Rel. Dif. [%]
252	247	244	244	3	170	169	169	33	226	225	225	10

Mais uma vez, o método de solução 2 é o método que apresenta valores mais elevados de erro RMSE, sendo a causa a mesma identificada anteriormente. Para este modelo o método de solução 1 foi o método que melhor aproximou os resultados numéricos dos resultados experimentais, tendo demonstrado menor valor do erro RMSE.

#### 4.4. Validação numérica do Modelo 4

Segundo Dias, Keerthan, e Mahendran [23] o teste 12 foi construída com duas placas de gesso em cada lado da parede com a cavidade preenchida com lã de rocha com densidade de 100kg/m<sup>3</sup>. A semelhança do teste 8, ambas as placas tinham um comprimento maior em comparação com a distância entre os montantes, que também foram cobertas com gesso adicional de 100 mm de largura. A Figura 21 apresenta os perfis de temperatura média para este modelo. A curva da temperatura no termopar FS segue um crescimento monótono até 140 minutos. Após esse período, o FS apresenta uma queda de temperatura abruptamente, seguido de um aumento na temperatura do PB1-PB2 para atingir a curva do fogo. Por volta dos 175 minutos ocorre um rápido aumento da temperatura média do PB3-PB4, seguido de um aumento da temperatura lida nos termopares das flanges quentes e frias, que aumentam subitamente para atingir a curva do fogo imediatamente após 180 minutos. De acordo com Dias, Keerthan, e Mahendran [23], este comportamento sugere a queda do gesso interno no lado do fogo (PB2).

A falha de isolamento foi definida pelo critério de temperatura máxima após 219 minutos. No lado não exposto, as temperaturas da superfície da cavidade (PB3-CAV) e do PB3-PB4 permanecem muito semelhantes até 180 minutos. Após a queda completa das placas de gesso do lado exposto ao fogo, a temperatura da cavidade aumenta repentinamente.

As curvas da evolução da temperatura em função do tempo e os campos de temperaturas para todos os métodos de solução aplicadas são apresentadas na Figura 21 e Figura 23. Nas tabelas 13, 14 são apresentados os erros médios (RMSE) para o método de solução 1 e 3. São apresentados os erros acumulados médios para diferentes tempos da evolução.

Na tabela 15 é apresentada a resistência ao fogo por isolamento, tendo em consideração o critério da temperatura máxima (TMAX) e da temperatura média (TAVE), assim como o erro relativo por comparação com os resultados experimentais realizados por Dias, Keerthan, e Mahendran [15].

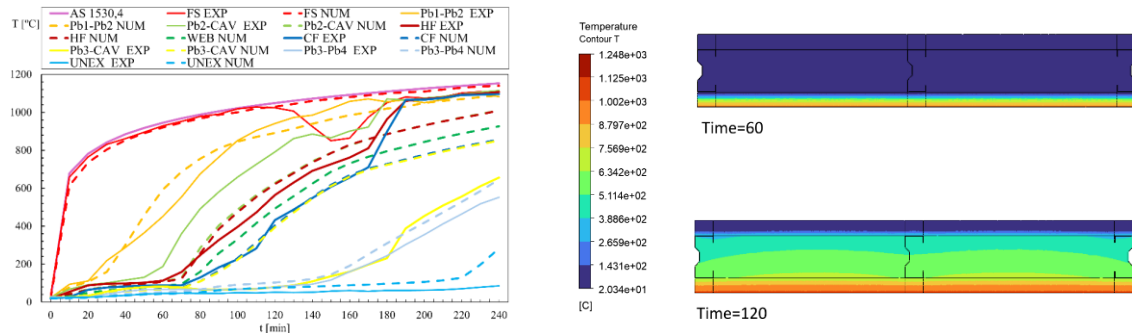


Figura 24- Resultados do Modelo 4 aplicando o método 1

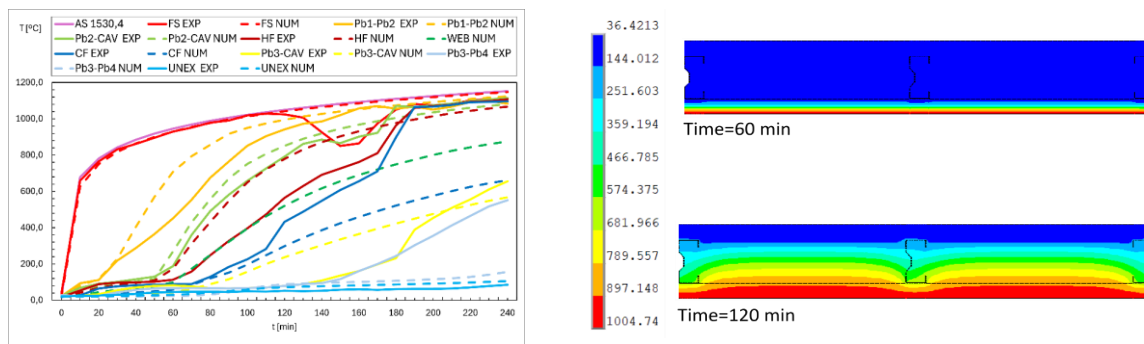


Figura 25 - Resultados do Modelo 4 aplicando o método 2

Tabela 13 - RSME Modelo 4 aplicando o método 1

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	26,5	73,3	39,4	21,6	14,3	11,9	12,5	2,3	22,4	
10	0-100 min	21,7	76,5	129,1	19,3	34,5	59,3	14,0	8,6	40,3	
12	0-120 min	20,0	72,0	135,4	21,4	42,8	125,6	16,5	12,7	49,6	
											37,4
14	0-140 min	41,6	69,6	139,4	19,9	43,4	193,9	17,9	16,1	60,2	
18	0-180 min	86,6	67,7	133,9	44,1	48,8	288,1	27,1	20,5	79,7	
											50,4
20	0-200 min	82,7	64,8	135,6	104,2	65,4	293,4	32,4	23,5	89,1	
											56,9

Tabela 14 - RSME Modelo 4 aplicando o método 2

Incremento de tempo	Intervalo de tempo	FS [°C]	Pb1-Pb2 [°C]	Pb2 CAV [°C]	HF [°C]	WEB [°C]	CF [°C]	Pb3 CAV [°C]	Pb3-Pb4 [°C]	UNEX [°C]	Media [°C]
6	0-60 min	17,6	142,3	35,5	33,7		27,1	29,3	30,6	10,5	36,3
10	0-100 min	13,9	156,5	57,6	29,6		131,8	40,6	30,2	9,9	52,2
12	0-120 min	13,6	145,1	60,0	48,2		153,3	69,7	27,8	12,1	58,9
											49,1
14	0-140 min	41,1	135,3	56,7	73,0	0,0	159,3	96,1	25,8	14,7	66,9
18	0-180 min	88,3	119,5	59,8	136,8	0,0	155,8	126,1	47,7	17,2	83,4
											59,5
20	0-200 min	84,6	113,8	58,2	205,5	0,0	149,0	120,5	82,3	18,6	92,5
											65,0

Tabela 15 - Comparação dos métodos aplicados ao Modelo 4

	Método de Solução 1				Método de Solução 2			
$t_{fi}$ EXP [min]	$T_{MAX}$ [min]	$T_{AVE}$ [min]	$t_{fi}$ NUM [min]	Rel. Dif. [%]	$T_{MAX}$ [min]	$T_{AVE}$ [min]	$t_{fi}$ NUM [min]	Rel. Dif. [%]
219	226	224	224	2	<200	<200	<200	N/A

Para este modelo, a semelhança dos outros modelos, o método de solução 1 é o método que apresenta valores mais baixo de erro RMSE, sendo deste modo o melhor método de solução aplicado neste modelo. E Mais uma vez, o método de solução 2 é o método que apresenta valores mais elevados de erro RMSE.

## 5. Estudos paramétricos bidimensionais

Para melhor compreender a evolução térmica que ocorre em sistemas distintos e avaliar qual gesso, tipo F ou tipo X, com espessuras de 12.5 mm e 16 mm e o uso de uma ou duas placas de gesso, possui melhor performance no isolamento ao fogo, realizou-se um estudo paramétrico comparando os resultados em função do tempo de resistência ao fogo obtidos em que cada cenário nas simulações. Foram realizadas, aplicando o método dos volumes finitos, 16 simulações diferentes, apresentados na tabela 16, representando assim um amplo conjunto de resultados que permitiram ter conclusões mais assertivas dos efeitos que as variações destes parâmetros tem no tempo de resistência ao fogo.

Com o objetivo de realizar um estudo mais abrangente sobre a resistência que as paredes LSF apresentam ao fogo. A tabela descreve os testes usados nos estudos paramétricos, apresentando o tipo de montante, o tipo de gesso e a sua espessura. Nestes modelos, considerou-se a cavidade preenchida por ar.

Tabela 16 – Modelos usados no estudo paramétrico

Teste	Tipo de perfil/ Distância [mm]	Material / Espessura [mm] Camada 1	Material / Espessura [mm] Camada 2
	A	C/500	Gesso tipo F/12.5
B	C/500	Gesso tipo X/12.5	
C	C/500	Gesso tipo F/16.0	
D	C/500	Gesso tipo X/16.0	
E	C/500	Gesso tipo F/12.5	Gesso tipo F/12.5
F	C/500	Gesso tipo X/12.5	Gesso tipo X/12.5
G	C/500	Gesso tipo F/16.0	Gesso tipo F/16.0
H	C/500	Gesso tipo X/16.0	Gesso tipo X/16.0
I	$\Sigma$ /450	Gesso tipo F/12.5	
J	$\Sigma$ /450	Gesso tipo X/12.5	
K	$\Sigma$ /450	Gesso tipo F/16.0	
L	$\Sigma$ /450	Gesso tipo X/16.0	
M	$\Sigma$ /450	Gesso tipo F/12.5	Gesso tipo F/12.5
N	$\Sigma$ /450	Gesso tipo X/12.5	Gesso tipo X/12.5
O	$\Sigma$ /450	Gesso tipo F/16.0	Gesso tipo F/16.0
P	$\Sigma$ /450	Gesso tipo X/16.0	Gesso tipo X/16.0

Com base nos modelos acima apresentados, foram feitos estudos com diferentes tipos e quantidades de gesso, tendo obtido deste modo uma base comparativa da resistência oferecida a evolução do fogo, nas diferentes estruturas usados nos modelos e na espessura

da cama de proteção nos lados exposto e não exposto. As figuras 26 e 27 demonstram as curvas da evolução de temperatura obtidos nos estudos numéricos para os diferentes modelos, e faz uma comparação gráfica da evolução da temperatura no gesso tipo F e o gesso tipo X, através da sobreposição gráfica das curvas obtidas nos diferentes modelos.

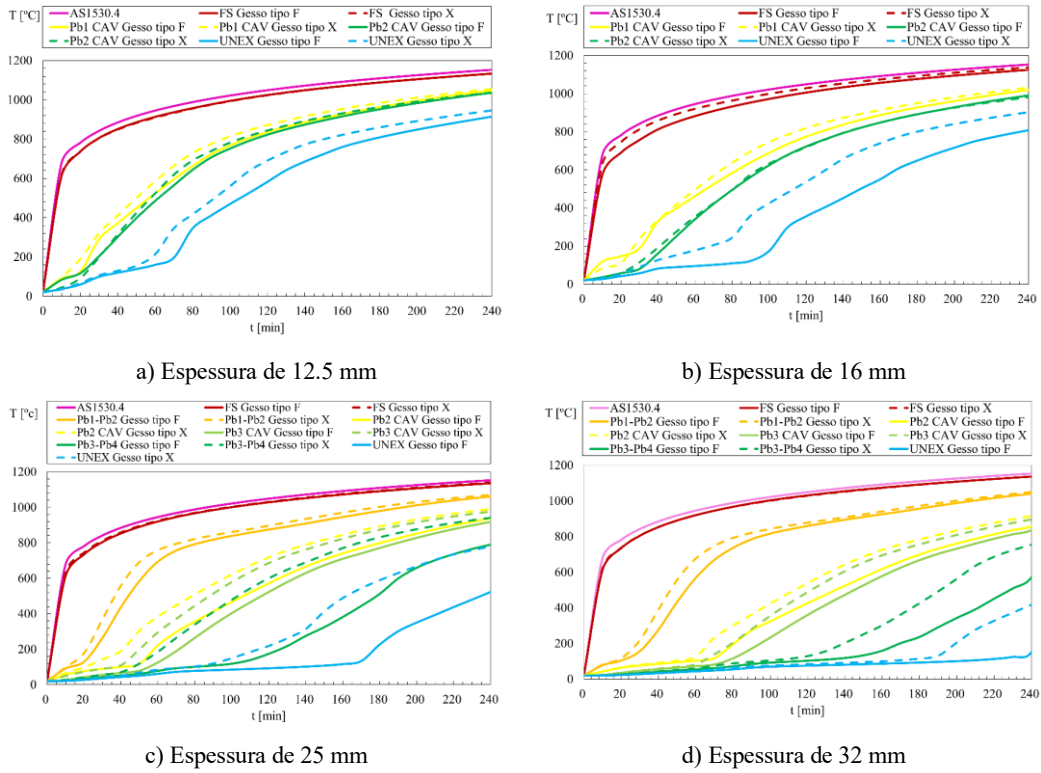
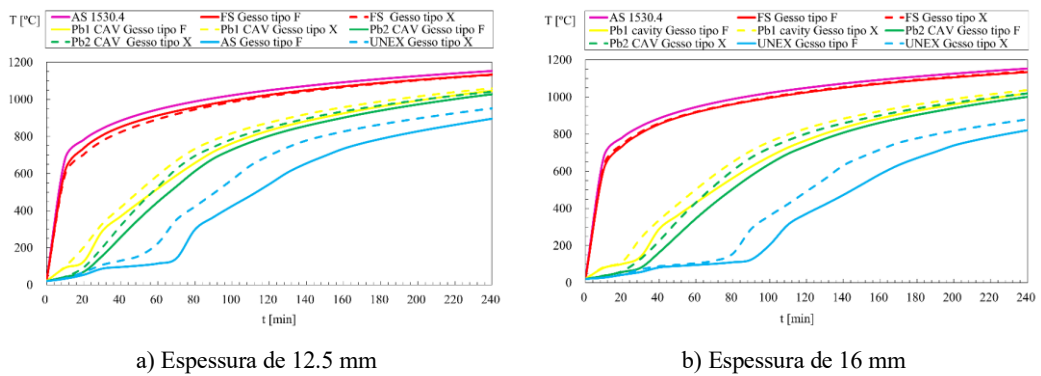


Figura 26 - Resultados paramétricos para testes com montantes tipo C e gessos tipo F e tipo X



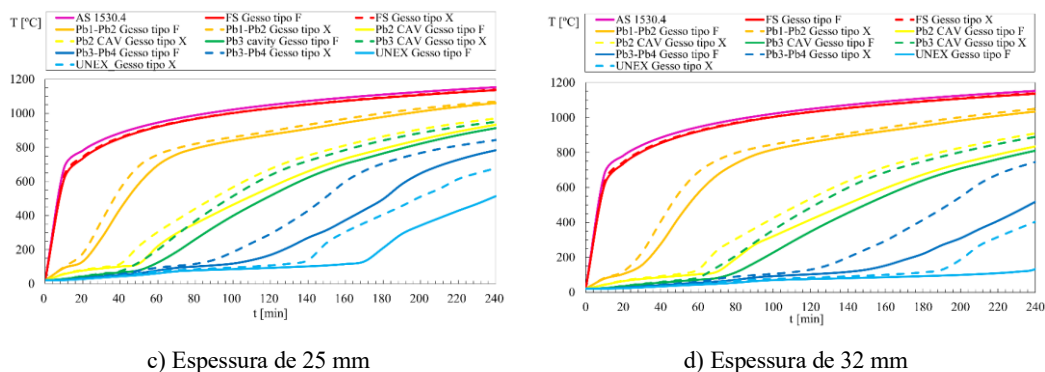


Figura 27 - Resultados paramétricos para testes com montantes tipo  $\Sigma$  e gessos tipo F e tipo X

A tabela 17 apresenta os tempos de resistência ao fogo obtidos nas simulações dos estudos paramétrico.

Tabela 17 - Resistência ao fogo obtido nos estudos paramétricos.

Teste	Montante/ Distancia [mm]	Material / Espessura [mm] Camada 1	Material / Espessura [mm] Camada 2	t (Tmax) [min]	t (Tave) [min]
A	C/500	Gesso F/12.5		73	60
B	C/500	Gesso X/12.5		61	51
C	C/500	Gesso F/16.0		100	99
D	C/500	Gesso X/16.0		84	81
E	C/500	Gesso F/12.5	Gesso F/12.5	173	172
F	C/500	Gesso X/12.5	Gesso X/12.5	142	141
G	C/500	Gesso F/16.0	Gesso F/16.0	241	240
H	C/500	Gesso X/16.0	Gesso X/16.0	198	194
I	$\Sigma$ /450	Gesso F/12.5		74	71
J	$\Sigma$ /450	Gesso X/12.5		60	57
K	$\Sigma$ /450	Gesso F/16.0		97	95
L	$\Sigma$ /450	Gesso X/16.0		82	81
M	$\Sigma$ /450	Gesso F/12.5	Gesso F/12.5	177	174
N	$\Sigma$ /450	Gesso X/12.5	Gesso X/12.5	145	143
O	$\Sigma$ /450	Gesso F/16.0	Gesso F/16.0	247	244
P	$\Sigma$ /450	Gesso X/16.0	Gesso X/16.0	200	196

Como já era previsto, com o aumento de número de placas há uma diminuição na temperatura máxima no lado não exposto para o mesmo instante de tempo, ou seja, a

temperatura na zona não exposta tem uma relação inversamente proporcional ao número de placas de gesso usado em cada camada.

Para o mesmo tempo de simulação e a mesma configuração de montagem da estrutura, as paredes simuladas com gesso tipo X atingiram temperaturas mais altas na zona não exposta do que o gesso tipo F, com diferenças mais significativas na montagem com duas placas de gesso de cada lado.

O perfil do montante não tem influência significativa no tempo de resistência que a parede tem na propagação do fogo.

O método de solução 1 apresenta menores erros comparativamente com os restantes métodos e, sendo assim o melhor método para aproximar os valores obtidos nos estudos numéricos dos resultados experimentais.

A variação do tempo de resistência ao fogo entre o gesso tipo F e gesso tipo X é de aproximadamente de 10 min. Nos modelos onde há duas placas de gesso em cada camada, nota-se que este tempo aumenta proporcionalmente ao número de placas usadas. ver Figura 28.

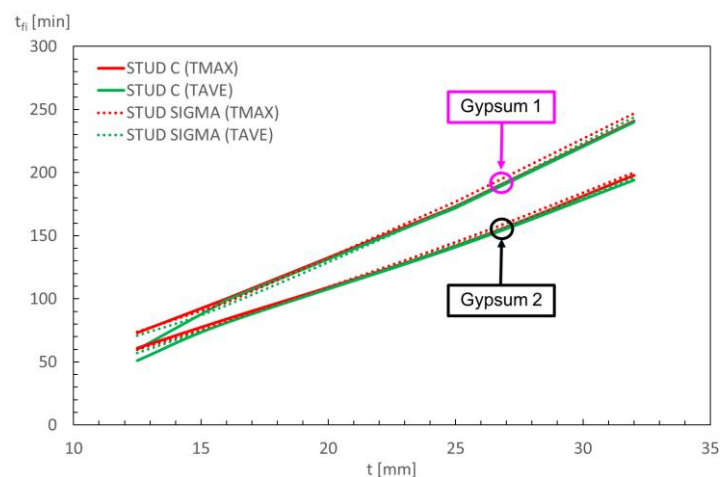


Figura 28 - Resistência ao fogo dos diferentes tipos de gesso

## 6. Método simplificado de cálculo

Este método baseia-se no método desenvolvido por Frangi et al. [24] baseado no Método dos Componentes Aditivos, já incluído na segunda geração da norma EN 1995-1-2, que consiste na soma da contribuição que de cada camada fornece a resistência ao fogo do conjunto.

O método abaixo apresentado tem em consideração o estudo das camadas que formam o conjunto e a influencia exercida pela cavidade vazia, desprezando o efeito do perfil do montante.

Para determinar tempo total de isolamento ( $t_{ins}$ ) que a parede oferece ao fogo é necessário determinar a contribuição que cada elemento oferece ao conjunto. O tempo total de isolamento calculado pela Eq.5 baseia-se no padrão de fluxo de calor mais crítico.

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (5)$$

Sendo a primeira parcela,  $\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$  trata-se da soma do tempo de proteção (min) das camadas que precedem a última camada do conjunto. E a segunda parcela,  $t_{ins,n}$  a contribuição (min) oferecida pela última camada na resistência ao fogo. A Fig.24 ilustra a disposição das camadas que formam o conjunto

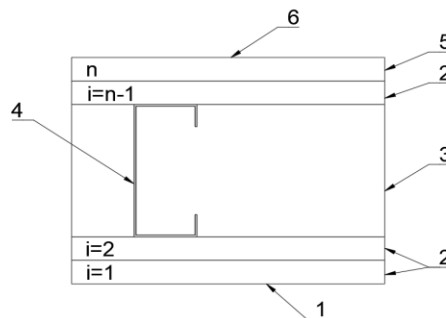


Figura 29 - Camadas da parede LSF

1. Lado exposto ao fogo;
2. Placas de camada de proteção;
3. Cavidade;
4. Montante;
5. Placa de isolamento (última placa)
6. Lado não exposto ao fogo.

## 6.1. Tempo de proteção

Para determinar o tempo de proteção ( $t_{prot,i}$ ) para painéis e componentes de isolamento que compõem as camadas que precedem a última camada, este valor deve ser calculado de acordo com a Eq.6.

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \times k_{j,i} \quad (6)$$

Onde:

- $t_{prot,0,i}$  é o tempo básico de proteção da camada  $i$ ;
- $k_{pos,exp,i}$  é o coeficiente de posição para lado exposto ao fogo;
- $k_{pos,unexp,i}$  é o coeficiente de posição para lado não exposto ao fogo da camada  $i$ ;
- $\Delta t_i$  é o tempo de correção da camada  $i$ ;
- $k_{j,i}$  é o coeficiente relativo a junta da camada  $i$ .

Para placas de gesso, o valor básico do tempo de proteção para a camada “ $i$ ”, deve ser calculado de acordo com a Eq.7.

$$t_{prot,0,i} = 30 \left( \frac{h_i}{15} \right)^{1.2} \quad (7)$$

Onde  $h_i$  a espessura da camada “ $i$ ” dada em mm. Para paredes compostas por múltiplas camadas de gesso a espessura  $h_i$  deve ser calculado, para cada caso, segundo a Eq.8.

$$h_i = \begin{cases} h_1 + 0.5 \times h_2 & \text{para 2 camadas com placas de gesso Tipo X no lado exposto} \\ h_1 + 0.8 \times h_2 & \text{para 2 camadas com placas de gesso Tipo F no lado exposto} \\ h_1 + 0.8 \times h_2 + 0.5 \times h_3 & \text{para 3 camadas com placas de gesso Tipo F no lado exposto} \end{cases} \quad (8)$$

Sendo  $h_1$  a espessura correspondente a primeira placa gesso no lado exposto,  $h_2$  e  $h_3$  correspondente a espessura das placas seguintes.

O valor do coeficiente de posição  $k_{pos,exp,i}$  para o lado exposto da camada  $i$  que considera a influencia da camada  $i-1$ , que precede a camada  $i$  deve ser calculado de acordo com a Eq.9.

$$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 0.6 \times \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} & \text{para } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0.5 \times \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \text{para } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

O coeficiente de posição  $k_{pos,unexp,i}$  para o lado não exposto da camada  $i$  deve considerado com 1 para placas apoiadas montantes e, para placas apoiadas noutras placas deve ser obtida pela Eq.10.

$$k_{pos,unexp,i} = 0.5h_i^{0.15} \quad (10)$$

O efeito acrescido da proteção fornecida pela(s) placa(s) deve ser considerado adicionando um tempo de correção  $\Delta t_i$  ao tempo de proteção. Esta parcela deve ser calculada segundo a Eq.11.

$$\Delta t_i = \begin{cases} 0.03 \times t_{prot,i-1} + 0.9 \times t_{prot,0,i} - 2.3 & \text{para } t_{prot,0,i} < 12 \text{ min} \\ 0.22 \times t_{prot,i-1} - 0.1 \times t_{prot,0,i} + 4.7 & \text{para } t_{prot,0,i} \geq 12 \text{ min} \end{cases} \quad (11)$$

## 6.2. Tempo de isolamento

O tempo de proteção para a última camada ( $t_{ins,n}$ ) deve ser dado pela Eq.12, considerando o tempo básico de isolamento, o coeficiente relativo à sua posição, o tempo de correção e o coeficiente relativo às juntas.

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,i} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \times k_{j,n} \quad (12)$$

Onde:

- $t_{ins,0,n}$  é o tempo básico de isolamento da última camada n;
- $k_{pos,exp,n}$  é o coeficiente de posição para lado exposto ao fogo da última camada n;
- $\Delta t_n$  é o tempo de correção da última camada n;
- $k_{i,n}$  é o coeficiente relativo a junta da última camada n.

O tempo básico de isolamento da última camada que compõe a parede, deve ser calculado segundo a Eq.13.

$$t_{ins,0,n} = 24 \left( \frac{h_n}{15} \right)^{1.4} \quad (13)$$

A semelhança do cálculo para determinar o valor do coeficiente de posição para o lado exposto da camada i, é necessário determinar valor do coeficiente de posição  $k_{pos,exp,n}$  para o lado exposto da camada n. Para determinar este coeficiente aplica-se a fórmula apresentada na Eq.5 usando o  $t_{ins,0,i}$  ao invés do  $t_{prot,0,i}$ .

O efeito acrescido do isolamento fornecida pela última placa deve ser considerado adicionando um tempo de correção  $\Delta t_n$  ao tempo de isolamento. Esta parcela deve ser determinada segundo a Eq.14.

$$\Delta t_n = \begin{cases} 0.03 \times t_{prot,i-1} + 0.9 \times t_{ins,0,n} - 2.3 & \text{para } t_{ins,0,n} < 12 \text{ min} \\ 0.22 \times t_{prot,i-1} - 0.1 \times t_{ins,0,n} + 4.7 & \text{para } t_{ins,0,n} \geq 12 \text{ min} \end{cases} \quad (14)$$

As fórmulas para determinar os coeficientes de posição apresentados nas Eq.6 e 7 foram determinados por Frangi et al. [18], assumindo que as camadas se desprendiam quando a temperatura no lado não exposto de cada camada protetora aumentava 250°C acima da temperatura média inicial. Esta suposição é considerada pelos mesmos autores como conservadora. As fórmulas para determinar os tempos de correção apresentados nas Eq.8 e 10, tem como objetivo compensar a abordagem conservadora assumida. Estes tempos de correção foram calculados através de simulações por elementos finitos, utilizando um critério de temperatura de 600 °C para o desprendimento das placas. Estes tempos de correção devem apenas ser utilizados no caso de camadas protegidas (precedidas) por placas de gesso tipo F e placas de gesso-fibra.

Para paredes com cavidade vazia é necessário ter em consideração o efeito que esta cavidade tem sobre as placas que estão expostas diretamente aos fenómenos térmicos que ocorrem na cavidade. Para considerar o efeito que a cavidade vazia exerce sobre os coeficientes de posição  $k_{pos,exp,i}$  e os valores dos tempos de correção  $\Delta t$  nas placas é considerado através de uma modificação dos coeficientes de posição de cada camada em contacto com a cavidade do lado exposto e do lado não exposto. Para este utilizou-se os coeficientes da Eq.15 e Eq.16.

$$k_{pos,exp,i} = 1.36 \times k_{pos,exp,i} \quad (15)$$

$$\Delta t_i = 3 \times \Delta t_i \quad (16)$$

Estes coeficientes foram modificados por forma aproximar os resultados obtidos nos cálculos aos resultados obtidos nos estudos numéricos, e testados para mais do que um caso para comprovar a coerência da sua aplicação.

Sendo que em todas as simulações apresentadas nesta investigação não foram assumidas juntas nas estruturas das paredes, os coeficientes  $k_{j,i}$  e  $k_{j,n}$ , que tratam o efeito das juntas, para simplificar, este método de conceção considera a influência das juntas na camada de isolamento e na camada que precede uma cavidade vazia. Para todas as outras camadas, deve ser considerado o valor unitário.

### 6.3. Resultados do método simplificado

Para validação deste método realizou-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos nos estudos paramétricos para os modelos construídos com gesso do tipo F e os

resultados obtidos aplicando o método simplificado aqui proposto nos modelos analisados nos estudos paramétricos. A tabela 15 apresenta os resultados obtidos pelo método simplificado dos tempos de resistência dos modelos apresentados nos estudos paramétricos, comparando os resultados dos cálculos com os resultados numéricos obtidos através das simulações. O valor  $\Delta t$  apresentado na tabela indica a diferença entre o resultado do método simplificado e o  $T_{max}$  obtido nos estudos numéricos.

Tabela 18 - Validação do método simplificado

Teste	Montante/ Distancia	Material/ Espessura camada 1	Material/ Espessura camada 2	Tmax NUM [min]	T Método simplificado [min]	$\Delta t$ [min]	$\Delta t$ [%]
A	C/500	Gesso Tipo F/12.5		73	72,46	-0,54	0,7%
C	C/500	Gesso Tipo F/16.0		100	93,19	-6,81	6,8%
E	C/500	Gesso Tipo F/12.5	Gesso Tipo F/12.5	173	193,33	20,33	11,8%
G	C/500	Gesso Tipo F/16.0	Gesso Tipo F 16.0	241	245,89	4,89	2,0 %
I	Sigma/450	Gesso Tipo F/12.5		74	72,46	-1,54	2,1%
K	Sigma/450	Gesso Tipo F/16.0		97	93,19	-3,81	3,9%
M	Sigma/450	Gesso Tipo F/12.5	Gesso Tipo F/12.5	177	193,33	16,33	9,2%
O	Sigma/450	Gesso Tipo F/16.0	Gesso Tipo F/16.0	247	245,89	-1,11	0,5%

Os valores dos cálculos obtidos através do método simplificado, apresentados na tabela 15, aproximam muito aos valores obtidos dos estudos numéricos, tendo obtido piores resultados nos modelos formados com duas placas de gesso de 12.5 mm de espessura nas camadas. Validando deste modo o método simplificado para obtenção de tempos teóricos de resistência ao fogo de paredes LSF.

Sendo que o método simplificado despreza o perfil do montante e tem em consideração apenas a composição das camadas de proteção, os resultados obtidos para os modelos com montantes em sigma são os mesmos obtidos, para o mesmo formato de camadas, nos modelos com montantes em C.

## 7. Conclusões

A presente investigação apresenta contributos relevantes para a otimização das medidas de segurança contra incêndio em paredes em Light Steel Framing (LSF), através da realização de simulações numéricas avançadas, da avaliação da aplicabilidade de um método de cálculo simplificado a paredes com montantes metálicos e da comparação rigorosa de diferentes metodologias de modelação. Foram analisadas diversas variáveis com influência no desempenho ao fogo das paredes LSF, nomeadamente o tipo de placa de gesso, o número de placas por face, bem como o tipo e o espaçamento dos perfis metálicos. Os resultados obtidos contribuem para o reforço do conhecimento técnico e para a melhoria das normas de segurança contra incêndio aplicáveis às práticas construtivas correntes.

Os resultados demonstram que o aumento do número de placas de gesso conduz a uma redução da temperatura máxima registada no lado não exposto, para um mesmo instante de tempo, evidenciando uma melhoria do desempenho térmico da parede. Verificou-se ainda que as paredes constituídas por placas de gesso do tipo X atingem temperaturas mais elevadas na face não exposta quando comparadas com paredes revestidas com gesso do tipo F. Estas diferenças são particularmente significativas nas configurações com duas placas de gesso em cada face, nas quais se observou uma redução do tempo de resistência ao fogo superior a 10 minutos relativamente às soluções com gesso do tipo F. Nos modelos com múltiplas camadas de placas de gesso, constatou-se que o tempo de resistência ao fogo aumenta proporcionalmente ao número de placas utilizadas.

Relativamente à influência do tipo de perfil dos montantes metálicos, conclui-se que esta variável não exerce um impacto significativo no tempo de resistência ao fogo, quando comparada com a influência do gesso.

No que diz respeito aos métodos numéricos aplicados, o método de solução 1 apresentou menores erros relativamente aos resultados experimentais, quando comparado com os métodos 2 e 3, revelando-se assim a abordagem mais adequada para aproximar os resultados obtidos nas simulações numéricas aos resultados dos ensaios experimentais.

## Referências

- [1] M. A. Sultan, “A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire,” *Fire Technol*, vol. 32, no. 3, pp. 239–259, 1996, doi: 10.1007/BF01040217.
- [2] G. Thomas, “Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures,” *Fire Mater*, vol. 26, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/fam.786>.
- [3] C. N. Ang and Y. C. Wang, “The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure,” *Constr Build Mater*, vol. 18, no. 7, pp. 505–515, Sep. 2004, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.04.003.
- [4] P. Keerthan and M. Mahendran, “Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions,” *Fire Saf J*, vol. 53, pp. 105–119, Oct. 2012, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2012.06.007.
- [5] P. Keerthan and M. Mahendran, “Thermal Performance of Composite Panels Under Fire Conditions Using Numerical Studies: Plasterboards, Rockwool, Glass Fibre and Cellulose Insulations,” *Fire Technol*, vol. 49, no. 2, pp. 329–356, 2013, doi: 10.1007/s10694-012-0269-6.
- [6] S. Gunalan and M. Mahendran, “Finite element modelling of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions,” *Eng Struct*, vol. 56, pp. 1007–1027, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.06.022.
- [7] M. K. P. M. Rusthi, A. Ariyanayagam, and Mahendran, *Numerical Studies of Gypsum Plasterboard and MgO Board Lined LSF Walls Exposed to Fire*. 2015. doi: 10.14264/uql.2016.544.
- [8] J. Vallee, “Reliability of Fire Barriers,” Jun. 02, 2016. Accessed: Oct. 12, 2025. [Online]. Available: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8876398>
- [9] Y. Tao and M. Mahendran, “Fire tests and thermal analyses of LSF walls insulated with silica aerogel fibreglass blanket,” *Fire Saf J*, vol. 122, p. 103352, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2021.103352.
- [10] Y. Tao, M. Mahendran, and A. Ariyanayagam, “Numerical study of LSF walls made of cold-formed steel hollow section studs in fire,” *Thin-Walled Structures*, vol. 167, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.108181.
- [11] P. Samiee, S. Esmaili Niari, and E. Ghandi, “Thermal and structural behavior of cold-formed steel frame wall under fire condition,” *Eng Struct*, vol. 252, p. 113563, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113563.
- [12] I. R. Upasiri, K. M. C. Konthesigha, S. M. A. Nanayakkara, K. Poologanathan, P. Gatheeshgar, and D. Perera, “Fire performance of lightweight concrete-filled LSF wall panels,” *Structures*, vol. 40, pp. 1039–1055, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2022.04.081.
- [13] D. Perera, K. Poologanathan, M. Gillie, P. Gatheeshgar, P. Sherlock, I.R. Upasiri, H. Rajanayagam, “Novel conventional and modular LSF wall panels with improved fire performance,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103612, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103612.

- [14] M. Peiris and M. Mahendran, “Numerical modelling of LSF walls under combined compression and bending actions and fire conditions,” *Thin-Walled Structures*, vol. 182, p. 110132, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.TWS.2022.110132.
- [15] S. T. Vy and A. T. Vu, “Fire resistance behaviour of non-load bearing LSF walls with restrained thermal elongation,” *J Constr Steel Res*, vol. 224, p. 109145, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.JCSR.2024.109145.
- [16] P. Kolarkar and M. Mahendran, “Experimental studies of non-load bearing steel wall systems under fire conditions,” *Fire Saf J*, vol. 53, pp. 85–104, 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.06.009.
- [17] “ISO 834-1 Fire-resistance tests-Elements of building construction-Part 1: General requirements,” 1999. [Online]. Available: [www.sis.se](http://www.sis.se).
- [18] “AS 1530.4 ‘Methods for fire tests on building materials, components and structures — Part 4: Fire-resistance tests for elements of construction,’” 2014, *Sydney*.
- [19] “NP EN 1363-1 ‘Ensaaios de resistência ao fogo — Parte 1: Requisitos gerais,’” 2020, *Lisboa*.
- [20] “EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design,” 1993.
- [21] “EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design,” 1995.
- [22] “EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,” 1991.
- [23] Y. Dias, P. Keerthan, and M. Mahendran, “Fire performance of steel and plasterboard sheathed non-load bearing LSF walls,” *Fire Saf J*, vol. 103, pp. 1–18, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.11.005.
- [24] A. Frangi, V. Schleifer, and M. Fontana, “Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies,” *Eng Struct*, vol. 32, no. 4, pp. 1184–1195, Apr. 2010, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2009.12.044.

## Anexos

## Anexo 1 – Método simplificado nos modelos A e I

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n}$$

Onde:

- $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i)$
- $t_{prot,0,i} = 30 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.2}$
- $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$
- $k_{pos,unexp,i} = 0.5 h_i^{0.15}$
- $t_{ins,n} = (t_{ins,0,i} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n)$
- $t_{ins,0,n} = 24 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.4}$

$h_i = 12.5\text{mm}$  (espessura da placa de gesso)

### Camada 1

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{12.5}{15}\right)^{1.2} = 24.10 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,1} = 1 - 0.6 \times \left(\frac{0}{t_{prot,0,1}}\right) = 1$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,1}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,1} = 1.36 \times k_{pos,exp,2} = 1.36$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1$$

$\Delta t_1 = 0$  – Não existe placas de gesso antes da camada 1

$$t_{prot,1} = (24.10 \times 1 \times 1.36 + 0) = 32.78 \text{ min}$$

### Camada 2

$$t_{ins,0,2} = 24 \left(\frac{12.5}{15}\right)^{1.4} = 18.59 \text{ min}$$

Sendo,  $\sum t_{prot,2-1} > \frac{t_{ins,0,2}}{2} \rightarrow 24.64 > \frac{18.59}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{t_{ins,0,2}}{\sum t_{prot,2-1}}}$

$$k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{18.59}{32.78}} = 0.38$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,n}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,2} = 1.36 \times k_{pos,exp,1} = 1.36 \times 0.38 = 0.51$$

Sendo  $t_{ins,0,1} = 26.23 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_2 = 0.22t_{prot,2-1} - 0.1t_{ins,0,2} + 4.7$

$$\Delta t_2 = 0.22 \times 32.78 - 0.1 \times 18.59 + 4.7 = 10.05 \text{ min}$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_n = 3\Delta t_n$

$$\Delta t_2 = 3 \times 10.05 = 30.16 \text{ min}$$

$$t_{ins,2} = 18.59 \times 0.51 + 30.16 = 39.68 \text{ min}$$

$$\mathbf{t_{ins} = 32.78 + 39.68 = 72.46 \text{ min}}$$

## Anexo 2 – Método simplificado nos modelos C e K

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n}$$

Onde:

- $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i)$
- $t_{prot,0,i} = 30 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.2}$
- $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$
- $k_{pos,unexp,i} = 0.5 h_i^{0.15}$
- $t_{ins,n} = (t_{ins,0,i} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n)$
- $t_{ins,0,n} = 24 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.4}$

$h_i = 16\text{mm}$  (espessura da placa de gesso)

### Camada 1

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{16}{15}\right)^{1.2} = 32.42 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,1} = 1 - 0.6 \times \left(\frac{0}{t_{prot,0,1}}\right) = 1$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,1}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,1} = 1.36 \times k_{pos,exp,2} = 1.36$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1$$

$\Delta t_1 = 0$  – Não existe placas de gesso antes da camada 1

$$t_{prot,1} = (32.42 \times 1 \times 1.36 + 0) = 44.09 \text{ min}$$

### Camada 2

$$t_{ins,0,2} = 24 \left(\frac{16}{15}\right)^{1.4} = 26.27 \text{ min}$$

Sendo,  $\sum t_{prot,2-1} > \frac{t_{ins,0,2}}{2} \rightarrow 24.64 > \frac{26.23}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{t_{ins,0,2}}{\sum t_{prot,2-1}}}$

$$k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{26.27}{44.09}} = 0.39$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,n}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,2} = 1.36 \times k_{pos,exp,1} = 1.36 \times 0.39 = 0.52$$

Sendo  $t_{ins,0,1} = 26.27 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_2 = 0.22t_{prot,2-1} - 0.1t_{ins,0,2} + 4.7$

$$\Delta t_2 = 0.22 \times 44.09 - 0.1 \times 26.27 + 4.7 = 11.77 \text{ min}$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_n = 3\Delta t_n$

$$\Delta t_2 = 3 \times 11.77 = 35.32 \text{ min}$$

$$t_{ins,2} = 26.27 \times 0.52 + 35.32 = 49.10 \text{ min}$$

$$t_{ins} = 44.09 + 49.10 = \mathbf{93.19 \text{ min}}$$

## Anexo 3 – Método simplificado nos modelos E e M

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n}$$

Onde:

- $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i)$
- $t_{prot,0,i} = 30 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.2}$
- $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$
- $k_{pos,unexp,i} = 0.5 h_i^{0.15}$
- $t_{ins,n} = (t_{ins,0,i} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n)$
- $t_{ins,0,n} = 24 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.4}$

$$h_i = h_1 + 0.8h_2$$

$$h_i = 12.5 + 0.8 \times 12.5 = 22.5$$

$$h_n = 12.5$$

$$t_{prot,0,1} = t_{prot,0,2} = t_{prot,0,3} = 30 \left(\frac{22.5}{15}\right)^{1.2} = 48.80 \text{ min}$$

$$t_{ins,0,4} = 24 \left(\frac{12.5}{15}\right)^{1.4} = 18.59 \text{ min}$$

### Camada 1

$$k_{pos,exp,1} = 1 - 0.6 \left(\frac{0}{t_{prot,0,1}}\right) = 1$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1$$

$\Delta t_1 = 0$  – Não existe placas de gesso antes da camada 1

$$t_{prot,1} = (48.80 \times 1 \times 1 + 0) = 48.80 \text{ min}$$

### Camada 2

$$\text{Sendo, } \sum t_{prot,2-1} > \frac{t_{prot,0,2}}{2} \rightarrow 48.80 > \frac{48.80}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,2} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,2}}{\sum t_{prot,2-1}}}$$

$$k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{48.80}{48.80}} = 0.50$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,i}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,2} = 1.36 \times k_{pos,exp,2} = 1.36 \times 0.50 = 0.68$$

$$k_{pos,unexp,2} = 0.5 \times 22.25^{0.15} = 0.80$$

Sendo  $t_{prot,0,2} = 48.80 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_2 = 0.22t_{prot,2-1} - 0.1t_{prot,0,2} + 4.7$

$$\Delta t_2 = 0.22 \times 48.80 - 0.1 \times 48.80 + 4.7 = 12.56$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_i = 3\Delta t_i$

$$\Delta t_3 = 3 \times 10.56 = 31.67 \text{ min}$$

$$t_{prot,2} = 48.80 \times 0.68 \times 0.80 + 31.67 = 58.14 \text{ min}$$

### Camada 3

Sendo,  $\sum t_{prot,3-1} > \frac{t_{prot,0,3}}{2} \rightarrow 106.94 > \frac{48.80}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,3}}{\sum t_{prot,3-1}}}$

$$k_{pos,exp,3} = 0.5 \times \sqrt{\frac{48.80}{106.94}} = 0.34$$

Considerando o efeito da cavidade vazia

$$k_{pos,exp,3} = 1.36k_{pos,exp,i} = 1.36 * 0.34 = 0.47$$

$$k_{pos,unexp,3} = 1$$

Sendo  $t_{prot,0,3} = 48.80 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_3 = 0.22t_{prot,3-1} - 0.1t_{prot,0,3} + 4.7$

$$\Delta t_3 = 0.22 \times 58.14 - 0.1 \times 48.80 + 4.7 = 12.61$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_i = 3\Delta t_i$

$$\Delta t_3 = 3 \times 12.61 = 37.83 \text{ min}$$

$$t_{prot,3} = 48.80 \times 0.46 \times 1 + 37.83 = 60.25 \text{ min}$$

### Camada 4

Para  $\sum t_{prot,4-1} > \frac{t_{ins,0,4}}{2} \rightarrow 167.19 > \frac{18.59}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,n} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\sum t_{prot,4-1}}}$

$$k_{pos,exp,4} = 0.5 \times \sqrt{\frac{18.59}{167.19}} = 0.17$$

Sendo  $t_{ins,0,4} = 18.59 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_n = 0.22t_{prot,4-1} - 0.1t_{ins,0,4} + 4.7$

$$\Delta t_4 = 0.22 \times 60.25 - 0.1 \times 18.59 + 4.7 = 16.10 \text{ min}$$

$$t_{ins,4} = 60.25 \times 0.17 \times 1 + 16.10 = \mathbf{26.14 \text{ min}}$$

$$t_{ins} = \mathbf{48.80 + 58.14 + 60.25 + 23.43 = 193.33 \text{ min}}$$

## Anexo 4 – Método simplificado nos modelos G e O

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n}$$

Onde:

- $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i)$
- $t_{prot,0,i} = 30 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.2}$
- $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$
- $k_{pos,unexp,i} = 0.5 h_i^{0.15}$
- $t_{ins,n} = (t_{ins,0,i} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n)$
- $t_{ins,0,n} = 24 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.4}$

$$h_i = h_1 + 0.8h_2$$

$$h_i = 16 + 0.8 \times 16 = 28.80$$

$$h_n = 16$$

$$t_{prot,0,1} = t_{prot,0,2} = t_{prot,0,3} = 30 \left(\frac{16}{15}\right)^{1.2} = 65.63 \text{ min}$$

$$t_{ins,0,4} = 24 \left(\frac{16}{15}\right)^{1.4} = 26.27 \text{ min}$$

### Camada 1

$$k_{pos,exp,1} = 1 - 0.6 \left(\frac{0}{t_{prot,0,1}}\right) = 1$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1$$

$\Delta t_1 = 0$  – Não existe placas de gesso antes da camada 1

$$t_{prot,1} = (65.63 \times 1 \times 1 + 0) = 65.63 \text{ min}$$

### Camada 2

$$\text{Sendo, } \sum t_{prot,2-1} > \frac{t_{prot,0,2}}{2} \rightarrow 65.63 > \frac{65.63}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,2} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,2}}{\sum t_{prot,2-1}}}$$

$$k_{pos,exp,2} = 0.5 \times \sqrt{\frac{65.63}{65.63}} = 0.50$$

Devido ao efeito causado pela cavidade vazia, o  $k_{pos,exp,i}$  deve ser modificado.

$$k_{pos,exp,2} = 1.36 \times k_{pos,exp,2} = 1.36 \times 0.50 = 0.68$$

$$k_{pos,unexp,2} = 0.5 \times 28.80^{0.15} = 0.83$$

Sendo  $t_{prot,0,2} = 65.63 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_2 = 0.22t_{prot,2-1} - 0.1t_{prot,0,2} + 4.7$

$$\Delta t_2 = 0.22 \times 65.63 - 0.1 \times 65.63 + 4.7 = 12.58$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_i = 3\Delta t_i$

$$\Delta t_3 = 3 \times 12.58 = 37.73 \text{ min}$$

$$t_{prot,2} = 65.63 \times 0.68 \times 0.83 + 37.73 = 74.66 \text{ min}$$

### Camada 3

Sendo,  $\Sigma t_{prot,3-1} > \frac{t_{prot,0,3}}{2} \rightarrow 140.29 > \frac{65.63}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,i} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,3}}{\Sigma t_{prot,3-1}}}$

$$k_{pos,exp,3} = 0.5 \times \sqrt{\frac{65.63}{140.29}} = 0.34$$

Considerando o efeito da cavidade vazia

$$k_{pos,exp,3} = 1.36k_{pos,exp,i} = 1.36 \times 0.34 = 0.47$$

$$k_{pos,unexp,3} = 1$$

Sendo  $t_{prot,0,3} = 65.63 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_3 = 0.22t_{prot,3-1} - 0.1t_{prot,0,3} + 4.7$

$$\Delta t_3 = 0.22 \times 74.66 - 0.1 \times 65.63 + 4.7 = 14.56$$

Considerando o efeito da cavidade vazia  $\Delta t_i = 3\Delta t_i$

$$\Delta t_3 = 3 \times 14.56 = 43.69 \text{ min}$$

$$t_{prot,3} = 65.63 \times 0.47 \times 1 + 43.69 = 74.21 \text{ min}$$

### Camada 4

Para  $\Sigma t_{prot,4-1} > \frac{t_{ins,0,4}}{2} \rightarrow 214.50 > \frac{26.27}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,n} = 0.5 \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\Sigma t_{prot,4-1}}}$

$$k_{pos,exp,4} = 0.5 \times \sqrt{\frac{26.27}{214.50}} = 0.17$$

Sendo  $t_{ins,0,4} = 26.27 \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_n = 0.22t_{prot,4-1} - 0.1t_{ins,0,4} + 4.7$

$$\Delta t_4 = 0.22 \times 74.21 - 0.1 \times 26.27 + 4.7 = 18.40 \text{ min}$$

$$t_{ins,n} = 74.21 \times 0.76 + 18.40 = 31.39 \text{ min}$$

$$t_{ins} = 65.63 + 74.66 + 74.21 + 31.39 = \mathbf{245.89 \text{ min}}$$