



Estruturas em madeira leve com cavidades internas submetidas ao fogo: validação numérica e analítica

MIGUEL ÂNGELO TEIXEIRA OSÓRIO

outubro de 2024

Estruturas em Madeira Leve com Cavidades Internas Submetidas ao Fogo: Validação Numérica e Analítica

Miguel Ângelo Teixeira Osório, Número 1180724

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Especialização em Construções Mecânicas

Orientador: Elza Maria Morais Fonseca

Júri:

Presidente:

Púria Esfandiari, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Cristina Calmeiro dos Santos, Professora Adjunta, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Elza Maria Morais Fonseca, Professora Coordenadora, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio e o contributo de diversas pessoas que de forma direta ou indireta me acompanharam ao longo desta jornada. A todos, expresso o meu mais sincero agradecimento por estarem presentes em diferentes fases deste percurso e por me proporcionarem a força e a motivação necessárias para alcançar este objetivo.

Em particular, gostaria de manifestar o meu profundo reconhecimento à Doutora Elza Maria Morais Fonseca, pela sua orientação, disponibilidade e paciência ao longo deste trabalho. A sua partilha de conhecimento, experiência e visão crítica foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação e para o meu crescimento académico e profissional.

Aos meus pais, agradeço por todo o amor, apoio e confiança que depositaram em mim. O vosso exemplo, dedicação e constante presença foram fundamentais para que eu pudesse perseguir os meus objetivos com coragem e determinação.

Ao meu irmão, pela amizade, companheirismo e encorajamento que sempre me transmitiu, proporcionando-me momentos de leveza e equilíbrio ao longo deste percurso.

Aos meus avós, por serem pilares fundamentais da minha vida, pelo afeto com que sempre me brindaram e pelo exemplo que transmitem ao longo dos anos.

À minha madrinha e à minha afilhada, pelo carinho e apoios constantes, e por estarem sempre ao meu lado em momentos importantes, contribuindo de forma especial para o meu bem-estar e motivação.

Aos meus amigos, agradeço pelo companheirismo, pela partilha de momentos de descontração e pela força que me transmitiram ao longo deste processo.

A todos o meu Obrigado!

Resumo

A madeira, ao longo de séculos, tem sido um dos materiais mais utilizados pela humanidade, especialmente na engenharia e construção de edifícios. Apesar do surgimento de regulamentações mais rigorosas no projeto, na construção e na segurança contra incêndio, a utilização da madeira continua a ser um material que exige critérios bem definidos, uma vez que é de utilização muito atrativa e abrangente. A madeira é um material cujas propriedades variam significativamente sob diferentes condições de humidade, temperatura e carga aplicada. É por isso, um material vulnerável a alterações quando exposta a elevadas temperaturas, como as que ocorrem em situações de incêndio. Quando a madeira é exposta ao fogo, as suas propriedades degradam-se progressivamente, levando à carbonização do material. Este processo de carbonização, embora crie uma camada protetora que isola o núcleo interno da madeira, resulta na diminuição da secção resistente, comprometendo, assim, a resistência ao fogo dos elementos construtivos. A avaliação do comportamento da madeira sob tais condições pode ser feita através de ensaios experimentais, utilização de modelos analíticos e, mais recentemente, através de modelos numéricos. Os modelos numéricos oferecem uma vantagem significativa, especialmente quando há dificuldades na realização de testes experimentais ou quando as aproximações dos métodos analíticos não são suficientes. Esses modelos permitem uma verificação mais detalhada, alargada e paramétrica de diferentes elementos construtivos sob diferentes condições, inclusive sob a ação do fogo. Nesta dissertação, exploram-se temas para a investigação de modelos construtivos em madeira leve, com placas de gesso e com cavidades internas: o estudo das propriedades dos materiais envolvidos, a ação do fogo, a interação do fogo entre os elementos construtivos, e as metodologias utilizadas na avaliação da resistência ao fogo. A avaliação da resistência ao fogo incluí uma revisão das normas europeias, os eurocódigos, e a literatura científica relevante. Numa primeira fase deste trabalho, desenvolveram-se seis modelos numéricos construtivos em madeira leve, divididos em dois grupos: os modelos com cavidade interna sem isolamento e os modelos com as cavidades preenchidas com isolamento. A validação dos resultados é baseada na análise da evolução das temperaturas, e na aplicação do critério de isolamento térmico conforme a norma EN 1363-1. Numa segunda fase, obtiveram-se os tempos de resistência ao fogo dos modelos. Com base nas diferentes simulações, compararam-se os resultados e verificou-se que o tempo de resistência ao fogo diminui no grupo dos modelos com cavidade vazia, em relação ao grupo de modelos com a cavidade preenchida com isolamento. Também, é possível aferir que dentro do mesmo grupo de modelos, o tempo de resistência ao fogo diminui, quando se utilizam parafusos de aço para fixar a placa de gesso à madeira. Por fim, aplicou-se um método de cálculo simplificado, obtido experimentalmente, por Frangi et. al, na análise da resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira protegidos. A comparação de resultados com os obtidos numericamente, demonstrou que a equação simplificada é conservadora, uma vez que o rácio calculado foi sempre próximo nos diferentes modelos desenvolvidos deste estudo.

Palavras-chave: Madeira, Gesso, Isolamento, Resistência ao Fogo

Abstract

Wood has been one of the most widely used materials by humanity for centuries, especially in engineering and building construction. Despite the emergence of more rigorous regulations for design, construction and fire safety, the use of wood remains a material that requires well defined criteria as it very attractive and comprehensive use. However, wood is a material whose properties vary significantly under different conditions of moisture content, temperature, and applied loading conditions. It is therefore a material vulnerable to changes when exposed to high temperatures, such as those that occur in fire situations. When wood is exposed to fire, its properties progressively degrade, leading to charring. Although this charring process creates a protective layer that insulates the inner core of the wood, results in a reduction in the cross-section, thus compromising the fire resistance of structural elements. The assessment of wood behavior under such conditions can be carried out through experimental tests, the use of analytical models, and, more recently, through numerical models. Numerical models offer a significant advantage, particularly when experimental tests are difficult to carry out or when the approximations of analytical methods are insufficient. These models allow for a more detailed, expanded and a parametric verification of the different wooden structural elements under different conditions, including under the fire action. In this dissertation, different topics are explored for the investigated of wooden light constructive models, with gypsum plasterboard and with internal cavities: the study of the material properties involved, the fire action, the fire interaction between the constructive elements, and the methodologies used to evaluate fire resistance. The fire resistance assessment includes a review of European standards, Eurocodes, and relevant scientific literature. In the first step of this work six structural models were developed, divided into two groups: the structural models with empty cavities and the models with cavities filled with insulation. These models will be analyzed numerically. The validation of the results is based on the analysis of the temperature evolution and the application of the thermal insulation criterion according to standard EN 1363-1. In the second phase, the fire resistance of the models was obtained. Based on the different simulations, the results were compared, and it was found that the fire resistance time decreases when comparing the models with empty cavities to the group with filled cavities. It is also noticeable that within the same group, the fire resistance time decreases when steel screws are used to fix the plasterboard to the wood. Finally, a simplified calculation method was applied, obtained experimentally by Frangi et al. for fire resistance analysis of constructive wooden elements protected by gypsum. Comparison of results with those obtained numerically demonstrated that the simplified equation is conservative, since the calculated ratio was always close in all different developed models in this study.

KEYWORDS: Wood, Gypsum, Insulation, Fire Resistance

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Soluções construtivas de estruturas leves em madeira.....	3
1.5. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1. A regulamentação europeia.....	7
2.2. Resistência ao fogo.....	7
2.2.1. Critérios de resistência ao fogo	7
2.2.1.1. Capacidade de carga.....	8
2.2.1.2. Isolamento	8
2.2.1.3. Integridade	9
2.2.2. Carbonização.....	9
2.2.3. Curvas de incêndio padrão	10
2.3. Propriedades Térmicas dos Materiais utilizados.....	11
2.3.1. Madeira	11
2.3.1.1. Massa volúmica	12
2.3.1.2. Calor Específico.....	14
2.3.1.3. Condutividade Térmica.....	14
2.3.2. Gesso.....	15
2.3.2.1. Massa volúmica	16
2.3.2.2. Calor específico.....	16
2.3.2.3. Condutividade Térmica.....	17
2.3.3. Aço	18
2.3.3.1. Calor específico.....	18
2.3.3.2. Condutividade térmica	19
2.3.4. Isolamento para as cavidades.....	19
2.3.4.1. Lã de rocha	20
2.3.4.2. Lã de vidro	20
2.4. Análise térmica.....	21
2.4.1. Modos de transferência de calor	21
2.4.1.1. Condução	21
2.4.1.2. Convecção.....	22
2.4.1.3. Radiação	22
2.5. Métodos analíticos	23
2.5.1. Método simplificado para a resistência ao fogo.....	23

2.6. Testes em Laboratório	28
2.7. Métodos numéricos	32
2.8. Formulação de Elementos Finitos	33
3. Análise Térmica.....	37
3.1. Modelos de divisórias de paredes.....	37
3.2. Aplicação do Método de Elementos Finitos.....	40
3.3. Condições de fronteira	42
4. Resultados e Discussão	51
4.1. Critério de Isolamento Térmico na Avaliação da Resistência ao Fogo.....	51
4.1.1. MODELO CAV	52
4.1.2. Modelo CAV_SR	53
4.1.3. Modelo CAV_CR.....	54
4.1.4. Modelo ISOL1.....	56
4.1.5. Modelo ISOL_SR1	57
4.1.6. Modelo ISOL_CR1	58
4.1.7. Comparação da Resistência ao fogo dos modelos.....	59
5. Aplicação do Método Simplificado	61
5.1. Modelo com Cavidade vazia.....	61
5.2. Modelo com Cavidade com Isolante de Lã de Vidro.....	63
5.3. Comparação de Resultados.....	64
6. Conclusão	67
6.1. Conclusões finais	67
6.2. Trabalhos futuros	68

Lista de Figuras

Figura 1 – Classificação de diferentes estruturas em madeira [8].....	3
Figura 2 – Estruturas leves em madeira: a) constituição da estrutura b) aplicação de uma divisória, adaptada de [8]	4
Figura 3 – Constituição de materiais em estruturas leves fabricadas [8]	4
Figura 4 – Degradação térmica da madeira [4].....	9
Figura 5 - Diferentes curvas de incêndio.....	11
Figura 6 - Direções principais, adaptada de [19].....	12
Figura 7 -Massa volúmica, em função da temperatura das madeiras GL24H e GL32H.....	13
Figura 8 -Calor específico da madeira, em função da temperatura	14
Figura 9 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura	15
Figura 10 - Massa volúmica do gesso do tipo F, em função da temperatura	16
Figura 11 – Calor específico do gesso tipo F, em função da temperatura.....	17
Figura 12 – Condutividade térmica do gesso tipo F, em função da temperatura	17
Figura 13 -Calor específico do aço, em função da temperatura.....	19
Figura 14 -Condutividade térmica do aço, em função da temperatura	19
Figura 15 - Transferência de calor unidimensional por condução [36]	22
Figura 16 - Camada-limite na transferência de calor por convecção, adaptada de [36].....	22
Figura 17 - Troca por radiação: (a) numa superfície e (b) entre uma superfície e uma vizinhança [36].....	23
Figura 18 – Diferentes camadas numa estrutura em madeira de acordo com o método simplificado, adaptada de [33]	24
Figura 19 -Evolução da temperatura no lado não exposto ao fogo de diferentes placas de gesso com 15 mm de espessura (GF – placas de fibra de gesso; GP – placas de gesso cartonado), adaptada de [33].....	30
Figura 20 – a) Evolução da temperatura nos testes ao fogo V2 e V4 b) Posição dos termopares nos testes V2 e V4 (LR – Lã de Rocha e FM- Fibra de madeira), adaptada de [33]	30
Figura 21 - Tempo necessário para um aumento de temperatura de 250°C e 270°C no lado não exposto ao fogo de placas de gesso com 15 mm de espessura, testadas como uma única placa ou com suporte de materiais diferentes (GF- Gesso tipo F), adaptada de [33].....	31
Figura 22 – Modelo de paredes divisórias	38
Figura 23 - Dimensões dos modelos	38
Figura 24 - Parafusos de ligação entre placa de gesso e madeira	39
Figura 25 - Elemento finito PLANE55: a) quatro nós, b) três nós	41
Figura 26 -Elemento finito SURF151	41
Figura 27 - Elemento finito LINK34	42
Figura 28 -Condições de Fronteira	43
Figura 29 - Modelo numérico CAV	44
Figura 30 - Modelo numérico CAV_CR.....	44
Figura 31 - Modelo numérico CAV_SR	44
Figura 32 - Modelo numérico ISOL.....	45

Figura 33 - Modelo numérico ISOL_CR	45
Figura 34 - Modelo numérico ISOL_SR.....	45
Figura 35 - Modelo numérico ISOL1 e as suas condições de fronteira	46
Figura 36 - Modelo numérico ISOL_CR1 e as suas condições de fronteira.....	46
Figura 37 - Modelo numérico ISOL_SR1 e as suas condições de fronteira	46
Figura 38 - Curva de temperatura de um nó do interior da cavidade do modelo ISOL.....	47
Figura 39 - Curva de temperatura de um nó do interior da cavidade do modelo ISOL_CR.....	47
Figura 40 - Curva de temperatura de um nó da cavidade do modelo ISOL_SR	48
Figura 41 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV.....	48
Figura 42 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV_CR	49
Figura 43 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV_SR.....	49
Figura 44 - Curvas de temperaturas para os modelos ISOL1, ISOL_SR1 e ISOL_CR1.....	50
Figura 45 - Pontos nodais a considerar para calcular o valor de isolamento térmico	52
Figura 46 – Critério de isolamento térmico do modelo CAV	52
Figura 47 - Campo de temperatura do modelo CAV ao fim 269 minutos	53
Figura 48 - Critério de isolamento térmico do modelo CAV_SR	54
Figura 49 - Comportamento térmico do modelo CAV_SR ao fim dos 198,2 minutos	54
Figura 50 - Critério de isolamento térmico do modelo CAV_CR.....	55
Figura 51 -Comportamento térmico do modelo CAV_CR ao fim de 194,5 minutos.....	55
Figura 52 – Critério de resistência ao fogo do modelo ISOL1	56
Figura 53 - Comportamento térmico do modelo ISOL1 ao fim de 223 minutos	56
Figura 54 - Critério de Resistência ao fogo do modelo ISOL_SR1	57
Figura 55 - Comportamento térmico do modelo ISOL_SR1 ao fim de 154 minutos	57
Figura 56 - Critério de resistência ao fogo do modelo ISOL_CR1	58
Figura 57 - Comportamento térmico do modelo ISOL_CR1 ao fim de 149,7 minutos	58
Figura 58 – Modelo com a cavidade vazia	61
Figura 59 – Modelo com cavidade preenchida por lã de vidro.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 -Velocidade de carbonização para diferentes tipos de madeira, adaptada de [11] ...	10
Tabela 2 - Coeficientes da massa volúmica da madeira em função da temperatura, adaptado de [11].....	13
Tabela 3 - Propriedades térmicas da lã de rocha com uma massa volúmica superior a 26 kg/m ³ [34]	20
Tabela 4 -Propriedades térmicas da lã de vidro para uma massa volúmica superior a 15kg/m ³	20
Tabela 5 – Equações para os valores básicos de isolamento e proteção para diferentes materiais, adaptada de [33].....	25
Tabela 6 – Equações para o cálculo dos coeficientes de posição de proteção e isolamento para diferentes materiais, adaptada de [33]	25
Tabela 7 -Correção dos tempos Δt_n e Δt_i para camadas protegidas com gesso na base dos elementos de suporte [33]	26
Tabela 8 - Correção dos tempos Δt_n e Δt_i para camadas protegidos com gesso em soluções das divisórias [33]	26
Tabela 9 – Coeficiente de posição $k_{pos, unexp, i}$ [33].....	27
Tabela 10 – Modificação dos coeficientes de posição $k_{pos, unexp, i}$ e $k_{pos, exp, i}$ e do tempo de correção Δt_i pela influência da cavidade vazia, adaptada de [33].....	27
Tabela 11 – Coeficiente de ligação $k_{j, n}$ e $k_{j, i}$ [33]	28
Tabela 12 -Tempo de isolamento para diferentes soluções, adaptada de [33]	31
Tabela 13 – Modelos de divisórias de paredes usados neste estudo	37
Tabela 14 – Resistência ao fogo obtidas pelas diferentes análises	65

Acrónimos e Símbolos

Lista de Siglas ou Acrónimos

CLT	<i>Cross- Laminated Timber</i>
E	Integridade
EN	European Standard
GLT	Glued-Laminated Timber
I	Isolamento Térmico
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
R	Capacidade de Carga

Lista de Símbolos

C	Deslocamento de contração vertical	mm
C_{lim}	Deslocamento de contração vertical limite	mm
C_p	Calor específico	J/KgK
d	Espessura da secção transversal do elemento	mm
d_0	Profundidade média para a linha de carbonização	mm
$d_{char,0}$	Evolução Linear de material carbonizado	mm
$d_{char,n}$	Evolução linear de material carbonizado, considerando arredondamentos	mm
d_{ef}	Profundidade efetiva de carbonização	mm
D	Deflexão	mm
d_0	Deflexão máxima	mm
$k_{pos,exp,n}$ e $k_{pos,exp,i}$	Coefficientes de posição das camadas, tendo em conta o lado exposto ao fogo	Adimensional
$k_{pos,unexp,i}$	Coefficiente de posição das camadas, tendo em conta o lado não exposto ao fogo	Adimensional
$k_{j,i}$ e $k_{j,n}$	Coefficientes para juntas de união	Adimensional
$\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$	Soma dos tempos de proteção das camadas, na direção do fluxo de calor, que precedem a última camada do modelo no lado não exposto ao fogo	min
$t_{prot,0,i}$	Valor básico de resistência ao fogo das camadas de proteção	min

$t_{ins,n}$	Tempo de isolamento garantido pela última camada do modelo no lado não exposto ao fogo	min
$t_{ins,0,n}$	Valor básico de resistência ao fogo das camadas de isolamento	min
T	Temperatura	°C ou K
$T_{máx}$	Temperatura máxima pontual na superfície não exposta ao fogo	°C ou K
$T_{méd}$	Temperatura média na superfície não exposta ao fogo	°C ou K
Δt_i e Δt_n	Tempo de correção para camadas protegidas com gesso	min
ρ	Massa volúmica	Kg/m ³
λ	Condutividade térmica do material	W/mK
ω	Teor de humidade	%

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

O tema proposto para elaboração da presente dissertação tem como objetivo fundamental a avaliação de estruturas de madeira leve, com cavidades internas, sujeitas a condições de incêndio.

Atualmente, o combate às alterações climáticas é um dos principais objetivos que o mundo tem pela frente. A ONU (Organização das Nações Unidas) no Acordo de Paris, compromete-se a combater este problema propondo medidas, entre as quais a utilização de novas tecnologias. Nas novas soluções tecnológicas, os materiais e as metodologias utilizadas em estruturas devem ser amigas do ambiente [1]. Deste modo, a utilização da madeira como elemento estrutural, enquadra-se como uma das opções, entre os materiais amigos do ambiente.

As soluções construtivas de madeira leve são constituídas por vigas de madeira maciça protegidas com placas de gesso cartonado. Na junção destes materiais, existem cavidades de ar internas, que poderão ser ou não preenchidas por materiais isolantes [2]. A união das vigas de madeira maciça e as placas de gesso são efetuadas por ligações em aço, utilizando por exemplo, cavilhas ou parafusos.

No entanto, a madeira quando submetida ao fogo é combustível, pelo que a sua utilização é limitada no cumprimento da regulamentação e das normas para estas estruturas [3]. Acresce que, a madeira após a exposição ao fogo apresenta uma camada carbonizada. Esta camada tem influência na propagação do fogo ao restante material, atuando como proteção ao interior da madeira. O carvão é um isolante térmico e retarda o fluxo de calor para o interior do material, diminuindo a velocidade da degradação térmica e retardando o avanço da carbonização [4].

Por outro lado, a madeira carbonizada é uma técnica oriundo do Japão, sendo já uma tendência mundial na decoração. Entre outros aspetos, a tonalidade escura melhora as características da madeira e aumenta a sua resistência às intempéries [5].

De acordo com a regulamentação, a resistência ao fogo da madeira, deve ser verificada através do cumprimento de critérios, a capacidade de carga (R), o isolamento (I) e a integridade (E) [6].

Desta forma, há a necessidade na avaliação do comportamento destas estruturas quando sujeitas ao fogo, para que seja possível a utilização das mesmas em segurança.

Para a avaliação e o cumprimento das regras de segurança, na utilização destes elementos construtivos, devem ser utilizadas metodologias rigorosas de análise. O recurso a modelos de

Introdução

calculos numérico e nos modelos analíticos, têm um papel fundamental na utilização de métodos avançados que assegurem a validação destas estruturas leves de madeira quando sujeitas à ação do fogo.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a validação numérica e analítica das estruturas leves em madeira. Na concretização do objetivo principal desta dissertação, serão realizados diferentes objetivos específicos:

- Projetar e estudar modelos construtivos que utilizem aglomerado de madeira como material de suporte, protegidos com placas de gesso que formam uma caixa de ar. Este estudo será conduzido com base nas normas e orientações do Eurocódigo 5.
- Analisar o comportamento térmico dos modelos construtivos quando expostos à ação do fogo, seguindo as condições de incêndio padrão definidas pelo Eurocódigo 1. Esta avaliação permitirá compreender melhor a resposta dos materiais e das estruturas durante um incêndio.
- Determinar os tempos de resistência ao fogo dos elementos em estudo, quando expostos a condições de incêndio. Esta etapa pode envolver a realização de ensaios experimentais e/ou simulações numéricas para obter dados precisos sobre a resistência ao fogo dos modelos desenvolvidos.
- Estabelecer correlações de dados que possam ser utilizadas na avaliação da resistência ao fogo de elementos construtivos semelhantes. Estas correlações visam fornecer informações úteis e práticas para o projeto e dimensionamento de estruturas em aglomerado de madeira protegidas com placas de gesso, contribuindo para a melhoria das práticas de construção e segurança contra incêndios.

Ao atingir estes objetivos, espera-se contribuir significativamente para o conhecimento e desenvolvimento de estruturas em aglomerado de madeira protegidas com gesso, promovendo a sua utilização segura e eficaz em situações de exposição ao fogo.

1.3. Metodologia

Para atingir os objetivos específicos propostos, adotou-se a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica dos materiais estruturais e a aplicabilidade em construção com exigências regulamentares de resistência ao fogo;
- Compreensão da propagação de uma ação de incêndio em estruturas e dos critérios de resistência ao fogo definidos pela regulamentação europeia;
- Análise dos Eurocódigos aplicáveis ao projeto de elementos construtivos de madeira a elevadas temperaturas;

- Estudo dos modos de transferência de calor e a sua relação com a ação do fogo, no âmbito da análise térmica em regime transiente a desenvolver;
- Pesquisa bibliográfica de métodos analíticos, experimentais e numéricos, para avaliação do comportamento ao fogo de elementos de madeira com proteção em gesso, na compreensão de estudos já realizados e na verificação da necessidade do incremento de soluções construtivas com segurança de projeto;
- Estudo e análise de modelos construtivos e validação numérica com base em elementos finitos, considerando uma análise térmica não linear em regime transiente, para obtenção da resistência ao fogo;
- Aplicação e estudo do critério de isolamento térmico de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [6];
- Aplicação e análise de um método simplificado para o cálculo analítico da resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira com proteção.

1.4. Soluções construtivas de estruturas leves em madeira

Na construção em madeira existem dois grandes tipos de soluções construtivas, entre as quais os sistemas estruturais maciços e os sistemas estruturais leves. Nestes dois sistemas estruturais existem diferentes ramos de soluções que são apresentados na Figura 1 [7].

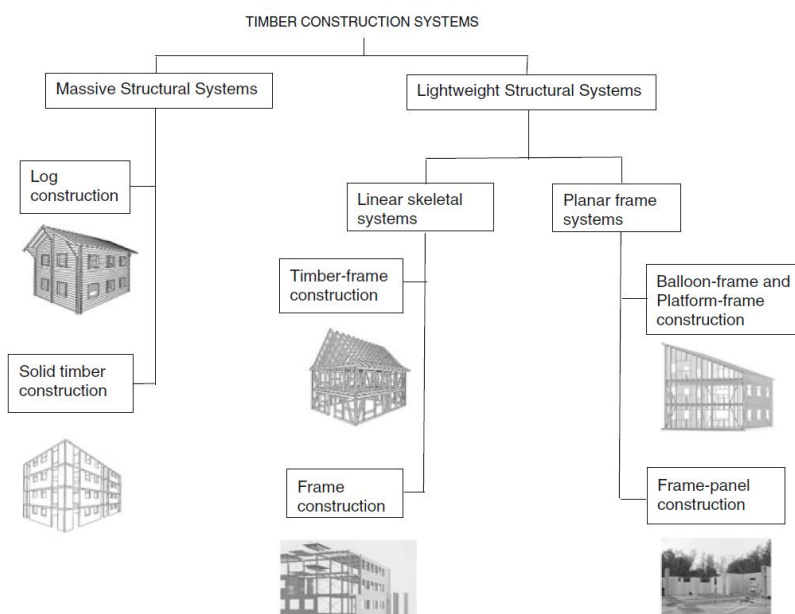


Figura 1 – Classificação de diferentes estruturas em madeira [8]

No início da década de 1980, descobriu-se que as estruturas leves em madeira apresentavam vantagens em relação às restantes no isolamento térmico, uma vez que, em função do modelo construtivo, podem formar cavidades internas onde se incluem materiais adicionais isolantes térmicos [9], Figura 2 e Figura 3.

Introdução

Assim, estes elementos estruturais são constituídos por vigas de madeira maciça protegidas por placas de gesso cartonado, placas de fibra de gesso, placas derivadas da madeira, ou pela combinação dos revestimentos anteriores. E as cavidades internas podem ser vazias ou preenchidas por lã de rocha, fibra de vidro, fibra de madeira, por exemplo [10].

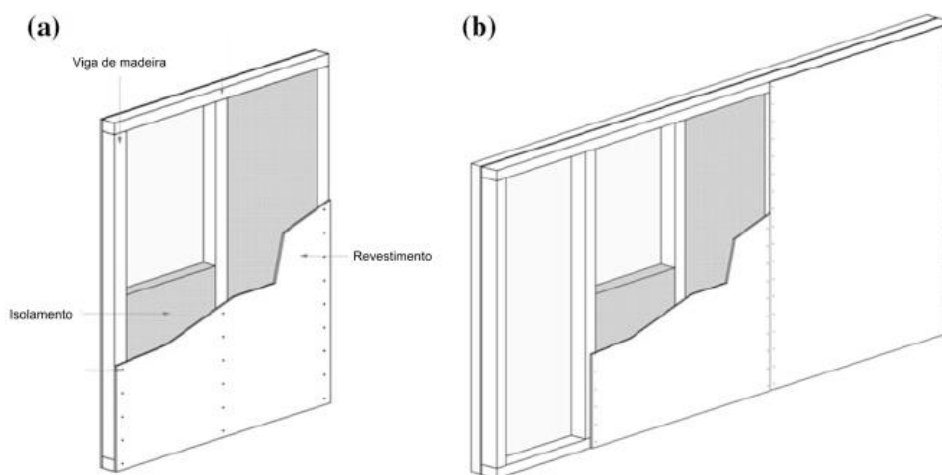


Figura 2 – Estruturas leves em madeira: a) constituição da estrutura b) aplicação de uma divisória, adaptada de [8]



Figura 3 – Constituição de materiais em estruturas leves fabricadas [8]

1.5. Estrutura da dissertação

O presente relatório segue a seguinte estrutura: introdução, revisão bibliográfica, modelos desenvolvidos, validação numérica, novo método para os modelos com isolamento, aplicação do método simplificado e conclusões.

No presente capítulo, realizou-se uma introdução ao tema, referindo os principais objetivos da dissertação, a metodologia utilizada para o desenvolvimento e uma apresentação de soluções construtivas de estruturas leves em madeira.

No segundo capítulo, referente à revisão bibliográfica, foram abordadas diversas temáticas. O capítulo foi dividido em subcapítulos. Inicialmente, abordaram-se as regulamentações europeias. Posteriormente, abordou-se a resistência ao fogo dando relevância aos critérios, à carbonização e às curvas de incêndio padrão. Ainda no mesmo capítulo, apresentam-se as propriedades térmicas dos materiais utilizados e a análise térmica, na qual são referidos os modos de transferência de calor. Por fim, são abordados os métodos analíticos conhecidos, os testes em laboratórios, os métodos numéricos realizados e a formulação de elementos finitos.

No terceiro capítulo, desenvolveram-se os modelos para a validação numérica e analítica, com a respetiva aplicação dos elementos finitos e as condições de fronteira na análise numérica.

No quarto capítulo, elaborou-se a validação numérica dos modelos desenvolvidos, para avaliar a resistência ao fogo. A validação destes modelos é justificada pela apresentação de resultados obtidos para os campos de temperatura e o critério de isolamento térmico e a comparação dos valores de resistência ao fogo entre os modelos desenvolvidos.

No quinto capítulo, aplica-se o método simplificado para os modelos construtivos desenvolvidos. Para além disto, faz-se a comparação dos resultados obtidos na validação numérica e analítica.

No último capítulo, apresentam-se as conclusões finais e trabalho futuros, tendo como base os estudos desenvolvidos.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A regulamentação europeia

A regulamentação, apoiada em normas, é utilizada como principal suporte no estabelecimento dos objetivos da presente dissertação. Em relação à segurança contra incêndios, a regulamentação europeia apresenta um conjunto de diretivas importantes:

- EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General- Common rules and rules for buildings [11]
- EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire [12]
- EN 1363-1: Fire resistance tests. Part 1: General Requirements [6]
- ISO 834: Fire resistance tests – Elements of buildings construction. Part 1: General Conditions [13]

2.2. Resistência ao fogo

A resistência ao fogo é a “capacidade de uma estrutura, de parte de uma estrutura ou de um elemento para desempenhar as funções pretendidas (função de suporte de cargas e/ou função de compartimentação) para um nível de carga específico, quando sujeita a uma situação de incêndio específica e durante um período de tempo especificado”, segundo EC1 EN1991-1-2 [12].

2.2.1. Critérios de resistência ao fogo

De acordo com a norma EN 1363-1 [6], a resistência ao fogo deve verificar individualmente os seguintes critérios: capacidade de carga (R), isolamento (I) e integridade (E). No entanto, esta norma ainda possui duas regras [6]:

- Os critérios de integridade e de isolamento devem ser considerados não cumpridos se a capacidade de carga deixar de ser verificada
- O critério de isolamento deixa de ser cumprido assim que o critério de integridade deixar de ser verificado

2.2.1.1. Capacidade de carga

A capacidade de carga é o tempo, em minutos, durante o qual a amostra continua a manter a sua capacidade de suportar a carga durante a exposição ao fogo.

Os elementos construtivos que estão sujeitos à flexão e sob a ação do fogo, a falha da estrutura acontece quando são atingidos os valores de pelos menos uma das equações 1 e 2 [6]:

$$D \geq 1,5 \times D_{lim} \quad (1)$$

$$D > D_{lim} \wedge \left(\frac{dD}{dt}\right) > \left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} \quad (2)$$

onde D_{lim} é a deflexão máxima e $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$ é a taxa de deflexão máxima, que se calculam pelas equações 3 e 4, respetivamente:

$$D_{lim} = \frac{L^2}{400d} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = \frac{L^2}{9000d} \quad (4)$$

Nas equações anteriores, L representa o comprimento do vão do elemento em mm e d a espessura da secção transversal do elemento em mm.

Por outro lado, quando os elementos estão submetidos a esforços axiais e expostos ao fogo, a falha da estrutura ocorre quando é atingido o valor limite do deslocamento de contração vertical (equação 5) ou o valor da taxa limite de deslocamento de contração vertical (equação 6) [6]:

$$C_{lim} = \frac{h}{100} \quad (5)$$

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{lim} = \frac{3h}{1000} \quad (6)$$

Onde h representa a altura do provete de teste no instante, imediatamente depois da aplicação da carga, em mm.

2.2.1.2. Isolamento

A capacidade de isolamento de uma solução construtiva, exposta ao fogo de um lado, é impedir o aumento da temperatura da superfície não exposta ao fogo a níveis abaixo dos especificados [6].

De acordo com a norma EN 1363-1 [6], para que seja cumprida a resistência ao fogo deste critério é necessário verificar qual o menor tempo para as duas situações seguintes [6]:

- A temperatura média da superfície não exposta ao fogo atingir um aumento médio de temperatura ($T_{méd}$) de 140°C, em relação à temperatura inicial (T_0)

$$T_{méd} = T_0 + 140 \quad (7)$$

- A temperatura máxima da superfície não exposta ao fogo atingir num ponto um aumento de temperatura ($T_{máx}$) de 180°C, em relação à temperatura média inicial (T_0)

$$T_{máx} = T_0 + 180 \quad (8)$$

2.2.1.3. Integridade

A verificação do critério de integridade de uma solução construtiva, exposta ao fogo de um lado, é impedir a passagem de chamas, gases quentes e também de impedir a ocorrência de chamas no lado não exposto ao fogo [6].

Para a validação deste critério a norma EN 1363-1 [6], explícita que se deve verificar a ignição de um modelo experimental de algodão; existência de fissuras ou poros de determinadas dimensões ou ocorrência de uma chama do lado não exposto ao fogo [6].

2.2.2. Carbonização

A madeira quando está exposta ao fogo e ao ar queima, ou seja, iniciando-se a degradação térmica da mesma, Figura 4. Este processo de degradação inicia com a pirólise. Neste processo ocorre a libertação de voláteis e ocorre a fase de carbonização [14].

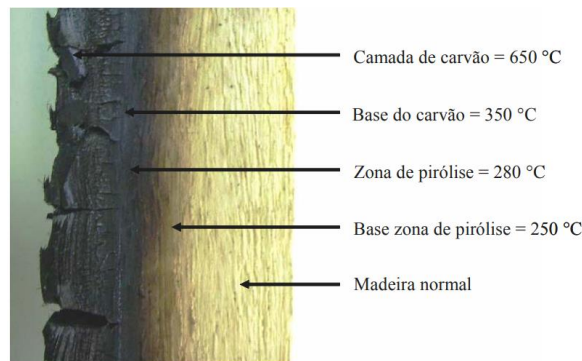


Figura 4 – Degradação térmica da madeira [4]

Com o aumento da temperatura, a camada de carbono já formada tem tendência a aumentar a espessura na direção perpendicular à superfície. Deste modo, a secção residual da madeira irá diminuir até uma zona limite [15]. Com isto, existirá uma zona de interface entre a madeira carbonizada e a não carbonizada. Esta transição verifica-se a uma temperatura de 300°C [16].

Por outro lado, é necessário avaliar a velocidade de carbonização da madeira, uma vez que a zona carbonizada não tem capacidade de carga.

Segundo o Eurocódigo EC5 EN1995-1-2[11], o cálculo da profundidade de carbonização unidimensional ($d_{char,0}$), em mm, para superfícies não protegidas por material isolante é obtida pelo produto da velocidade de carbonização unidimensional (β_0), em mm/min, pelo tempo de exposição ao fogo (t), em min, representado na equação 9 [11]:

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (9)$$

Para o cálculo da profundidade de carbonização nocional ($d_{char,n}$), em mm, isto é, quando o processo de degradação térmica da madeira apresentar fissuras ou arredondamentos da superfície, utiliza-se a equação 10 [11]:

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (10)$$

Ainda no EC5 EN 1995-1-2 são apresentados os valores da velocidade de carbonização de diferentes tipos de madeira, apresentados na Tabela 1 [11].

Tabela 1 -Velocidade de carbonização para diferentes tipos de madeira, adaptada de [11]

Tipos de Madeira	Material	β_0	β_n
Softwood	MLC, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madeira Maciça, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
Hardwood	MLC ou Madeira Maciça, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	MLC ou Madeira Maciça; $\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
LVL	LVL, $\rho \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Painéis	Painéis de madeira	0,9 ^a	-
	Painéis de madeira orientada	1,0 ^a	-
	Painéis à base de madeira exceto os painéis de madeira orientada	0,9 ^a	-

^a Estes valores aplicam-se a uma massa volúmica de 450 kg/m^3 e a uma espessura de 20 mm; MLC- Madeira Laminada Colada; LVL- *Laminated veneer lumber*

Para o caso de outros painéis, com valores de massa volúmica ou espessura diferentes aos referidos na Tabela 1, o cálculo da velocidade de carbonização unidimensional deve ser calculado com base nas seguintes equações [11]:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \times k_\rho \times k_h \quad (11)$$

com

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (12)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (13)$$

Nas equações 12 e 13 o valor de ρ_k representa a massa volúmica, em kg/m^3 e o valor de h_p a espessura do painel de madeira, em mm.

2.2.3. Curvas de incêndio padrão

Para avaliar como os materiais e as soluções construtivas se comportam em condições de fogo, é essencial padronizar e normalizar os testes experimentais. A padronização foi estabelecida durante a criação da norma ISO 834 [13]. Esta norma define o método de teste para determinar a resistência ao fogo de vários elementos de construção quando expostos a condições de incêndio padrão. A norma inclui a curva nominal, conhecida como curva de incêndio padrão ISO 834 [13] (Figura 5), a qual é uma função logarítmica que descreve a variação da temperatura ao longo do tempo:

$$\theta = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (14)$$

Na equação anterior, θ representa a temperatura médio dos gases quentes gerados no compartimento de incêndio, em °C, e t representa a duração do incêndio, em min.

Apesar da curva ISO 834 [13] ser amplamente utilizada como ponto de referência na avaliação da resistência ao fogo, conforme estipulado pelo EC1 EN 1991-1-2 [12], é importante observar

a existência de duas curvas adicionais: a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva para incêndio de hidrocarbonetos [12].

Para o caso da curva de incêndio para elementos exteriores (Figura 5), a curva consiste numa função exponencial que descreve a evolução da temperatura ao longo do tempo [12]:

$$\theta = 660 \times (1 - 0,687 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t}) + 20 \quad (15)$$

Para este caso θ representa a temperatura dos gases quentes no interior do elemento, em °C, e t representa o tempo em que a estrutura está exposta ao fogo, em min.

O caso da curva de incêndio para hidrocarbonetos (Figura 5), também consiste numa função exponencial [12]:

$$\theta = 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t}) + 20 \quad (16)$$

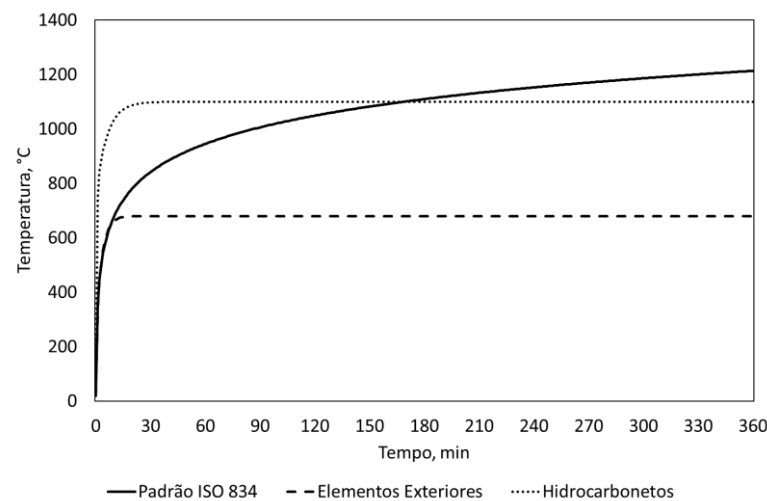


Figura 5 - Diferentes curvas de incêndio

2.3. Propriedades Térmicas dos Materiais utilizados

As estruturas leves em madeira têm surgido como uma abordagem inovadora na construção, proporcionando uma alternativa eficiente e sustentável. No entanto, um aspeto de extrema importância, é o desempenho destas estruturas sob a ação do fogo. Assim, é imperativo analisar as propriedades térmicas dos materiais utilizados nestas estruturas, para uma compreensão completa do desempenho térmico das mesmas.

2.3.1. Madeira

Ao longo de milhares de anos, a madeira, sendo um recurso natural abundante, evoluiu de um material de construção primitivo para soluções modernas utilizadas em várias áreas, incluindo a engenharia. Apesar de sua propensão à combustão, destaca-se como uma opção atrativa e sustentável em comparação com o betão e materiais metálicos [17].

A madeira é um material ortotrópico, o que significa que suas propriedades variam conforme a orientação das fibras. Apesar dessa variação, considerando a sua ortotropia, as propriedades

permanecem constantes ao longo das direções específicas. A madeira pode ser definida e caracterizada em relação a três eixos: longitudinal, radial e tangencial (Figura 6) [18].

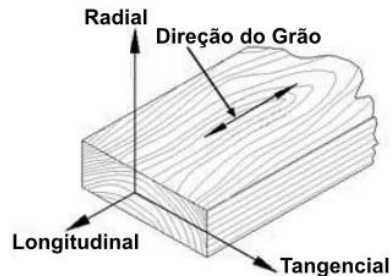


Figura 6 - Direções principais, adaptada de [19]

A madeira é dividida em dois subgrupos: a madeira macia (*softwoods*) e a madeira dura (*hardwoods*). Com base no estudo realizado por Shi L. e Chew M. [3] em 2021, que revelou que a temperatura de ignição para *hardwoods* está entre 423 e 613 K, enquanto para *softwoods* varia entre 531 e 755 K. Assim conclui-se que a aplicação de madeiras do tipo *softwood* é a mais adequada, uma vez que possuem uma temperatura de degradação mais elevada, contribuindo para uma maior resistência ao fogo nesse tipo de madeira [3].

Ao analisar a família das *softwoods*, destacam-se as madeiras laminadas, como a *cross-laminated timber* (CLT) e a *glued-laminated timber* (GLT). A incorporação desses produtos possibilitou o design e a construção de edifícios em maior escala, onde a madeira assume o papel principal como elemento estrutural [20].

Para o presente estudo a madeira a utilizar será a GLT, que é fabricada a partir de madeira macia sob condições controladas de pressão e temperatura. Esse processo envolve a união de lâminas de madeira com resina, resultando em membros estruturais dos quais as fibras estão alinhadas paralelamente. Esta técnica proporciona uma resistência e durabilidade notáveis, tornando a GLT uma escolha comum em projetos que requerem materiais estruturais robustos [21].

2.3.1.1. Massa volúmica

A madeira é utilizada numa ampla variedade de condições e de teores de humidade. Devido ao facto de que a humidade constituir parte da massa global do produto, a massa volúmica da madeira é determinada com base nesse teor. O valor da massa volúmica da madeira é baseado em características médias das espécies. Portanto, esse valor deve ser considerado uma aproximação devido à variação natural do teor de humidade. Apesar disso, o valor da massa volúmica é suficientemente preciso para permitir a aplicação adequada da madeira como material estrutural [14].

O EC5 EN 1995-1-2 [11], estabelece o método para avaliar a massa volúmica em relação ao aumento da temperatura. Este método é diretamente influenciado pelo teor de humidade (ω), sendo que os valores padronizados são baseados num teor médio de 12%. Os coeficientes, conforme definidos no EC 5 EN 1995-1-2 [11], são apresentados na Tabela 2 [11]:

Tabela 2 - Coeficientes da massa volúmica da madeira em função da temperatura, adaptado de [11]

Temperatura (°C)	Coeficiente da massa volúmica
20	$1+\omega$
99	$1+\omega$
100	1,00
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

ω - Teor de umidade, valor a utilizar 0,12

Assim, a massa volúmica da madeira é uma propriedade importante na resistência ao fogo de soluções construtivas em madeira, uma vez que quanto maior for o teor de humidade, mais tarde ocorre a carbonização [20].

Ao analisar os coeficientes fornecidos na Tabela 2, observa-se que a massa volúmica da madeira diminui à medida que a temperatura aumenta, sendo esta variação definida para o intervalo entre 100°C e 200°C. Para o presente estudo, centrado em madeiras lameladas coladas, será avaliada a variação da massa volúmica em relação à temperatura para dois tipos de madeira específicos (GL24h e GL32h). Este tipo de madeiras têm massas volúmicas à temperatura ambiente definidas de 420 kg/m³ e 480 kg/m³, respetivamente [22]. Aplicando os coeficientes da Tabela 2 da variação da massa volúmica em função da temperatura, é apresentada na Figura 7.

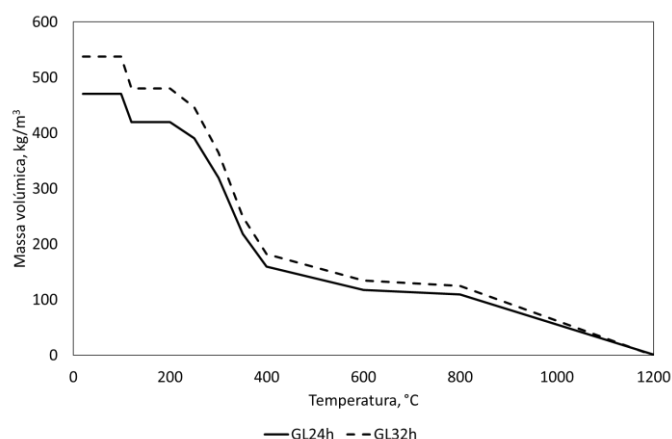


Figura 7 - Massa volúmica, em função da temperatura das madeiras GL24H e GL32H

A evolução da massa volúmica na Figura 7 indica que a partir dos 200°C ocorre uma diminuição. Essa redução é explicada pela diminuição da taxa de humidade devido à evaporação da água presente na madeira. Além disso, de acordo com o EC5 EN 1995-1-2 [11], aos 300°C ocorre uma

diminuição significativa da massa volúmica, uma vez que a madeira inicia o seu processo de carbonização.

2.3.1.2. Calor Específico

O calor específico é definido como a quantidade de energia térmica necessária para variar um grau de temperatura numa unidade de massa de um material específico. Na madeira, essa propriedade é considerada independente da espécie, ou seja, não varia significativamente com as diversas massas volúmicas que o material pode assumir. Portanto, considera-se que o calor específico da madeira depende da temperatura e da humidade presente no elemento [14]. Por essa razão, o EC5 EN 1995-1-2 [11] define os valores que o calor específico assume em relação à temperatura, conforme representado na Figura 8.

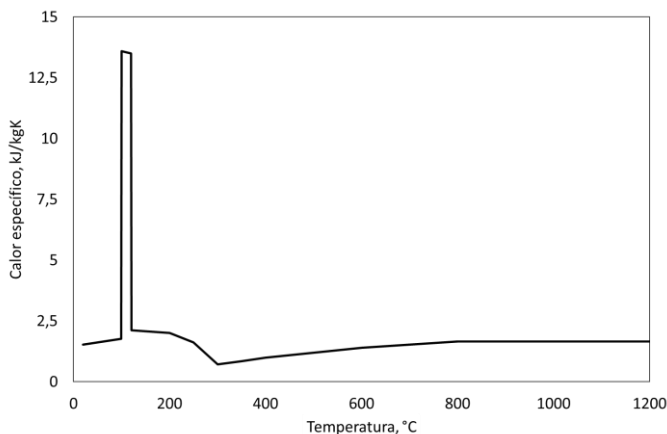


Figura 8 -Calor específico da madeira, em função da temperatura

Na madeira, esta propriedade é considerada independente do tipo de madeira, ou seja, não varia significativamente com as diversas massas volúmicas que o material pode assumir com base na sua espécie. Portanto, considera-se que o calor específico da madeira depende da temperatura e da humidade presente no elemento.

2.3.1.3. Condutividade Térmica

A condutividade térmica é definida como o fluxo de calor que atravessa a espessura de um determinado material sujeito a um gradiente térmico [14]. Assim como o calor específico, esta propriedade é considerada independente do tipo de madeira e é definida pelo EC5 EN 1995-1-2 [11]. A condutividade térmica para um elemento de madeira é representada na Figura 9.

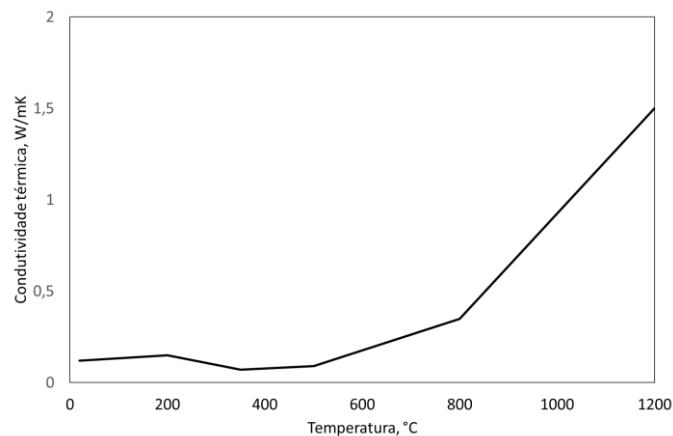


Figura 9 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura

2.3.2. Gesso

As placas de gesso cartonado têm se tornado uma prática comum de utilização em edifícios para proporcionar uma proteção passiva contra incêndios, sendo amplamente utilizadas em soluções construtivas para paredes, tetos e divisórias [23]. Essas placas são compostas por um núcleo incombustível de gesso revestido com uma superfície laminada de papel [24]. O gesso, principal componente sólido e poroso, consiste principalmente em sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [25].

Quando aquecido a temperaturas superiores a 80°C , o gesso inicia um processo de calcinação, onde ocorre a dissociação das ligações químicas entre a água e o sulfato de cálcio, resultando na formação de vapor de água. O início dessa reação química depende de uma absorção de energia térmica de aproximadamente 625 kJ por kg de gesso, e a temperatura de início do processo varia conforme outros fatores [24].

Estudos indicam que a desidratação do gesso e a liberação de vapor de água ocorrem através de duas reações químicas reversíveis distintas, ambas endotérmicas, ou seja, que absorvem energia. Essa absorção de calor durante as reações contribui para retardar o fluxo de calor no interior da placa, melhorando assim as propriedades de resistência ao fogo. O fluxo de calor é retardado ao longo de toda a reação química de calcinação/desidratação, geralmente ocorrendo numa gama de temperaturas entre 125°C e 225°C [25].

Além disso, devido à natureza porosa e não homogênea do gesso, juntamente com as suas propriedades dependentes do teor de água, as propriedades térmicas, especialmente a condutividade térmica que afeta diretamente a resistência ao fogo, exibem uma considerável variabilidade [23].

Conforme o EC5 EN 1995-1-2 [11], os painéis de gesso cartonado usados na proteção de ligações em madeira são classificados como tipo A, H e F [11].

Devido à natureza heterogênea do gesso, a obtenção experimental das propriedades não é um processo preciso. Essa dificuldade é ainda agravada pelo elevado teor de humidade do material. Apesar da literatura não ser explícita, há estudos que indicam que as propriedades do gesso

podem variar em função da temperatura [23]. No presente trabalho, são apresentadas as propriedades térmicas do gesso do tipo F. Devido à ausência de definições regulamentares sobre a evolução das propriedades com o aumento da temperatura, serão considerados os resultados obtidos em ensaios experimentais.

2.3.2.1. Massa volúmica

O estudo conduzido por Frangi et al. [26] proporcionou uma análise da evolução da massa volúmica em painéis de gesso do tipo F. A experiência consistiu na aplicação de uma taxa de aquecimento de 20°C/min nas placas, utilizando o método de análise termogravimétrica (TGA) para determinar a variação da massa em relação ao aumento da temperatura [26].

Os resultados do TGA revelaram dois momentos com perdas consideráveis de massa. A primeira queda ocorreu no intervalo de temperatura entre 100°C e 170°C, representando uma perda de 17% da massa volúmica inicial. A segunda queda ocorreu entre 600°C e 750°C, resultando numa perda de 22% do valor inicial. Adicionalmente, observou-se que a perda de massa no primeiro momento está relacionada com a diminuição da humidade das placas, ou seja, remoção da água existente. No segundo momento, ocorre a libertação de dióxido de carbono. A análise TGA concluiu que, excluindo as perdas de massa nos momentos mencionados, a massa volúmica permanece constante nesses intervalos [26].

Os valores de referência adotados pelos autores para o presente estudo foram de 889 kg/m³ para o gesso do tipo F, à temperatura ambiente [26].

A variação da massa volúmica em função da temperatura, considerada neste estudo, está representada na Figura 10.

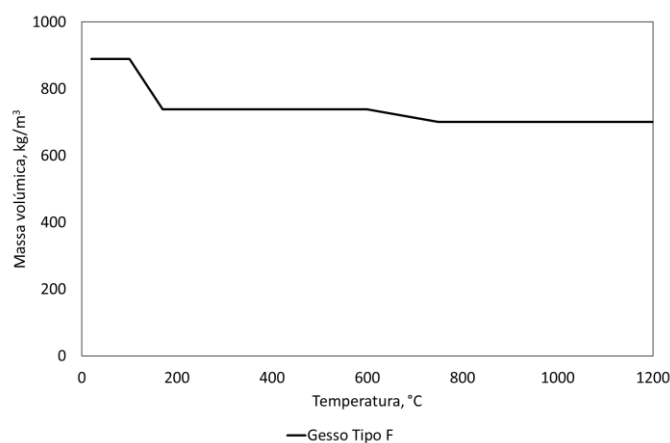


Figura 10 - Massa volúmica do gesso do tipo F, em função da temperatura

2.3.2.2. Calor específico

Segundo o estudo conduzido por Rahmanian e Wang [23], o aumento da temperatura provoca dois picos máximos no valor do calor específico do gesso [23]. Esses picos correspondem às duas reações químicas de desidratação do gesso, que foram mencionadas no estudo anterior sobre a massa volúmica conduzido por Frangi et al. O calor específico do gesso apresenta a

mesma variação em função da temperatura, independentemente do tipo, com um valor à temperatura ambiente igual a 0,95 kJ/kg. Além disso, no gesso, o calor específico é caracterizado como a energia necessária para dissociar e evaporar as moléculas de água e realizar o transporte da água para as zonas mais frias no interior das placas [23]. A Figura 11 representa os valores do calor específico do gesso do tipo F.

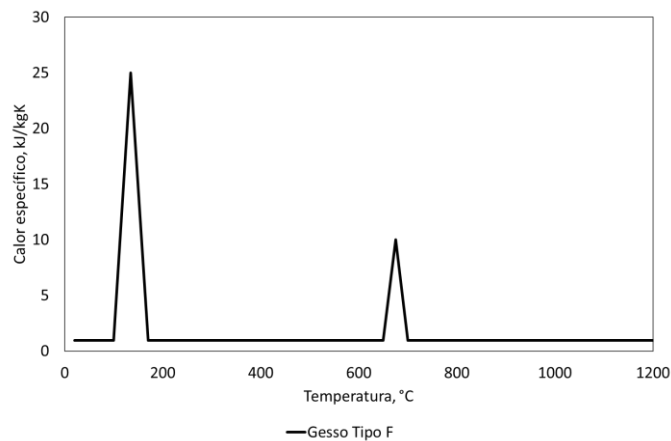


Figura 11 – Calor específico do gesso tipo F, em função da temperatura

2.3.2.3. Condutividade Térmica

De acordo com o estudo mencionado anteriormente, conduzido por Rahmanian e Wang [23], a condutividade térmica do gesso, sendo um material não homogêneo, é afetada por vários fatores, como a massa volúmica, a taxa de humidade e a porosidade. Essa diversidade de fatores resulta numa ampla variedade de valores assumidos para a condutividade térmica do gesso. No entanto, considerando uma solução padrão de gesso com uma distribuição de poros esféricos, os autores desenvolveram uma relação para a evolução da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. Semelhante ao calor específico, a condutividade térmica do gesso não depende da sua tipologia, ou seja, se é do tipo A ou F [23]. Os valores considerados para este estudo estão representados na Figura 12.

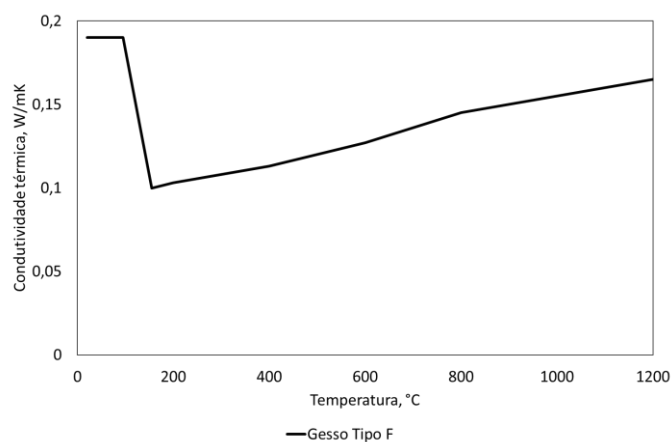


Figura 12 – Condutividade térmica do gesso tipo F, em função da temperatura

2.3.3. Aço

Para que seja possível agregar as placas de gesso cartonado às vigas de madeira, nas estruturas leves em madeira, é necessário utilizar conectores, que podem ser de aço [27]. No presente estudo, pretende-se analisar qual o efeito destas ligações metálicas na resistência ao fogo das estruturas leves em madeira. Assim, é necessário conhecer as propriedades térmicas do aço.

As propriedades térmicas do aço, obtidas a partir do EC3 EN 1993-1-2[28], variam de acordo com equações analíticas em intervalos de tempo definidos.

É importante destacar que no aço, as suas propriedades térmicas sofrem alterações com o aumento da temperatura, principalmente entre 600 e 800°C, onde ocorre um fenómeno de transformação metalúrgica, responsável pelo início da mudança de fase [29].

Para os propósitos deste trabalho, considerou-se que o aço não sofre perda de massa durante o incremento da temperatura. Assim, a massa volúmica do aço foi considerada constante, com um valor de 7850 kg/m³.

2.3.3.1. Calor específico

De acordo com EC3 EN 1993-1-2 [28], a relação entre o calor específico (c_a) e a temperatura do aço (θ_a) são obtidas pelas equações seguintes:

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 0,773\theta_a - 0,0169\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad (17)$$

Para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (18)$$

Para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (19)$$

Com a aplicação destas equações consegue-se efetuar o gráfico do calor específico do aço em função da temperatura (Figura 13).

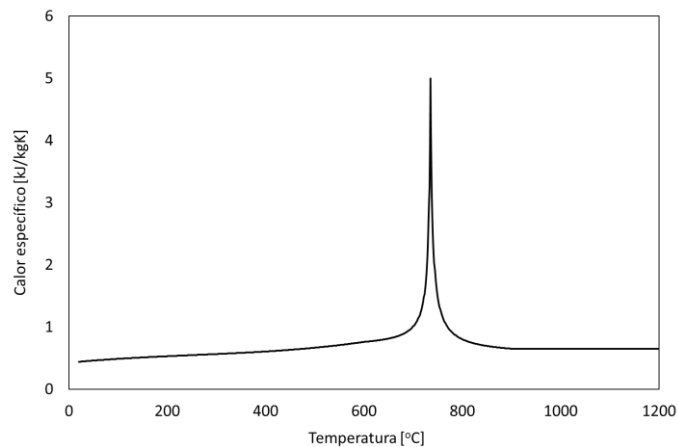


Figura 13 -Calor específico do aço, em função da temperatura

2.3.3.2. Condutividade térmica

Como no caso do calor específico do aço, a condutividade térmica do aço (λ_a) também é função da temperatura (θ_a).

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 0,033\theta_a \quad (20)$$

Para $800^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 27,3 \quad (21)$$

Com as equações 20 e 21 obtém-se o gráfico da condutividade térmica do aço, em função da temperatura (Figura 14).

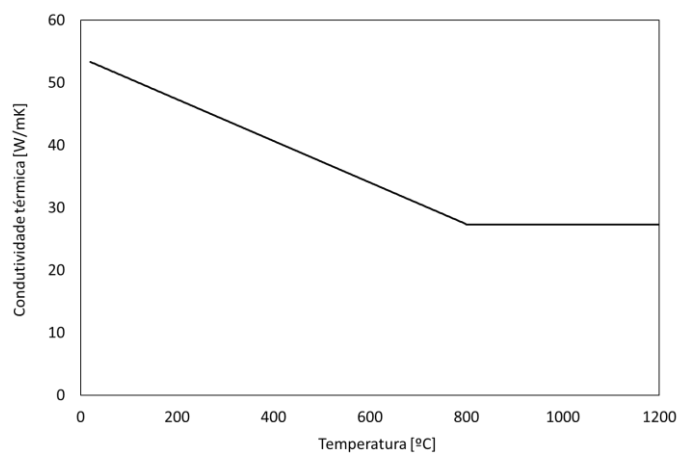


Figura 14 -Condutividade térmica do aço, em função da temperatura

2.3.4. Isolamento para as cavidades

Existem diversos materiais de isolamento térmico com o propósito principal de proteger contra a transferência de calor e resistir a condições reais de incêndio [30]. O mercado europeu de

materiais isolantes é caracterizado pela dominação dos materiais fibrosos inorgânicos, lã de vidro e lã de rocha, que representam 60% do mercado [31].

2.3.4.1. Lã de rocha

A lã de rocha geralmente oferece níveis significativamente mais altos de isolamento. A lã de rocha é composta por minério de basalto e escória granulada de alto-forno, proporcionando uma densidade maior [32].

Segundo Frangi et al. [33] a lã de rocha utilizada nas soluções construtivas possui uma massa volúmica superior a 26 kg/m³ [33].

Segundo Mehdi Ablaoui et al. [34], as propriedades térmicas da lã de rocha, com uma massa volúmica superior a 26 kg/m³, é função da temperatura, conforme se apresenta na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades térmicas da lã de rocha com uma massa volúmica superior a 26 kg/m³[34]

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/(kgK))	ρ/ρ_{20}
20	0,036	0,880	1,00
100	0,047	1,040	1,00
200	*	1,160	0,980
400	$0,09(11 \times e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,280	0,977
600	$0,15(11 \times e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,355	0,973
800	$0,23(11 \times e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,430	0,970
925	$0,30(11 \times e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,477	0,967
1200	$0,45(11 \times e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,580	0,88

* aplicar interpolação linear

2.3.4.2. Lã de vidro

A lã de vidro é composta por fibras de vidro fundido (silicato) e é muito utilizada como isolamento térmico em construções de edifícios [32].

Segundo Frangi et al. a lã de vidro utilizada na análise térmicas das soluções construtivas de estruturas leves em madeira tem uma massa volúmica superior a 15kg/m³.

Segundo Papadopoulos [31], as propriedades térmicas da lã de vidro com uma massa volúmica superior a 15kg/m³, são constantes e apresentadas na Tabela 4 [8], [31]:

Tabela 4 -Propriedades térmicas da lã de vidro para uma massa volúmica superior a 15kg/m³

Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/(kgK))
0,045	0,840

Para além destas características, a lã de vidro possui um ponto de fusão médio de cerca de 537°C [35].

2.4. Análise térmica

A análise térmica é o método utilizado para determinar como a temperatura se desenvolve no interior dos elementos. Esse método fundamenta-se nas ações térmicas, como o fluxo de calor efetivo, e nas propriedades térmicas dos materiais que compõem os elementos, bem como das superfícies de proteção pertinentes. São consideradas as interações entre os diversos materiais e a transferência de calor ao longo do tempo, permitindo analisar o comportamento térmico do elemento em questão [12].

Para compreender esse processo, é essencial ter conhecimento sobre os diferentes tipos, ou modos, de transferência de calor, bem como entender como esses modos podem interagir e ter efeitos combinados. Os principais modos de transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação. Compreender o funcionamento desses modos e suas interações em sistemas específicos possibilita uma análise mais abrangente do comportamento térmico de um elemento. Essa compreensão é fundamental no projeto de estruturas, dispositivos ou sistemas que precisam lidar com variações de temperatura, assegurando seu desempenho adequado em diversas condições.

2.4.1. Modos de transferência de calor

A transferência de calor é o processo pelo qual a energia térmica é trocada entre diferentes regiões de um sistema, ou entre sistemas vizinhos, devido a uma diferença de temperatura.

2.4.1.1. Condução

A condução térmica pode ser compreendida como o processo pelo qual a energia se transfere das partículas com maior energia para as de menor energia, dentro de uma substância, devido às interações entre essas partículas. Esse fenômeno ocorre à medida que as partículas mais aquecidas transferem a energia cinética para as partículas vizinhas, gerando assim a propagação do calor [36].

Os processos de transferência de calor podem ser matematicamente descritos através de equações que permitem calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. No contexto da condução de calor, a equação é denominada por Lei de Fourier. No caso de uma parede plana unidimensional, como ilustrado na Figura 15, a temperatura varia ao longo da direção x , em função da equação seguinte [36]:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

Sob condições de regime estacionário, quando a distribuição de temperatura é linear, Figura 15, é possível expressar o gradiente de temperatura de forma diferente. Nesta situação, a variação da temperatura em relação à distância pode ser representada por uma inclinação constante ao longo do material ou do meio em questão. Essa inclinação é conhecida como o gradiente de temperatura. Assim, a equação anterior passa a ser determinada pela seguinte expressão [36]:

$$q''_x = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (23)$$

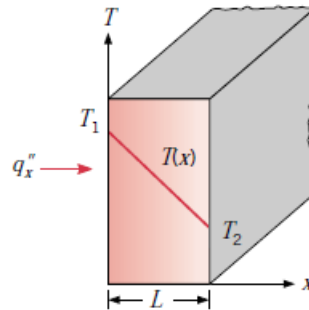


Figura 15 - Transferência de calor unidimensional por condução [36]

2.4.1.2. Convecção

O modo de transferência de calor por convecção é caracterizado pela movimentação de energia dentro de um fluido, influenciado pela combinação da condução térmica e pelo movimento em massa do próprio fluido. Geralmente, essa transferência envolve a troca de energia térmica sensível ou interna do fluido. No entanto, em certos processos de convecção, há uma adição importante de troca de calor latente. Essa troca de calor latente está associada a mudanças de fase, como a transição entre os estados líquido e vapor do fluido [36].

Independentemente da natureza específica do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada envolve a Lei de Newton. Essa lei descreve a transferência de calor entre um objeto sólido e um fluido em movimento. A equação da transferência de calor por convecção é dada por:

$$q''_x = h(T_s - T_\infty) \quad (24)$$

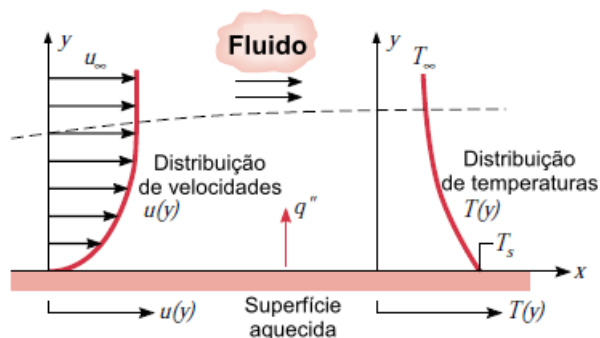


Figura 16 - Camada-limite na transferência de calor por convecção, adaptada de [36]

2.4.1.3. Radiação

A radiação térmica é a energia liberada por materiais que possuem uma temperatura diferente de zero. Para além da radiação proveniente de superfícies sólidas, a emissão também ocorre a

partir de gases e líquidos. Independentemente da fase da matéria, a emissão de radiação pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que compõem a substância [36].

A radiação térmica não se limita apenas à proveniente de fontes específicas, como o sol, mas também pode incidir sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. Essa radiação pode ser originada de diversas fontes, incluindo o ambiente circundante e outras superfícies nas quais a superfície de interesse está exposta. Seja a radiação proveniente de uma fonte específica ou das proximidades, a taxa na qual todas essas radiações atingem uma área unitária da superfície é denominada irradiação e é representada por G , conforme a Figura 17.

Um cenário que ocorre frequentemente é a troca de radiação entre uma pequena superfície a uma temperatura T_s e uma superfície isotérmica, significativamente maior, que envolve completamente a menor (como representado na Figura 17).

Neste caso particular, a superfície menor, representada por T_s , emite a radiação térmica de acordo com sua temperatura. A superfície maior, assumida como isotérmica, significa que ela possui uma temperatura constante em toda a sua extensão. A troca de radiação entre essas superfícies é influenciada pelo seu gradiente de temperatura.

$$q_x'' = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (25)$$

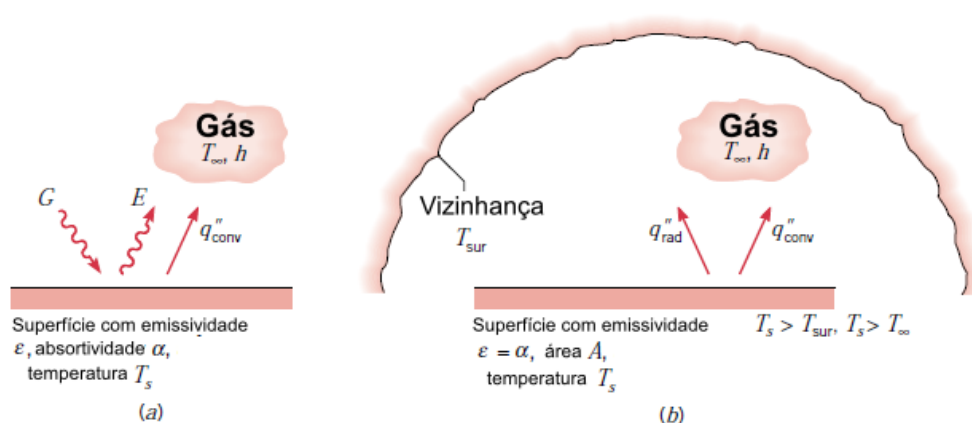


Figura 17 - Troca por radiação: (a) numa superfície e (b) entre uma superfície e uma vizinhança [36]

2.5. Métodos analíticos

2.5.1. Método simplificado para a resistência ao fogo

No ano 2010, após vários testes experimentais, e algumas simulações computacionais, Frangi et al. [33] desenvolveram um novo método analítico. Este método tem como objetivo avaliar a resistência ao fogo de cada elemento individual de uma estrutura leve em madeira. Para além disso, o método permite que seja efetuado o cálculo com um número diferente de placas de gesso, madeira ou combinação das mesmas, como se verifica na Figura 18 [33].

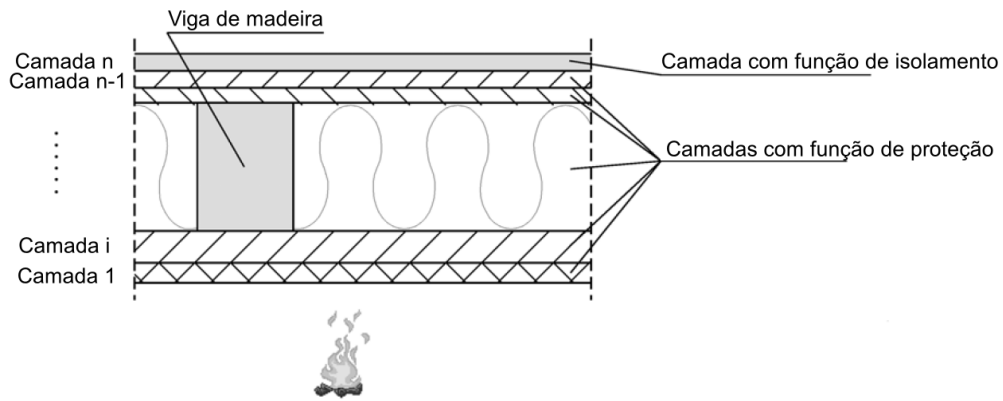


Figura 18 – Diferentes camadas numa estrutura em madeira de acordo com o método simplificado, adaptada de [33]

Assim, a resistência ao fogo (t_{ins}) é calculada através da soma das contribuições das camadas de proteção e isolamento, de acordo com a função das mesmas e a sua interação [33].

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (26)$$

A parcela $\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$ diz respeito à soma dos tempos de proteção, em minutos, das camadas que estão na direção do fluxo de calor e que estão antes da última camada do modelo, ou seja, a primeira camada do lado não exposto ao fogo. A parcela $t_{ins,n}$ corresponde ao tempo de isolamento, em minutos, que a última camada da estrutura garante [33].

Estes tempos, proteção e isolamento, resultam da relação entre fatores como, valores básicos associados a cada camada, coeficientes de posição das camadas e coeficientes de correção e de junta. O cálculo do tempo de proteção e de isolamento são obtidos através das equações 27 e 28, respetivamente [33].

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \times k_{j,i} \quad (27)$$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) * k_{j,n} \quad (28)$$

As variáveis $t_{prot,0,i}$ e $t_{ins,0,n}$ definem os valores básicos da resistência ao fogo, em minutos, das camadas i (proteção) e da última camada n (isolamento) do modelo presente na Figura 18. Do mesmo modo, Δt_i e Δt_n representam os tempos de correção para camadas protegidas com gesso, em minutos. Por outro lado, considerando o lado exposto ao fogo, $k_{j,i}$ e $k_{j,n}$ estabelecem os coeficientes de posição da camada para o modelo em estudo. No caso de levar em conta o lado não exposto ao fogo $k_{j,i}$ e $k_{j,n}$ definem os coeficientes para juntas de união entre as diferentes camadas [33].

Após vários cálculos, através de testes laboratoriais e alguns computacionais, os autores apresentam equações para o cálculo dos valores básicos, de acordo com a Tabela 5 [33].

Tabela 5 – Equações para os valores básicos de isolamento e proteção para diferentes materiais, adaptada de [33]

Material	Valor básico de isolamento ($t_{ins,0,n}$ [min])	Valor básico de proteção ($t_{prot,0,n}$ [min])
Gesso, Placa de gesso, Placa de fibra de gesso	$24 \times \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$	$30 \times \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$
Painéis de madeira maciça	$19 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$30 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1}$
Aglomerado de partículas de madeira	$22 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$33 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1}$
Painel de madeira orientada	$16 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$23 \times \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1}$
Lã de rocha	–	$0,3 \times h_i^{(0,75 \log(\rho_i) - \frac{\rho_i}{400})}$
Fibra de vidro	–	$\begin{cases} 0, & h_i < 40 \\ ((0,0007 \times \rho_i + 0,046) \times h_i + 13) \leq 30, & h_i \geq 40 \end{cases}$

Nota: h_i : espessura da camada(mm); ρ_i : massa volúmica da camada (kg/m^3)

Para o cálculo dos coeficientes de posição, considera-se que as camadas degradam quando a temperatura de 270°C é alcançada nas camadas do lado não exposto ao fogo. Estes valores são apresentados na Tabela 6 [33].

Tabela 6 – Equações para o cálculo dos coeficientes de posição de proteção e isolamento para diferentes materiais, adaptada de [33]

Material	Coefficientes de posição $k_{pos,exp,n}$ e $k_{pos,exp,i}$
	$k_{pos,exp,n}$ para $t_{ins,n}$
Revestimento (Gesso, madeira)	$\begin{cases} 1 - 0,6 \times \frac{\sum t_{prot,i} - 1}{t_{ins,0,n}}, & \sum t_{prot,i} - 1 \leq \frac{t_{ins,0,n}}{2} \\ 0,5 \times \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\sum t_{prot,i} - 1}}, & \sum t_{prot,i} - 1 > \frac{t_{ins,0,n}}{2} \end{cases}$
	$k_{pos,exp,i}$ para $t_{prot,i}$
	$\begin{cases} 1 - 0,6 \times \frac{\sum t_{prot,i} - 1}{t_{prot,0,i}}, & \sum t_{prot,i} - 1 \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,5 \times \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i} - 1}}, & \sum t_{prot,i} - 1 > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases}$
	$k_{pos,exp,i}$ para $t_{prot,i}$
Lã de rocha	$\begin{cases} 1 - 0,6 \times \frac{\sum t_{prot,i} - 1}{t_{prot,0,i}}, & \sum t_{prot,i} - 1 \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,5 \times \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i} - 1}}, & \sum t_{prot,i} - 1 > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases}$

(Cont.)

	$k_{pos,exp,i}$ para $t_{prot,i}$
Fibra de vidro para $h_i \geq 40$ mm	$\begin{cases} 1 - 0,8 \times \frac{\sum t_{prot,i} - 1}{t_{prot,0,i}}, & \sum t_{prot,i} - 1 \leq \frac{t_{prot,0,i}}{4} \\ (0,0010 \times \rho_i + 0,27) \times \left(\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,0,i}} \right)^{(0,75 - 0,002 \times \rho_i)}, & \sum t_{prot,i} - 1 > \frac{t_{prot,0,i}}{4} \end{cases}$

Nota: ρ_i - Massa volúmica da camada (kg/m³)

A partir dos testes, estes autores [33] conseguiram calcular os tempos de correção para camadas protegidas com gesso, nas soluções para a base do elementos de suporte e nas divisórias, que se apresentam na Tabela 7 e Tabela 8, respetivamente. No caso dos elementos para a base de suporte, assumiram que quando a temperatura atingia 400°C no lado não exposto ao fogo as placas de gesso cartonado degradavam-se. Por outro lado, no tipo divisória a temperatura considerada foi de 600°C [33].

Tabela 7 - Correção dos tempos Δt_n e Δt_i para camadas protegidas com gesso na base dos elementos de suporte [33]

Material	Soluções de elementos de suporte
Revestimento (madeira, gesso)	Δt_n para $t_{ins,n}$ (min)
	$\begin{cases} 0,06t_{prot,i-1} + 1,1t_{ins,0,n} - 5, & t_{ins,0,n} < 8 \\ 0,1t_{prot,i-1} - 0,035t_{ins,0,n} + 1,2, & t_{ins,0,n} \geq 8 \end{cases}$
	Δt_i para $t_{prot,i}$ (min)
	$\begin{cases} 0,06t_{prot,i-1} + 1,1t_{prot,0,i} - 5, & t_{prot,0,i} < 8 \\ 0,1t_{prot,i-1} - 0,035t_{prot,0,i} + 1,2, & t_{prot,0,i} \geq 8 \end{cases}$
Isolamento (fibra de vidro, fibra cimentosa)	Δt_i para $t_{prot,i}$ (min)
	$0,1t_{prot,i-1} - 0,035t_{prot,0,i}$

Tabela 8 - Correção dos tempos Δt_n e Δt_i para camadas protegidos com gesso em soluções das divisórias [33]

Material	Soluções de elementos do tipo divisória
Revestimento (madeira, gesso)	Δt_n para $t_{ins,n}$ (min)
	$\begin{cases} 0,03t_{prot,i-1} + 0,9t_{ins,0,n} - 2,3, & t_{ins,0,n} < 12 \\ 0,22t_{prot,i-1} - 0,1t_{ins,0,n} + 4,7, & t_{ins,0,n} \geq 12 \end{cases}$
	Δt_i para $t_{prot,i}$ (min)
	$\begin{cases} 0,03t_{prot,i-1} + 0,9t_{prot,0,i} - 2,3, & t_{prot,0,i} < 12 \\ 0,22t_{prot,i-1} - 0,1t_{prot,0,i} + 4,7, & t_{prot,0,i} \geq 12 \end{cases}$
Isolamento (fibra de vidro, lã de rocha)	Δt_i para $t_{prot,i}$ (min)
	$\begin{cases} 0,1t_{prot,i-1} + t_{prot,0,i} - 1, & t_{prot,0,i} < 6 \\ 0,22t_{prot,i-1} - 0,1t_{prot,0,i} + 3,5, & t_{prot,0,i} \geq 6 \end{cases}$

No mesmo estudo, também são apresentados os cálculos dos coeficientes de posição para os diferentes materiais apoiados em mantas de isolamento, com base em simulações

computacionais. Na Tabela 9 são apresentados os valores/equações para estes coeficientes [33].

Tabela 9 – Coeficiente de posição $k_{pos,unexp,i}$ [33]

Material	$k_{pos,unexp,i}$ para camadas apoiadas em camadas de gesso ou madeira	$k_{pos,unexp,i}$ para camadas apoiadas em camadas de isolamento
Gesso, Placa de gesso, Placa de fibra de gesso	1,0	$0,5h_i^{0,15}$
Painéis de madeira maciça	1,0	$0,35h_i^{0,21}$
Aglomerado de partículas de madeira	1,0	$0,41h_i^{0,28}$
Painel de madeira orientada	1,0	$0,5h_i^{0,15}$
Lã de rocha	1,0	$0,18h_i^{(0,001\rho_i+0,08)}$
Fibra de vidro	1,0	$0,01h_i - \frac{h_i^2}{30000} + \rho_i^{0,09} - 1,3$

Nota: h_i : espessura da camada(mm); ρ_i : massa volúmica da camada (kg/m^3)

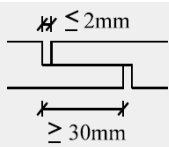
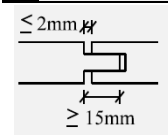
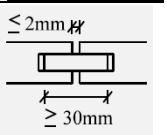
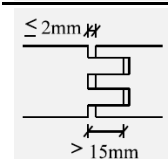
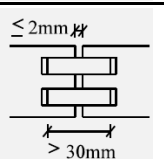
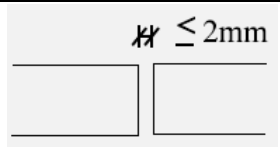
Para além disto, neste método, as cavidades vazias entre duas camadas não só têm influência no coeficiente de posição para a camada do lado não exposto ao fogo da cavidade e para a camada no lado exposto ao fogo da cavidade como também nos tempos de correção. Os resultados desta influência são apresentados na Tabela 10 [33].

Tabela 10 – Modificação dos coeficientes de posição $k_{pos,unexp,i}$ e $k_{pos,exp,i}$ e do tempo de correção Δt_i pela influência da cavidade vazia, adaptada de [33]

Material	Camada no lado exposto ao fogo da cavidade	Camada do lado não exposto ao fogo da cavidade
Revestimento	$k_{pos,unexp,i}$ de acordo com a	$3 \times \Delta t_i$ de acordo com
Isolamento	$k_{pos,unexp,i} = 1$	$1,6 \times k_{pos,exp,i}$ de acordo com a Δt_i de acordo com

De acordo com EC5 EN 1995-1-2 não são permitidas juntas com uma folga de 2mm. Com isto, este método só considera a influência das juntas para a última camada no lado não exposto ao fogo e a camada que antecede a cavidade vazia, dado que os investigadores verificaram através dos testes de fogo que a junta com uma folga inferior a 2 mm apoiada por uma camada era pequena. Assim, os valores para o coeficiente de ligação para estas camadas são apresentados na Tabela 11. Para as outras camadas consideram $k_{j,i} = 1$ [33].

Tabela 11 – Coeficiente de ligação $k_{j,n}$ e $k_{j,i}$ [33]

Material	Tipo de Ligação	$k_{j,n}$ para $t_{ins,n}$	$k_{j,i}$ para $t_{ins,n}$	
			Camada apoiada pela cavidade vazia	Outras camadas
Madeira		0,3	0,3	1
	 	0,4	0,4	1
	 	0,6	0,6	1
Placa de Gesso Cartonado, Placa de Fibra de Gesso		0,8	0,8	1

2.6. Testes em Laboratório

Através de ensaios laboratoriais, e com base nos resultados obtidos, é possível estabelecer modelos analíticos que comprovem determinados comportamentos de estruturas leves em madeira expostas ao fogo.

Frangi et al. [37] desenvolveram um estudo sobre o desempenho ao fogo de lajes e vigas de madeira. Realizaram vários testes, com base na ISO 834 [13]. Os primeiros testes tiveram como objetivo analisar, em escala reduzida, o comportamento dos componentes da madeira, enquanto numa segunda fase, os testes já permitiram analisar o comportamento global da estrutura em madeira. No desenvolvimento dos ensaios, foi possível analisar a taxa de carbonização, tendo os autores concluído que os valores medidos estão de acordo com EC5 EN 1995-1-2[11]. Para além disto, quando a secção residual é inferior a 40-60 mm, a taxa de carbonização aumenta, por isso, só deve ser usada até uma secção residual de 40-60 mm. Adicionalmente, concluíram que é possível ter uma aproximação a equações simplificadas, baseadas em taxas de carbonização constantes, quando os componentes estão sujeitos a condições de fogo padrão num período entre 30 a 110 min [37].

Mais tarde, em 2009, Te-Hsin Yang et al. [38] elaboraram um estudo, com o objetivo de aprofundar as propriedades da madeira lamelada proveniente de cinco espécies diferentes de madeira macia. Para essa análise utilizaram um teste de fogo padrão e o método do colorímetro de cone. Após os ensaios, os autores concluíram que para a mesma amostra e nas mesmas

condições, a profundidade média de carbonização e a taxa de carbonização do lado inferior foram superiores às laterais. Além disso, ao compararem a profundidade média de carbonização entre amostras de madeira lamelada com maior massa volúmica e amostras de madeira lamelada com menor massa volúmica, ambas com menor exposição ao fogo, as primeiras possuíam uma menor profundidade média de carbonização em relação às segundas. Aferiram que com o aumento da massa volúmica, a taxa de carbonização diminuiu. Conjuntamente, a taxa de carbonização da maioria das amostras testadas estão de acordo com EC5 EN 1995-1-2 [11] [38].

No mesmo ano, Frangi et al. [39] fizeram vários testes de incêndio de acordo com a ISO 834 [13]. O fator que mais atenção tiveram na realização destes testes foi à influência do adesivo no comportamento ao fogo da madeira laminada colada (CLT) em comparação com painéis de madeira homogénea. Os investigadores concluíram que o comportamento ao fogo da CLT depende do comportamento do adesivo utilizado. Adicionalmente, a comparação entre os painéis de CLT com camadas espessas e os painéis de CLT com camadas finas, mostraram que os primeiros apresentam melhor comportamento ao fogo, ou seja, a queda das camadas carbonizadas ocorreu com menor frequência durante a exposição ao fogo. Ainda, nas amostras que possuem um adesivo menos sensível à temperatura, as camadas carbonizadas não tiveram uma degradação durante a exposição ao fogo, neste caso o carvão protegeu as camadas não carbonizadas internas contra o aumento das altas temperaturas. Desta forma, os painéis de CLT tiveram um comportamento semelhante aos painéis de madeira homogénea expostos ao fogo padrão. Por outro lado, a taxa de carbonização nestas amostras é ligeiramente inferior à taxa de carbonização unidimensional que o EC5 EN1995-1-2 [11] assume para a madeira maciça [39].

No ano seguinte, Frangi et al. [33] realizaram 17 testes de fogo, nos quais não só foram estudadas diferentes placas de gesso e madeira como também o número, a espessura e o posicionamento das mesmas. Além disto, também foi estudado o isolamento da cavidade. Numa primeira fase, foram estudadas placas de gesso cartonado do tipo A e F e fibras de gesso, de acordo com as normas EN520 [40] e EN15283-2 [41], respetivamente. Analisaram o desenvolvimento da temperatura no lado não exposto ao fogo para as diferentes placas de gesso com a mesma espessura, obtendo os resultados presentes na Figura 19 [33].

Da análise do gráfico, os autores concluíram que havia uma zona constante nos 100°C que era comum a todas as placas e que o desenvolvimento geral da temperatura até os 200°C foi bastante semelhante. Assim, aferiram que a massa volúmica não é um parâmetro relevante para o comportamento térmico de placas, enquanto a espessura da placa é um fator relevante [33]. Numa segunda fase, e porque as placas de gesso utilizadas no revestimento de estruturas de madeira leve são geralmente apoiadas por outras placas (gesso, madeira), por cavidades vazias ou por camadas de isolamento (rocha, vidro ou fibra de madeira), os autores realizaram diferentes ensaios ao fogo com soluções construtivas diferentes. A Figura 20 à esquerda mostra a posição dos termopares para os testes de fogo V2 (placas de fibra de gesso com 15 mm de espessura testados como placa única) e V4 (placas de fibra de gesso de 15 mm de espessura com cavidades vazias ou com cavidades preenchidas) e os resultados da evolução da temperatura [33].

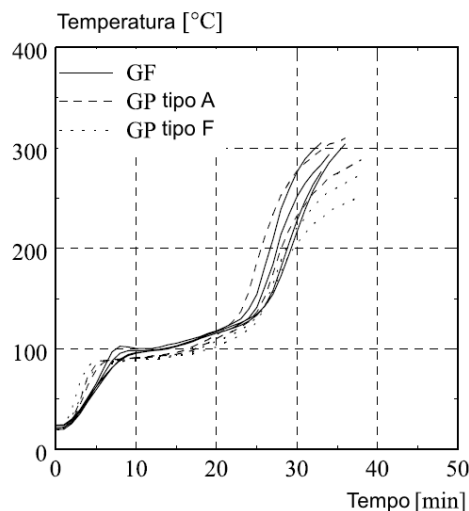


Figura 19 -Evolução da temperatura no lado não exposto ao fogo de diferentes placas de gesso com 15 mm de espessura (GF – placas de fibra de gesso; GP – placas de gesso cartonado), adaptada de [33]

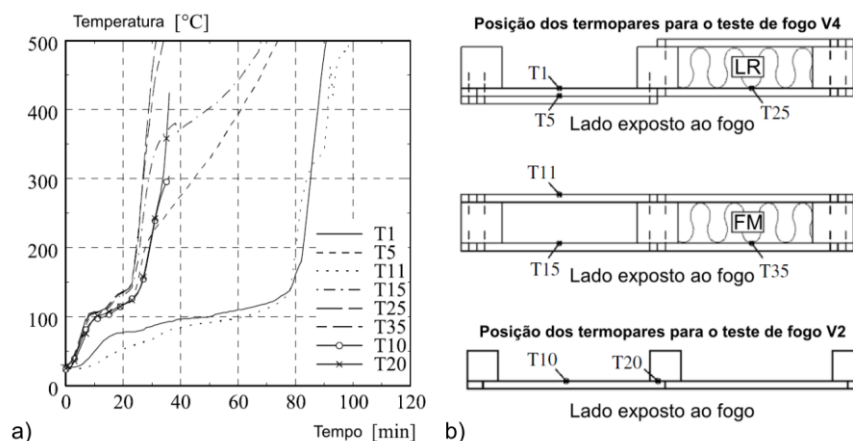


Figura 20 – a) Evolução da temperatura nos testes ao fogo V2 e V4 b) Posição dos termopares nos testes V2 e V4 (LR – Lã de Rocha e FM- Fibra de madeira), adaptada de [33]

Pela observação ao gráfico, os autores verificaram que as temperaturas recolhidas nos termopares junto das placas de fibra de gesso (T25 e T35) sob a ação do fogo para os conjuntos com as cavidades preenchidas com lã de rocha ou fibra de madeira foram semelhantes. Em comparação com o conjunto de placas de fibra de gesso ensaiadas como placa única (T10), a temperatura do primeiro conjunto aumenta muito mais rapidamente que neste último. Contudo, os investigadores concluíram que as cavidades isolantes tornam o aquecimento das placas de gesso ao fogo mais rápido. Por outro lado, a temperatura recolhida pelos termopares junto das placas de fibra de gesso, lado não exposto ao fogo para os conjuntos com cavidade vazia (T1) e para o conjunto com dupla camada (T11) foram semelhantes. Concluíram assim, que a influência da camada vazia na evolução da temperatura do lado não exposto ao fogo é nula. Para o caso da temperatura entre a placa de gesso e a estrutura em madeira(T20) verificaram que a madeira teve uma pequena influência no comportamento térmico das placas de gesso [33].

Assim, desenvolveram um esquema que demonstra o tempo necessário para cada conjunto atingir o aumento de temperatura de 250°C (média) e 270°C (qualquer ponto) no lado não exposto ao fogo, Figura 21 [33].

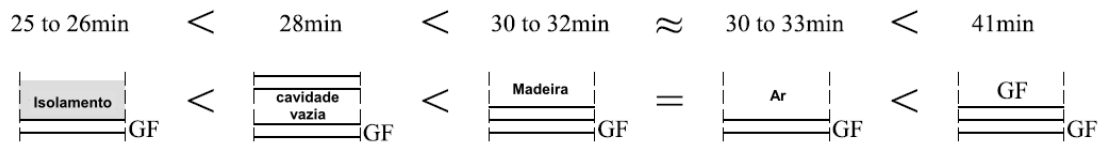


Figura 21 - Tempo necessário para um aumento de temperatura de 250°C e 270°C no lado não exposto ao fogo de placas de gesso com 15 mm de espessura, testadas como uma única placa ou com suporte de materiais diferentes (GF- Gesso tipo F), adaptada de [33]

Para além deste estudo, os mesmos autores realizaram testes para comprovarem o critério de isolamento (I). Destes testes obtiveram os resultados presentes na Tabela 12.

Tabela 12 -Tempo de isolamento para diferentes soluções, adaptada de [33]

Solução	Tempo de Isolamento (min)
3 x (10 mm placas de fibras de gesso)	57
2 x (15 mm placas de fibra de gesso com cavidade de 80 mm preenchida com fibra de madeira ($\rho=178 \text{ kg/m}^3$))	72
2 x (15 mm placas de fibra de gesso com caixa de ar)	80
2 x (15 mm placas de fibra de gesso)	83
2 x (15 mm placas de fibras de gesso com cavidade de 80 mm preenchida com fibra de vidro ($\rho=27 \text{ kg/m}^3$))	85
2 x (15 mm placas de fibras de gesso com cavidade de 40 mm preenchida com lã de rocha ($\rho=31 \text{ kg/m}^3$))	>85 (teste interrompido)
2 x (15 mm placas de fibras de gesso com cavidade de 40 mm preenchida com lã de rocha ($\rho=110 \text{ kg/m}^3$))	>85 (teste interrompido)
2 x (15 mm placas de fibras de gesso com cavidade de 40 mm preenchida com lã de rocha ($\rho=42 \text{ kg/m}^3$))	>85 (teste interrompido)

Em 2019, Alastair I. Bartlett et al. [20] conduziram um estudo abordando fatores que influenciam a taxa de carbonização média de elementos construtivos em madeira quando expostos ao fogo. O estudo utilizou dados obtidos experimentalmente para analisar o impacto de propriedades-chave da madeira na sua resistência ao fogo, destacando especialmente a massa volúmica e o teor de humidade. Os resultados indicaram um aumento significativo na taxa de carbonização, chegando até 18%, devido a essas propriedades. Além disso, o estudo destacou o papel crucial do fluxo de calor induzido pela temperatura do fogo como o principal fator na redução da resistência ao fogo. O fluxo de calor mostrou-se diretamente proporcional à área de exposição do elemento, implicando que uma maior área exposta de madeira resulta num maior fluxo de calor, fornecendo mais energia térmica para iniciar as reações químicas de pirólise. Uma descoberta relevante foi a eficácia da aplicação de um revestimento de proteção como resistência ao fogo. Essa medida demonstrou reduzir significativamente a taxa de carbonização e atrasar o colapso do elemento, alcançando uma redução de aproximadamente 80%. Essa constatação sugere que um revestimento de proteção pode desempenhar um papel

crucial na preservação da integridade estrutural dos elementos construtivos em madeira durante situações de incêndio [20].

2.7. Métodos numéricos

Em 1998, Takeda e Mehaffey [24] desenvolveram um programa computacional inovador denominado WALL2D. Este programa foi concebido para realizar análises em modelos bidimensionais, proporcionando a previsão da transferência de calor em paredes construídas com madeira e revestidas por placas de gesso cartonado quando expostas ao fogo. O método adotado nesse programa envolveu uma análise do elemento construtivo, abordando a previsão da transferência de energia térmica nas placas de gesso, na madeira e no vazio composto pela caixa de ar. Os resultados obtidos permitiram avaliar a evolução da temperatura ao longo do tempo e a análise da progressão da carbonização no elemento de madeira. Esta abordagem proporcionou uma compreensão abrangente e detalhada do comportamento térmico da estrutura, quando submetida a condições de incêndio, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de resistência ao fogo em construções de madeira com revestimento de gesso cartonado [24].

Em 2020, outros investigadores [42] desenvolveram um modelo numérico inovador para avaliar a resistência ao fogo de uma solução construtiva específica. Essa solução consistia em placas de gesso cartonado em ambos os lados, acompanhadas por perfis longitudinais de madeira. A metodologia criada possibilitou a análise da temperatura em diferentes pontos e o acompanhamento da evolução da carbonização ao longo do tempo [42].

A abordagem do Método dos Elementos Finitos (MEF) proporcionou um modelo robusto que, quando comparado com resultados experimentais utilizados para validação, demonstrou ser uma aproximação precisa e confiável. Uma das conclusões relevantes do estudo foi que, para a solução construtiva examinada, o aumento na secção dos perfis de madeira não resultava num aumento significativo na resistência ao fogo, conforme avaliado pelos critérios de isolamento térmico. No entanto, os investigadores observaram que o aumento na secção contribuía significativamente para a capacidade de carga do elemento construtivo, resultando num incremento notável da secção residual. Estes resultados destacam a importância de considerar, não apenas a resistência ao fogo, mas também outros aspetos, como a capacidade de carga, ao otimizar soluções construtivas para enfrentar condições extremas. O estudo efetuado representa uma contribuição no desenvolvimento de estratégias eficientes em projetos arquitetónicos e estruturais [42].

No ano 2023, Pereira [43] desenvolveu um estudo onde são apresentados diversos modelos baseados em elementos finitos, com o objetivo de avaliar o desempenho térmico em elementos de construção quando expostos ao fogo. Os elementos em análise consistiram em vigas de madeira protegidas por placas de gesso, com um dos lados exposto ao fogo, especificamente, paredes divisórias interiores. Esses elementos, classificados como construção leve e rápida, são caracterizados por ter um espaço entre as paredes divisórias ou cavidade de ar, que separa os componentes. A cavidade de ar possibilita o aquecimento ou o resfriamento das superfícies adjacentes. Este tipo de elementos está sujeito a certificações que incluem a classificação da

resistência ao fogo, considerando a integridade e o isolamento dos materiais. O estudo apresentou uma análise térmica em regime transiente, incorporando características não-lineares do material, juntamente com as condições de fronteira que simulam a ação do fogo. A abordagem numérica proposta utilizou elementos finitos PLANE55, SURF151 e LINK34 através de modelo bidimensional. Os resultados numéricos obtidos mostraram uma boa concordância com ensaios experimentais conduzidos por outros investigadores. Essa concordância validou a eficácia do modelo numérico na simulação do aquecimento em cavidade, para este tipo específico de elementos construtivos, contribuindo assim para a compreensão e aperfeiçoamento da análise e resistência ao fogo nos elementos em estudo [43], [44].

2.8. Formulação de Elementos Finitos

O MEF é um método importante na engenharia, dado que apresenta uma abordagem robusta e confiável para a resolução de problemas complexos. Também fornece soluções aproximadas, mas altamente fiáveis. Assim, o MEF destaca-se como uma ferramenta essencial na análise de fenómenos físicos em meios contínuos.

A metodologia utilizada pelo MEF é baseada na discretização do domínio do problema em subdomínios, permitindo a resolução de problemas mais simples representados por equações exatas ou aproximadas. Esta abordagem possibilita a combinação dos resultados dos subdomínios para obter o sistema global necessário para a solução final do problema. Assim, o MEF oferece uma maneira eficiente de lidar com problemas que podem ser computacionalmente intensivos ou desafiadores para métodos analíticos tradicionais [45].

Na resolução de problemas com o MEF, são aplicados procedimentos padronizados que envolvem a decomposição do modelo em elementos de geometria simples e finita. Estes elementos são interligados por nós, cada um com graus de liberdade variáveis de acordo com a análise e as condições de fronteira do problema. A malha formada pelo conjunto de elementos e nós é essencial para a representação precisa do domínio do problema e para a obtenção de resultados confiáveis [45].

Um exemplo específico da aplicação do MEF é na análise térmica em regime transiente. Nesse contexto, o objetivo principal é determinar a evolução dos campos de temperatura em um modelo específico. Isso envolve a solução da equação diferencial da condução de calor, equação 29, para determinar o campo de temperaturas na secção transversal do modelo, com uma solução específica para domínios bidimensionais [45].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

No qual λ é a condutividade térmica do material em W/mK, \dot{Q} o calor gerado internamente em J/m³s e C_p o calor específico em J/kgK.

Para determinar o campo de temperaturas, a equação diferencial deve satisfazer as condições iniciais e de fronteira definidas para o modelo. As condições iniciais descrevem a distribuição de temperatura no instante inicial, enquanto as condições de fronteira podem assumir vários tipos [45]:

- **Condições de fronteira essenciais (ou Condição de Dirichlet):** As temperaturas são especificadas numa região da fronteira, onde a temperatura é igual a um valor conhecido.
- **Condições de fronteira naturais:** Essas condições envolvem um fluxo de calor prescrito em uma parte da fronteira, de acordo com a condição de Newman.
- **Condição de fronteira convectiva:** Representa a transferência de calor por convecção de uma parte da fronteira para a vizinhança, conforme a Condição de Cauchy.
- **Condição de fronteira radiativa:** Consideram-se as trocas de calor por radiação entre uma zona da fronteira a uma temperatura específica e o ambiente a uma temperatura diferente.
- **Condição de fronteira convectiva e radiativa:** Esta condição abrange a troca de calor simultânea por convecção e radiação, definida em uma região específica da fronteira.

Para resolver problemas térmicos usando o MEF e na equação diferencial da condução de calor, aplica-se o método dos resíduos pesados. Esse método envolve a transformação das equações diferenciais para a forma integral, dividindo o domínio em subdomínios ou elementos. Utilizando o método de Galerkin, que discretiza parcialmente os elementos, obtém-se o sistema global de equações para o domínio, conforme definido na equação 30 [45].

$$[K]T + [C]\dot{T} = \{F\} \quad (30)$$

Para o caso de se considerar problemas dimensionais as matrizes K e C e o vetor F são definidos pelas equações 31, 32 e 33, respetivamente:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_c^e \quad (31)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho C_p N_i N_j d\Omega^e \quad (32)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_c^e - \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_i h_{cr} T_{\infty} d\Gamma_c^e \quad (33)$$

Nestas equações a variável E representa o número total de elementos, Q o número de elementos com fronteira natural, H o número de elementos com fronteira convectiva e/ou radiativa, N_i e N_j as funções de forma e h_{cr} o coeficiente de transferência de calor por convecção e/ou radiação.

Para resolver um problema bidimensional descrito pelo sistema de equações diferenciais na equação 30 é necessário discretizá-lo no tempo usando o método das diferenças finitas, conforme a equação 34.

$$\hat{K}_{n+\alpha} T_{n+\alpha} = \hat{F}_{n+\alpha}, 0 < \alpha \leq 1 \quad (34)$$

As parcelas $\hat{K}_{n+\alpha}$ e $\hat{F}_{n+\alpha}$ podem ser definidas pelas equações 35 e 36, respetivamente.

$$\hat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha \Delta t}, 0 < \alpha \leq 1 \quad (35)$$

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha \Delta t} T_n, 0 < \alpha \leq 1 \quad (36)$$

Ao se considerar o intervalo de tempo Δt , o campo de temperaturas é obtido pela equação 37

$$T_{n+1} = \frac{T_{n+\alpha}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) T_n, 0 < \alpha \leq 1 \quad (37)$$

A constante α presente nas equações pode variar para obter diferentes esquemas de integração no tempo. Os sistemas que consideram α como não nulo são designados como implícitos. Os esquemas mais comuns usam valores diferentes de zero para o parâmetro α . Por exemplo, o esquema de Crank-Nicolson utiliza $\alpha = 0,5$, $\alpha = \frac{2}{3}$ de acordo com a regra de Galerkin, e $\alpha = 1$ no esquema de Euler Backward [45].

Cada esquema possui as suas próprias características de estabilidade, convergência e precisão de resultados. Portanto, é difícil determinar qual é o mais eficiente na resolução de problemas. Para materiais como a madeira e o gesso, cujas propriedades térmicas são não lineares, o sistema de equações de Galerkin, na equação 30, pode ser formulado com a equação 38 [45].

$$[K]_{(T,t)} T(t) + [C]_{(T,t)} \dot{T}(t) = \{F\}_{(T,t)} \quad (38)$$

Dando importância à equação anterior, as matrizes $[K_{n+\alpha}]$ e $[C_{n+\alpha}]$ e o vetor $\{F_{n+\alpha}\}$ variam ao longo do intervalo de tempo Δt em função da temperatura T e do tempo t , sendo definidas pelas equações 39, 40 e 41, respectivamente.

$$K_{n+\alpha} = K(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (39)$$

$$C_{n+\alpha} = C(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (40)$$

$$F_{n+\alpha} = F(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (41)$$

Além disto, para garantir a convergência do método de resolução, é necessário aplicar um processo iterativo, especialmente devido às condições da não linearidade das propriedades térmicas dos materiais, que dependem da temperatura. Para isto, é comum utilizar o método de Newton-Raphson modificado. Este método resolve iterativamente o sistema de forças residuais descrito na equação 42.

$$\psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i - \hat{K}_{n+\alpha}^i T_{n+\alpha}^{i+1} \neq 0 \quad (42)$$

Considerando a aplicação da simplificação do método iterativo interpreta-se que a solução corrigida $T_{n+\alpha}^{i+1}$, em cada iteração, é obtida através das equações 43 e 44, respectivamente.

$$\Delta T_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}]^{-1} \psi_{n+\alpha}^i \quad (43)$$

$$T_{n+\alpha}^{i+1} = T_{n+\alpha}^i + \Delta T_{n+\alpha}^i \quad (44)$$

A resolução do sistema anterior traduz-se na obtenção de $\Delta T_{n+\alpha}^i$ por iteração até se alcançar a convergência de resultados. Deste modo, a matriz $[K_{n+\alpha}]$ é incrementada a cada iteração. Assim, o critério de convergência considerado na resolução do problema representa-se pela equação 45.

$$\frac{\|\Delta T_{n+\alpha}^i\|}{\|T_{n+\alpha}^{i+1}\|} = \frac{\|T_{n+\alpha}^{i+1} - T_{n+\alpha}^i\|}{\|T_{n+\alpha}^{i+1}\|} < TOL \quad (45)$$

Onde TOL é a tolerância admitida, $\|\cdot\|$ a norma euclidiana, $\Delta T_{n+\alpha}^i$ a alteração do campo de temperaturas e $T_{n+\alpha}^{i+1}$ a temperatura atual.

Revisão Bibliográfica

3. Análise Térmica

Neste capítulo consideram-se seis modelos diferentes. Tais modelos são essenciais para a compreensão do comportamento térmico e estrutural da construção, na medida em que os mesmos representam a combinação dos materiais utilizados e a existência ou não de isolamento, assim como parafusos de aço. Para a realização da análise térmica transiente não linear dos materiais envolvidos nos modelos em estudo, foi escolhido o programa ANSYS®2023 R2. Este programa é baseado no MEF e é conhecido pela versatilidade em simular fenômenos térmicos e estruturais complexos, de forma linear ou não linear e transiente.

3.1. Modelos de divisórias de paredes

Os seis modelos dividem-se em duas categorias principais: três deles representam as cavidades vazias, isto é desprovidas de qualquer tipo de isolamento no interior das cavidades (CAV, CAV_CR, CAV_SR); e os outros três são preenchidos com lã de vidro para isolamento térmico (ISOL, ISOL_CR, ISOL_SR),

Tabela 13.

Tabela 13 – Modelos de divisórias de paredes usados neste estudo

Tipo de modelo	Designação	Materiais
Cavidade vazia	CAV	Madeira e gesso
Cavidade vazia aparafusada com rosca	CAV_CR	Madeira, gesso, parafusos de aço com rosca
Cavidade vazia aparafusada sem rosca	CAV_SR	Madeira, gesso e parafusos de aço sem rosca
Cavidades preenchidas com isolamento	ISOL	Madeira, gesso, fibra de vidro
Cavidades preenchidas com isolamento aparafusadas com rosca	ISOL_CR	Madeira, gesso, fibra de vidro e parafusos de aço com rosca
Cavidades preenchidas com isolamento aparafusadas com rosca	ISOL_SR	Madeira, gesso, fibra de vidro e parafusos de aço sem rosca

A configuração dos modelos foi definida com base nas dimensões e características típicas de elementos construtivos usados na indústria. A Figura 22 ilustra a configuração adotada para os seis modelos.

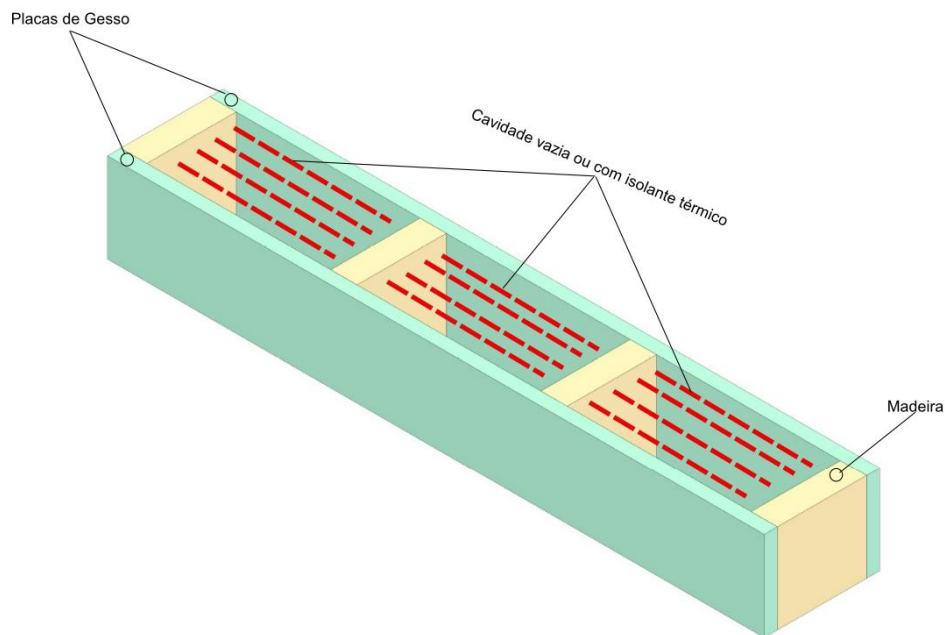


Figura 22 – Modelo de paredes divisórias

A análise foi realizada utilizando uma secção transversal bidimensional (2D) do elemento construtivo, que é representativa da configuração típica das paredes internas.

Para este estudo, o elemento construtivo inclui três cavidades formadas por colunas de madeira GL32H, que são protegidas por placas de gesso do tipo F, em ambos os lados. Um dos lados é exposto ao fogo, enquanto o outro permanece intacta, permitindo avaliar o isolamento térmico e estrutural em caso de incêndio. As dimensões consideradas neste estudo foram: a altura das colunas de madeira ($H = 120 \text{ mm}$), a largura das colunas de madeira ($W = 50 \text{ mm}$), a espessura da placa de gesso ($T_g = 25 \text{ mm}$). A distância D fixada entre os centros das colunas de madeira foi de 400 mm .



Figura 23 - Dimensões dos modelos

Para a determinação das ligações, recorreu-se ao EC3 EN 1993-1-8 [46]. Um dos fatores a ter em conta na determinação das ligações, foi utilizar a ligação com a maior transferência de calor, ou seja, a ligação com maior secção reta. Segundo o EC 3 EN 1993-1-8 [46], as ligações aparafusadas possuem distâncias mínimas em relação às extremidades. Para o cálculo da distância mínima à extremidade considerou-se o montante de madeira, visto que é o elemento com menor largura.

Assim para a determinação do diâmetro do para fuso recorreu-se à fórmula, presente EC3 EN 1993-1-8 [46]:

$$e_1 = 1,2 \times d_0$$

no qual e_1 é a distância mínima à extremidade e d_0 o furo normalizado. Uma vez que a distância e_1 é medida desde a extremidade até ao centro do parafuso e visto que a largura do montante de madeira é de 50 mm, então a distância e_1 a considerar é 25 mm. Assim, conseguiu-se determinar d_0 de 20 mm.

Com o valor de d_0 , determinou-se o diâmetro do parafuso (d) através da norma ISO 4014 [47], o parafuso M18. Por outro lado, também o comprimento do parafuso foi determinado. Assim, e analisando o modelo construtivo atribuiu-se uma distância mínima entre as extremidades dos parafusos de 50 mm. Uma vez que o modelo tem 170 mm de comprimento, sobriariam 120 mm para dois parafusos, isto é, os parafusos só podiam ter um comprimento máximo de 60 mm. Recorreu-se ao livro [48], para verificação do comprimento mínimo para um parafuso M18, que seria de 70 mm, o que não cumpre os requisitos. Para a solução construtiva em análise, o parafuso com o comprimento mínimo de 60 mm é o M14, que também respeita o critério de distância mínima à extremidade. Por isso, as ligações escolhidas são parafusos M14, com um comprimento de 60 mm.

Os parafusos desempenham um papel crucial na ligação das placas de gesso às colunas de madeira e a inclusão ou exclusão da rosca nos parafusos permite analisar o impacto da fixação no comportamento global da estrutura, Figura 24.

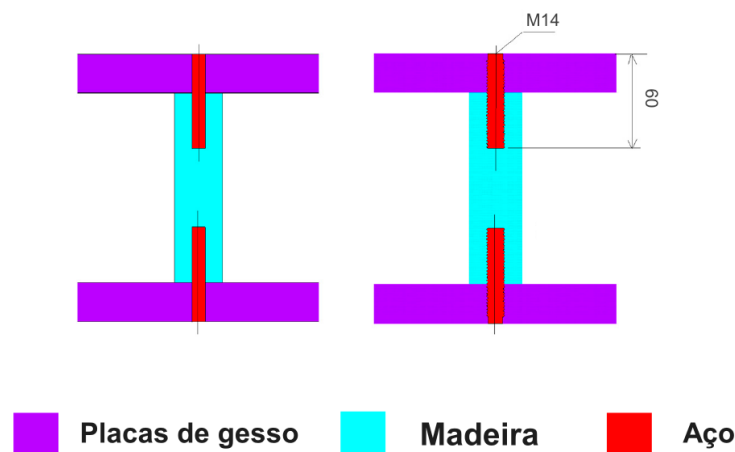


Figura 24 - Parafusos de ligação entre placa de gesso e madeira

A escolha e a configuração dos seis modelos são importantes para uma análise detalhada e precisa do comportamento do elemento construtivo sob diferentes condições. A próxima fase do estudo envolverá a aplicação destes modelos construtivos no programa ANSYS® 2023 R2, onde será realizada uma análise térmica transiente para avaliar o desempenho dos materiais ao fogo e determinar as melhores configurações.

3.2. Aplicação do Método de Elementos Finitos

Para aplicação do MEF utilizou-se o programa ANSYS® para a análise térmica transiente e não linear dos materiais. Com isto, representou-se um plano típico do modelo de parede divisória, construindo uma malha bidimensional adequada para a análise numérica.

A malha utilizada no modelo numérico foi construída tendo em consideração a menor dimensão dos materiais presentes, isto é a espessura do gesso. O tamanho da malha foi cuidadosamente calculado para garantir uma representação precisa dos fenómenos térmicos. O número de elementos finitos foi ajustado para que cada elemento tivesse menos de 10 mm, resultando assim em três elementos ao longo da espessura do gesso. Este ajuste garantiu que o comprimento dos elementos fosse uniforme em toda a malha, promovendo uma análise mais consistente.

Em todas as simulações numéricas, foi utilizado o contacto perfeito entre os materiais, ou seja, qualquer interação entre os materiais não se considera. Isto simplifica o modelo e permite uma condução direta da energia térmica entre os materiais adjacentes. Os elementos finitos a utilizar na construção dos atuais modelos do presente estudo, já tinham sido propostos e validados por D. Pereira et al. [49][50], com um trabalho experimental de teste.

Os elementos finitos a utilizar na análise térmica são o PLANE55, SURF151 e LINK34.

O elemento finito PLANE55, também designado por *2-D Thermal Solid* é caracterizado pela sua capacidade de condução térmica no plano bidimensional e utiliza um único grau de liberdade, a temperatura, em cada nó. Tal característica torna-o particularmente adequado para o uso em modelos numéricos de análise térmicas, seja em regime estacionário ou transiente [51].

A aplicação do elemento PLANE55 possibilita a obtenção de resultados precisos, como temperaturas nodais, gradientes térmicos e componentes do fluxo de calor na secção transversal do modelo. Estes resultados são fundamentais para a compreensão detalhada do comportamento térmico dos materiais analisados.

Este elemento será utilizado nos diferentes modelos já referidos. Este elemento terá um papel crucial na condução térmica nos montantes de madeira lamelada colada GL32H, nas placas de gesso do tipo F e também na lâ de vidro.

A geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento finito PLANE55 estão representados na Figura 25. Esta representação gráfica ajuda a visualizar como o elemento é integrado nos modelos numéricos e a compreender a distribuição dos nós e a forma como a condução térmica é modelada.

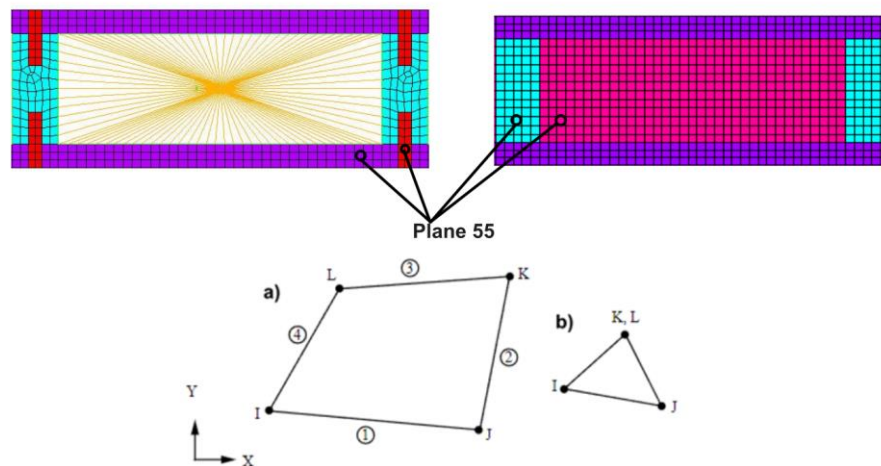


Figura 25 - Elemento finito PLANE55: a) quatro nós, b) três nós

O elemento finito SURF151 (*2-D Thermal Surface Effect*) permite a aplicação de diversos carregamentos ou ações de efeito superficial, podendo também ser sobreposto e utilizado em simultâneo com outros elementos bidimensionais. Este é constituído por dois nós associados a um nó extra, conforme a Figura 26 [51]. A utilização deste elemento é crucial para uma modelação precisa da transferência de calor por radiação que é um dos modos de transferência de calor relevantes nas situações de incêndio.

Este tipo de elemento finito utilizar-se-á nos modelos de cavidades vazias para simular o efeito da transferência de calor por radiação entre as paredes das cavidades. Assim, e tendo em conta a representação deste elemento na Figura 26, I e J representam os nós nas paredes internas das cavidades e, K representa um nó extra que será colocado no interior da cavidade. Será este nó extra que ao longo do processo de evolução da temperatura irá realizar as trocas de calor por radiação com os nós superficiais. Estes últimos irão transmitir essa energia térmica por condução aos montantes de madeira lamelada colada GL32H e às placas de gesso de tipo F, através da coexistência dos elementos SURF151 e PLANE55.

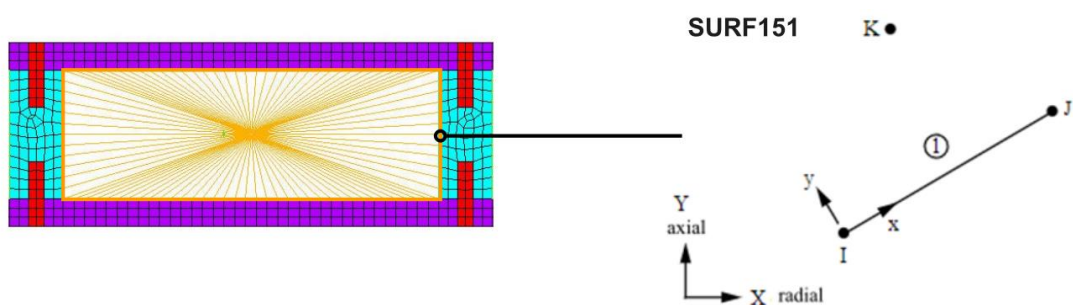


Figura 26 -Elemento finito SURF151

O elemento finito LINK34 (*Convection Link*) é um elemento de barra que tem a capacidade de modelar a convecção em análises bidimensionais ou tridimensionais, tanto em regime estacionário como transiente. Este é composto por um nó associado a um nó extra, como ilustrado na Figura 27 [51].

Também este elemento será utilizado nos modelos de cavidades vazias para simular o efeito da transferência de calor por convecção entre as paredes das cavidades. Deste modo, e considerando a representação deste elemento na Figura 27, o nó I, representa os nós da fronteira das cavidades, enquanto o nó J define um nó localizado no interior da cavidade. É esta configuração que permite simular de maneira eficaz a transferência de calor por convecção dentro das cavidades.

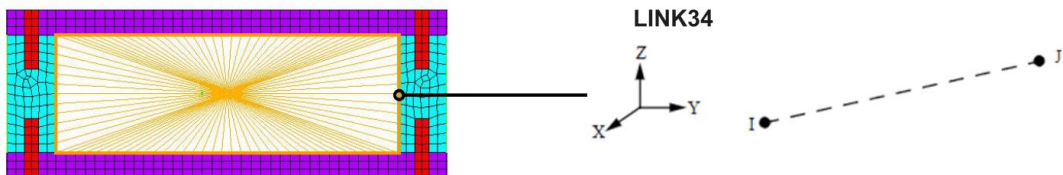


Figura 27 - Elemento finito LINK34

A combinação dos elementos PLANE55, SURF151 e LINK34 permite uma análise abrangente das interações térmicas nos modelos numéricos, garantindo que a condução, a convecção e a radiação, são devidamente consideradas. Esta abordagem resulta numa representação mais realista do comportamento térmico dos elementos construtivos submetidos a condições de fogo, permitindo a avaliação detalhada da resistência ao fogo e da integridade estrutural dos materiais analisados.

3.3. Condições de fronteira

De acordo com EC1 EN1991-1-2 [12], estabeleceram-se as condições de fronteira específicas para garantir a precisão da análise térmica transiente dos modelos. Estas condições permitem simular o impacto do fogo na parede e incluem diferentes mecanismos de transferência de calor, como radiação e convecção, conforme descrito de seguida.

As condições de fronteira foram aplicadas nas simulações numéricas da seguinte forma:

- **Radiação e Convecção no lado exposto ao fogo:** No lado da parede divisória que é diretamente exposto ao fogo, foi imposta a curva padrão de fogo ISO 834 [13], que simula a evolução da temperatura ao longo do tempo. Tanto a radiação como a convecção foram consideradas para replicar o efeito completo do fogo na superfície.
- **Radiação e Convecção na cavidade:** Dentro das cavidades da parede, a evolução da temperatura foi imposta utilizando curvas específicas para cada cenário: ISOL, ISOL_CR, ISOL_SR. Estas curvas refletem as condições internas das cavidades preenchidas com fibra de vidro, levando em consideração os efeitos de radiação e convecção.
- **Convecção no lado não exposto ao fogo:** No lado da parede que não está diretamente exposto ao fogo, apenas a convecção foi considerada, representando a dissipação de calor para o ambiente.

- **Condições Adiabáticas nas Arestas Laterais:** As arestas laterais da parede foram tratadas como condições adiabáticas, ou seja, sem troca de calor com o ambiente, ou sem aplicação de condições específicas, simplificando a sua modelação.
- **Condição Inicial de Temperatura Ambiente:** Foi assumida uma temperatura ambiente inicial de 20 °C em todos os modelos, estabelecendo um ponto de partida uniforme para a análise térmica

Para além disto, a emissividade dos materiais envolvidos desempenha um papel crucial na análise térmica, influenciando a quantidade de radiação térmica emitida por cada superfície. Os valores de emissividade utilizados foram os seguintes:

- Madeira: 0,8 [49][50]
- Placa de Gesso: 0,85 [49][50]
- Lã de vidro: 0,75 [31]
- Aço: 0,7 [28]

Além disso, os coeficientes de convecção foram definidos de acordo com as recomendações do EC1 EN1991-1-2 [12]:

- Face exposta ao fogo: 25W/m²K
- Lado não exposto ao fogo: 9 W/m²K
- Cavidades: 17,5 W/m²K

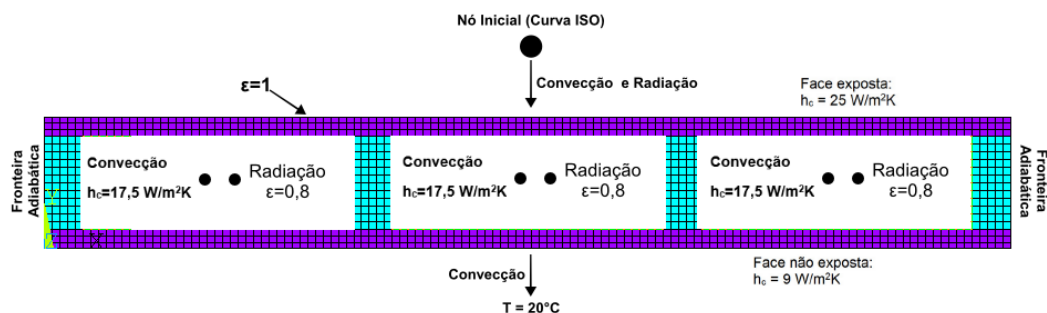


Figura 28 -Condições de Fronteira

O método utilizado nas simulações térmicas foi o de Newton-Raphson como método iterativo para tratar as condições não lineares do problema. Este método é eficiente para resolver as equações diferenciais não lineares, comuns em análises térmicas de materiais em condições de incêndio.

Para a garantir a precisão dos resultados, foi adotado um critério de convergência baseado no fluxo de calor, com uma tolerância de 0,9. Outras variáveis de controlo foram mantidas nos valores padrão recomendados pelo programa ANSYS®.

Nas Figuras 29, 30 e 31 estão representados os modelos das cavidades vazias.

A Figura 29 ilustra o modelo numérico CAV, que é um modelo básico sem parafusos, composto por elementos de plano e de superfície para modelar a placa de gesso e madeira.

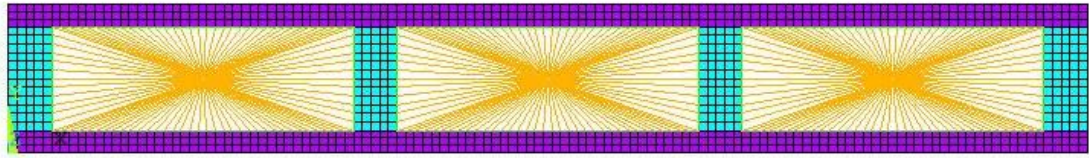


Figura 29 - Modelo numérico CAV

A Figura 30 representa o modelo numérico CAV_CR, que é um modelo que incorpora parafusos de aço roscados para ligar a placa de gesso à madeira.

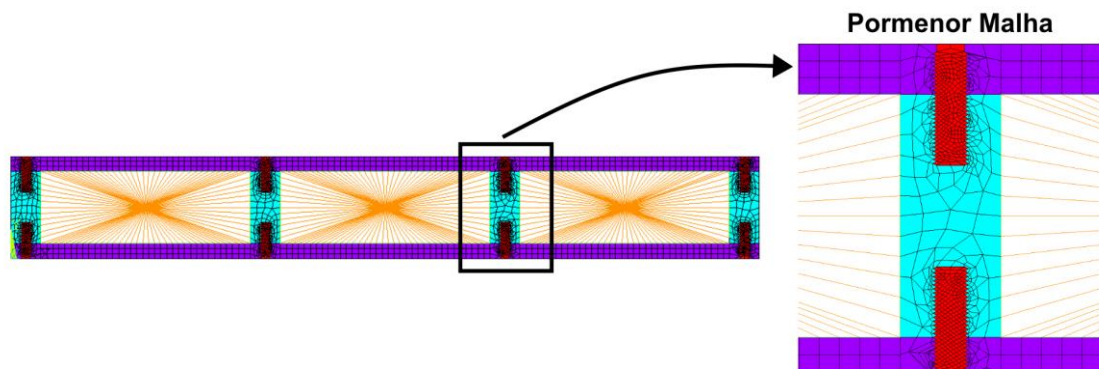


Figura 30 - Modelo numérico CAV_CR

A Figura 31 representa o modelo numérico CAV_SR, que é um modelo similar ao representado na Figura 30, mas com parafusos sem rosca.

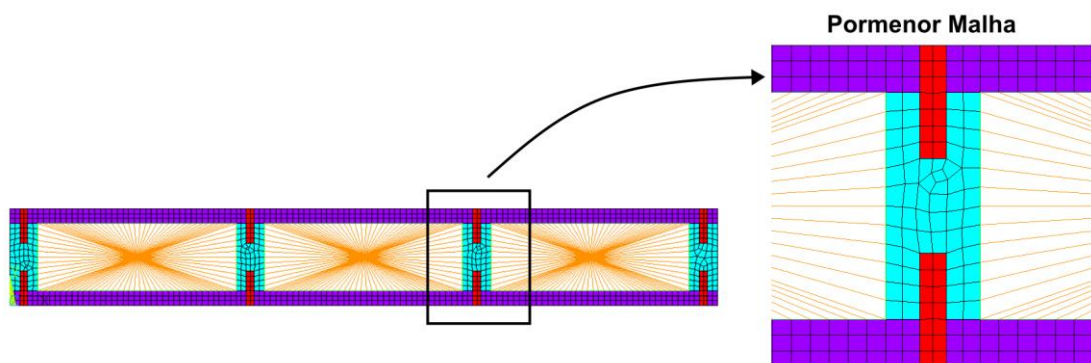


Figura 31 - Modelo numérico CAV_SR

Por outro lado, as Figuras 32, 33 e 34 representam os modelos de cavidades preenchidas com isolamento térmico.

A Figura 32 ilustra o modelo ISOL, que é um modelo preenchido com material isolante (lã de vidro), utilizando elementos planos.

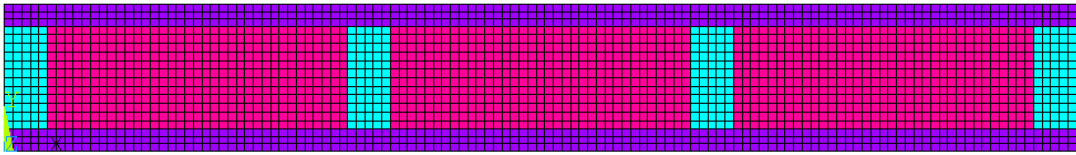


Figura 32 - Modelo numérico ISOL

A Figura 33 representa o modelo ISOL_CR, modelo preenchido com lã de vidro e com parafusos de aço roscados.

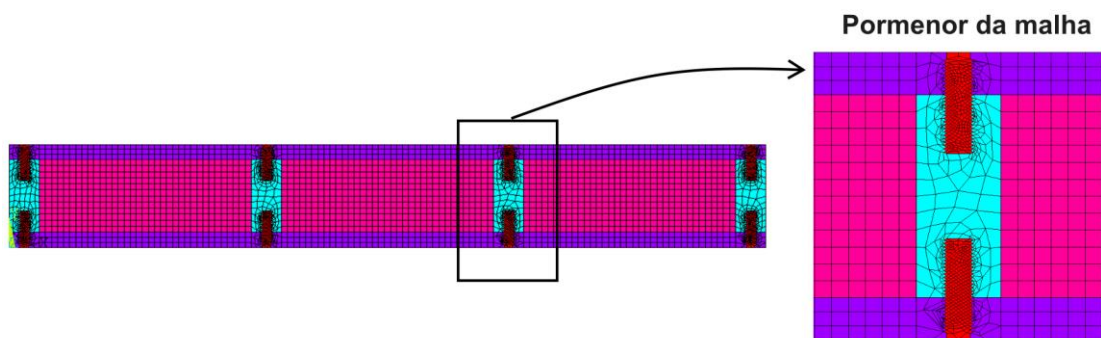


Figura 33 - Modelo numérico ISOL_CR

A Figura 34 ilustra o modelo ISOL_SR, modelo similar ao representado na Figura 33, mas com parafusos sem rosca.

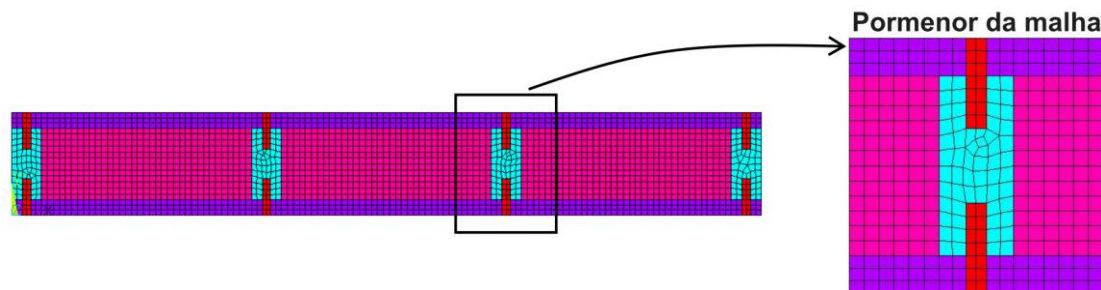


Figura 34 - Modelo numérico ISOL_SR

No entanto, foi necessário considerar um segundo cenário para os modelos de cavidades com isolamento térmico. Este cenário deriva por causa do ponto de fusão da lã de vidro.

A lã de vidro possui um ponto de fusão médio de 537 °C [35], e nos modelos ISOL, ISOL_CR e ISOL_SR não se contabilizava a fusão da lã de vidro. Assim sendo, através das simulações dos modelos ISOL, ISOL_CR e ISOL_SR, geraram-se as curvas de temperaturas que servirão de condições fronteira, porque consideram a evolução da temperatura dentro da cavidade. Estas curvas foram impostas aos três modelos anteriores para refletir a evolução da temperatura no tempo, especialmente após o ponto de fusão da fibra de vidro. Criaram-se assim os modelos ISOL1, ISOL_CR1 e o ISOL_SR1, com as novas condições de fronteira, presentes nas Figuras 35, 36 e 37.

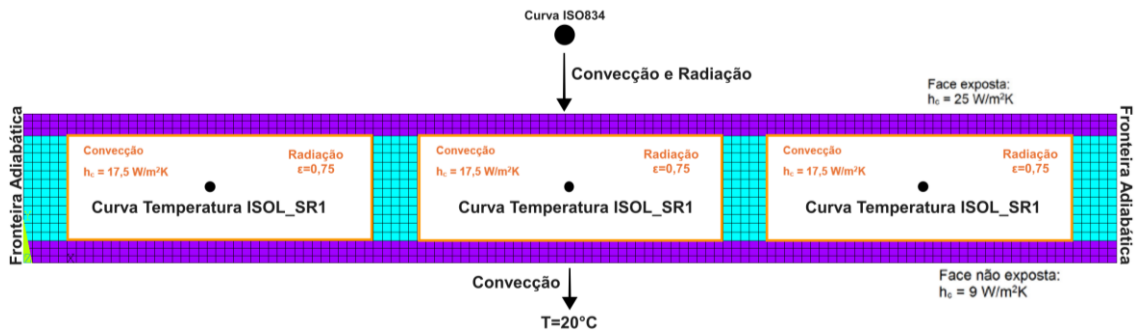


Figura 35 - Modelo numérico ISOL1 e as suas condições de fronteira

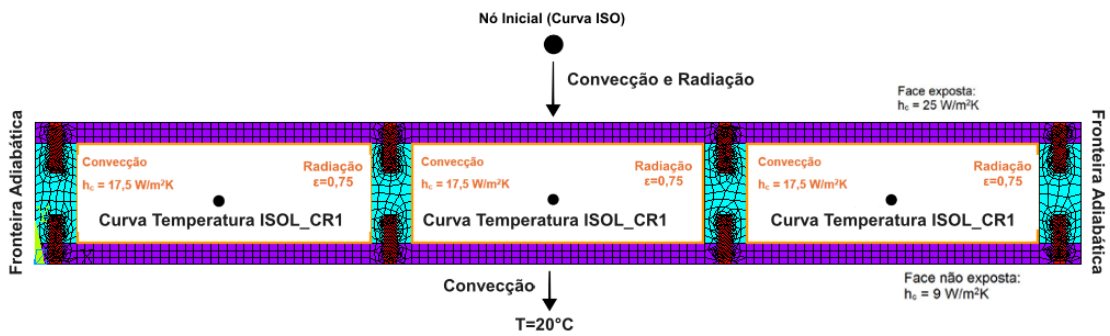


Figura 36 - Modelo numérico ISOL_CR1 e as suas condições de fronteira

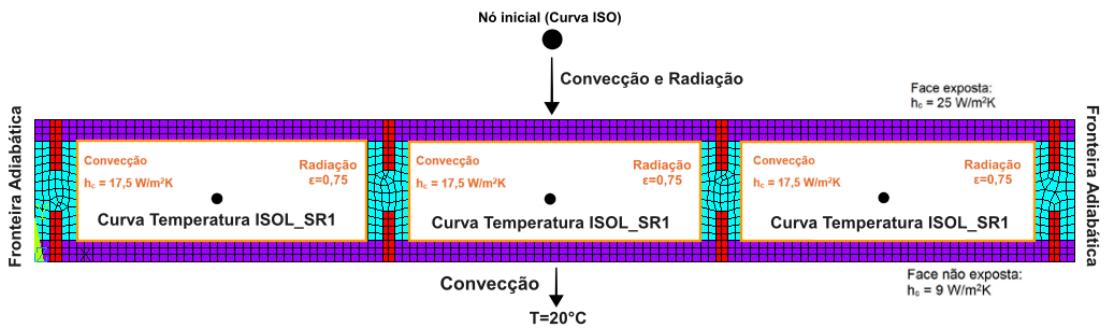


Figura 37 - Modelo numérico ISOL_SR1 e as suas condições de fronteira

O procedimento para o desenvolvimento das curvas de temperaturas dos modelos ISOL1, ISOL_CR1 e ISOL_SR1 constitui numa primeira fase retirar as curvas de temperatura dos modelos ISOL, ISOL_CR e ISOL_SR num nó do interior da cavidade. Estas curvas estão presentes nas Figuras 38, 39 e 40.

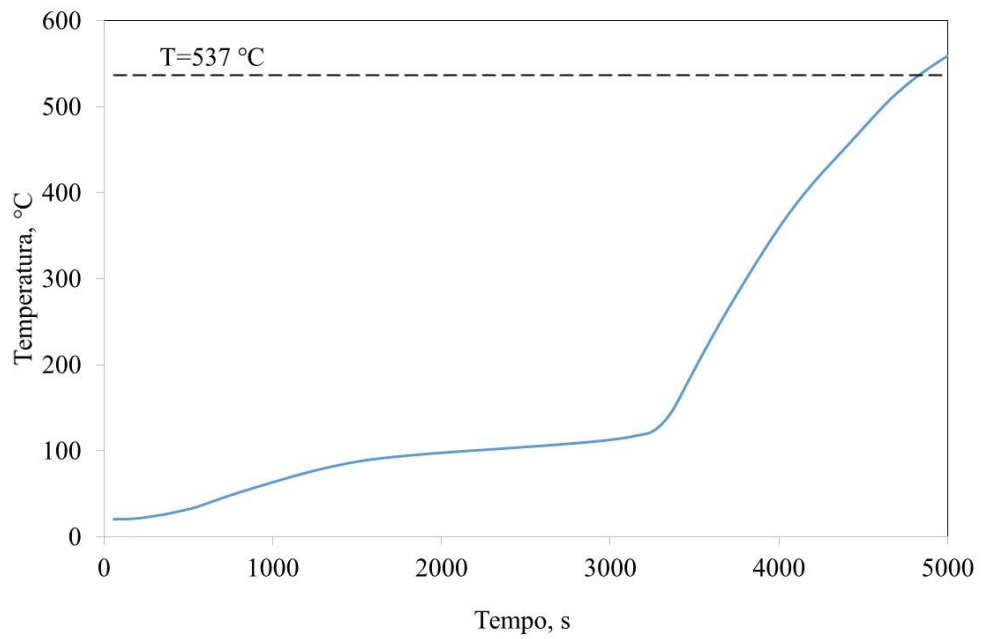


Figura 38 - Curva de temperatura de um nó do interior da cavidade do modelo ISOL

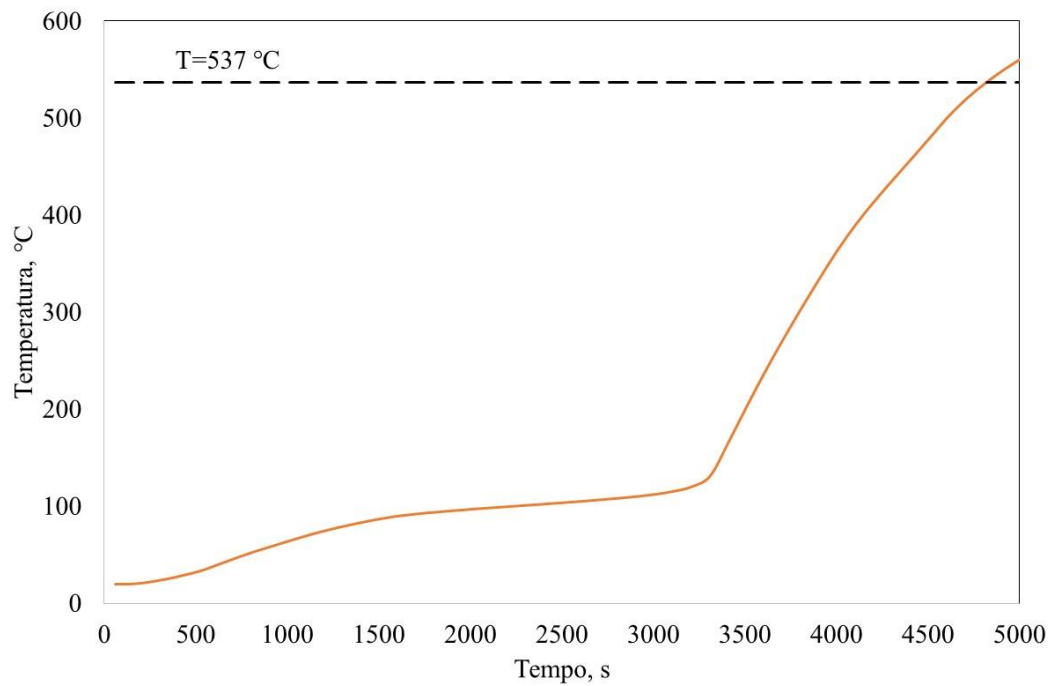


Figura 39 - Curva de temperatura de um nó do interior da cavidade do modelo ISOL_CR

Análise Térmica

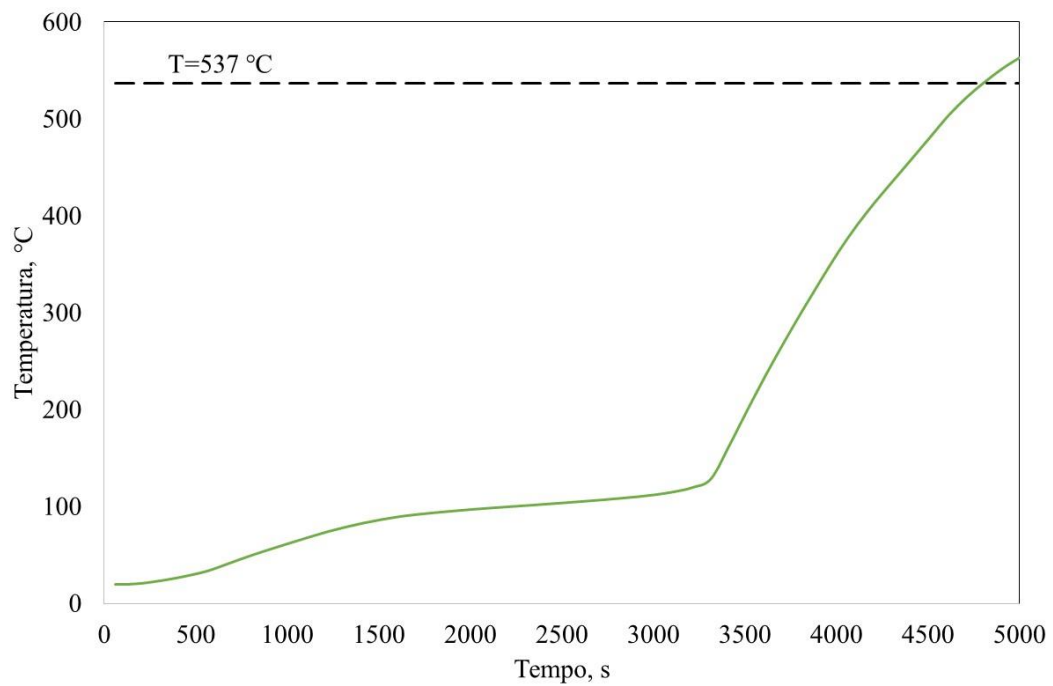


Figura 40 - Curva de temperatura de um nó da cavidade do modelo ISOL_SR

Numa segunda fase foi obtidas as curvas de temperatura dos modelos CAV, CAV_CR, CAV_SR num nó no interior da cavidade. Estas curvas estão representadas nas Figuras 41, 42 e 43.

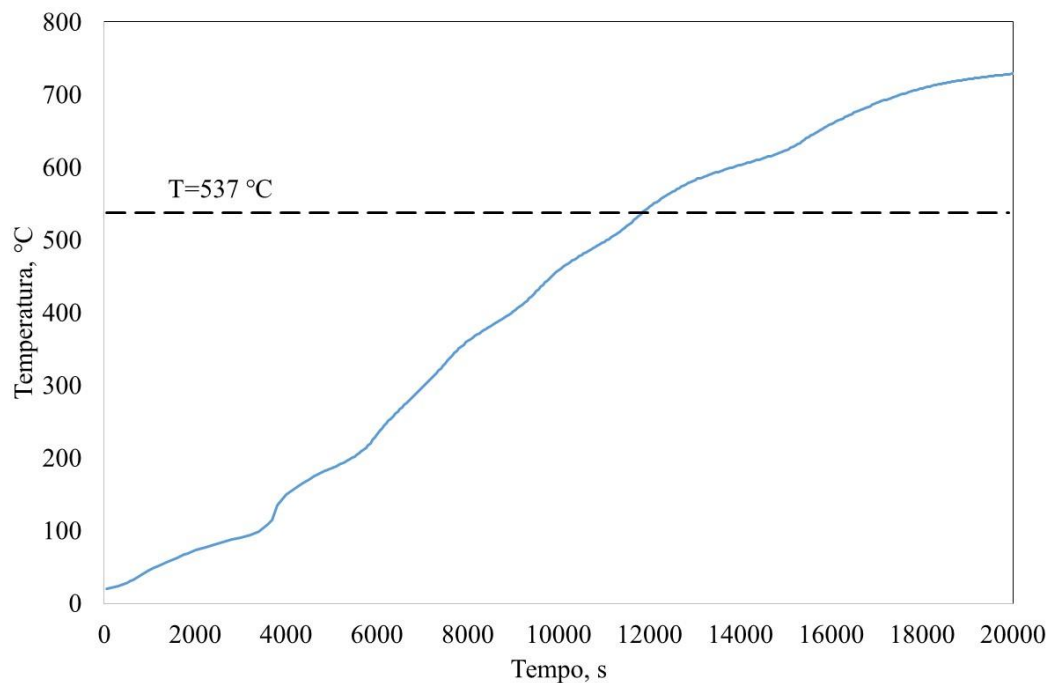


Figura 41 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV

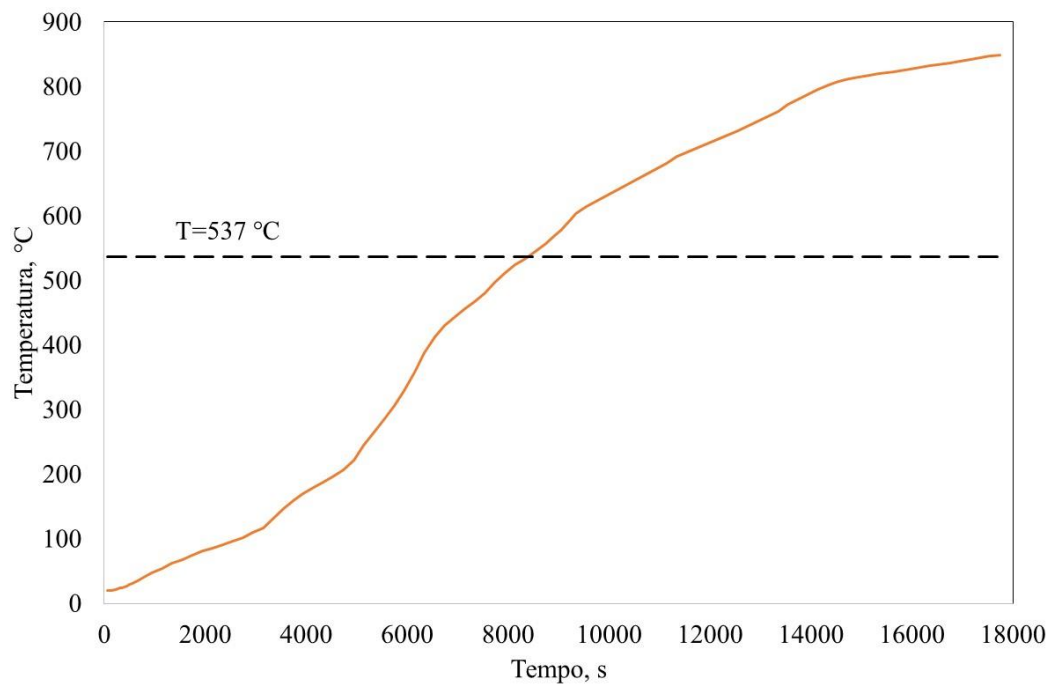


Figura 42 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV_CR

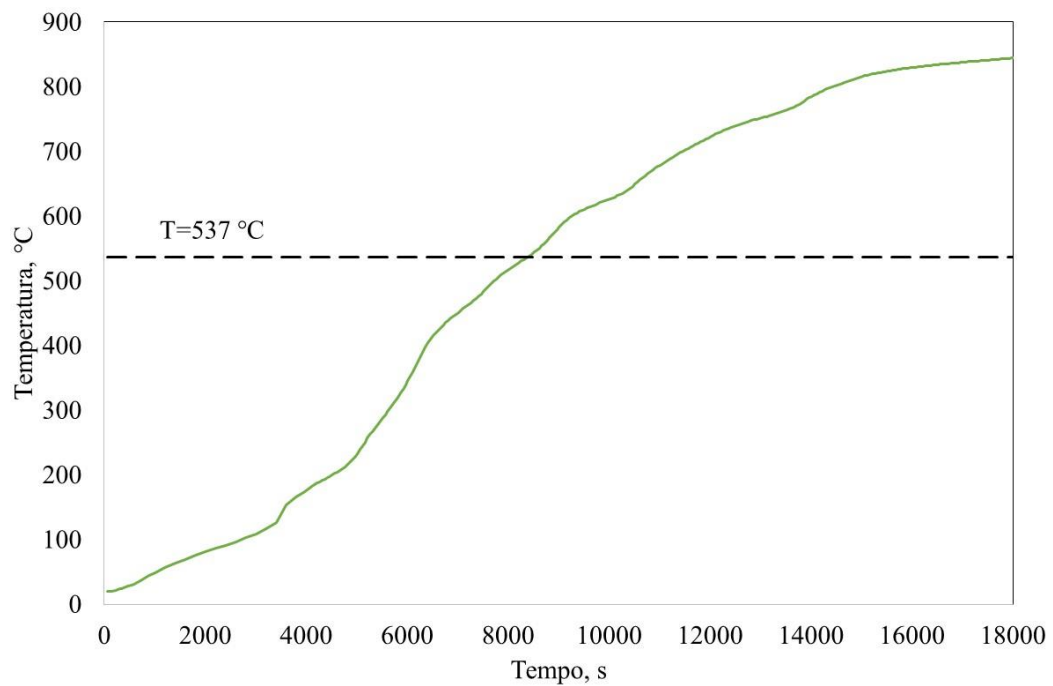


Figura 43 - Curva de temperatura do interior da cavidade do modelo CAV_SR

Por fim, combinaram-se as curvas dos modelos com cavidades preenchidas com isolamento até aos 537 °C com as curvas dos modelos de cavidades vazias a partir dos 537 °C, obtendo as curvas finais da Figura 44.

Análise Térmica

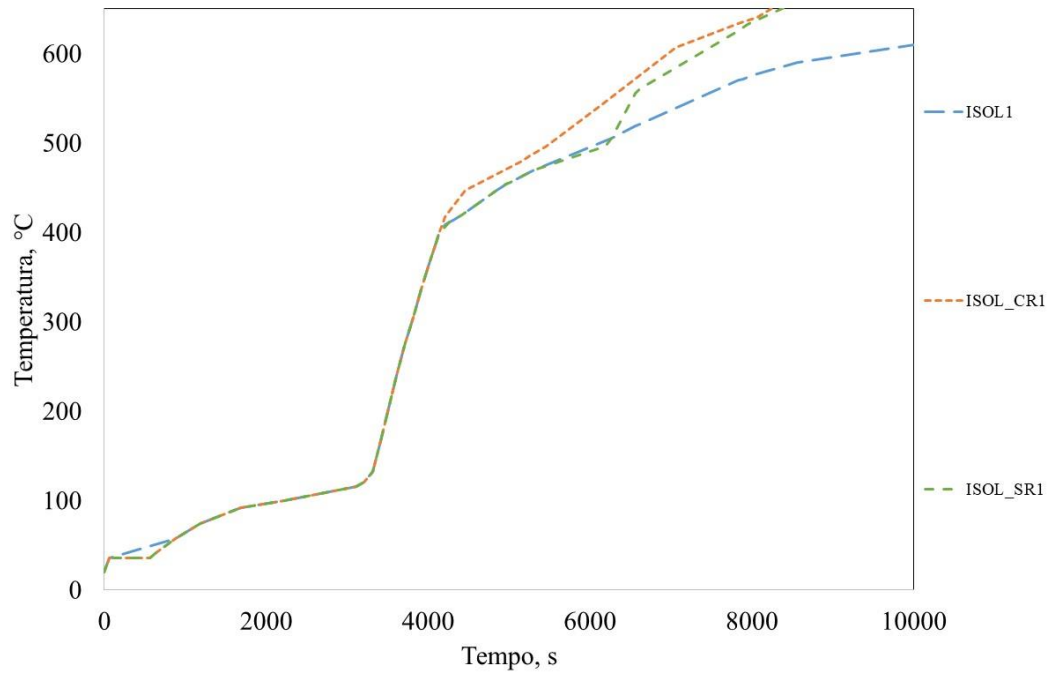


Figura 44 - Curvas de temperaturas para os modelos ISOL1, ISOL_SR1 e ISOL_CR1

A criação dos modelos ISOL1, ISOL_CR1 e ISOL_SR1, permite que os modelos numéricos sejam mais próximos da situação real, tornando-os assim mais robustos na avaliação do comportamento dos modelos com a cavidade preenchida a lã de vidro, sob condições de incêndio.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo realizar-se-á uma análise minuciosa dos resultados após a simulação dos modelos numéricos CAV, CAV_CR, CAV_SR, ISOL1, ISOL_SR1 e ISOL_CR1.

Primeiramente, será realizada a verificação do critério de isolamento térmico nos modelos numéricos desenvolvidos. Este critério é importante para assegurar que os modelos não só apenas reproduzem a distribuição de temperaturas corretamente, como também atendem aos requisitos de desempenho térmico estabelecidos. Para além disto, serão comparados os vários modelos entre si.

4.1. Critério de Isolamento Térmico na Avaliação da Resistência ao Fogo

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é fundamental para garantir a segurança em situações de incêndio. Para determinar essa resistência, aplica-se o critério de isolamento térmico conforme definido pela norma EN 1363-1 [6]. Este critério avalia a capacidade do elemento em limitar a transferência de calor para o lado não exposto ao fogo, prevenindo assim que temperaturas excessivas comprometam a integridade estrutural ou causem ignição de materiais adjacentes. O critério de isolamento térmico é estabelecido com base na medição da temperatura na face não exposta do elemento testado. Especificamente, a resistência ao fogo é definida pelo menor intervalo de tempo em que qualquer das seguintes condições é atingida:

- **Temperatura Pontual Máxima (T_{máx}):** A temperatura em qualquer ponto da superfície não exposta não deve exceder 180°C acima da temperatura inicial (T₀). Considerando uma temperatura inicial padrão de 20°C, o limite de T_{máx} é 200°C.
- **Temperatura Média na Superfície (T_{méd}):** A média das temperaturas medidas em vários pontos da superfície não exposta não deve ultrapassar 140°C acima da temperatura inicial (T₀). Assim, para uma temperatura inicial de 20°C, o limite de T_{méd} é 160°C.

Para analisar a evolução da temperatura na face não exposta ao fogo, definiram-se diferentes pontos de medição. Estes pontos nodais foram distribuídos de modo a proporcionar uma representação precisa da distribuição térmica ao longo da superfície. A Figura 45 ilustra a distribuição dos nós numerados de 1 a 13, organizados da esquerda para a direita.

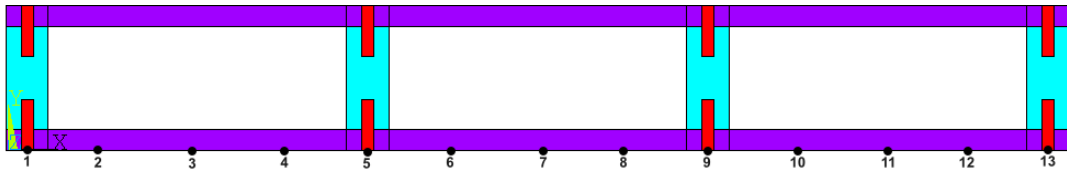


Figura 45 - Pontos nodais a considerar para calcular o valor de isolamento térmico

Durante as simulações, todos os modelos foram analisados com intervalos de tempo de 10 segundos, e um incremento de 1 segundo no mínimo. Este intervalo de tempo permitiu perceber todas as mudanças de temperatura correspondentes com precisão à medida que a ignição ocorria e produzia pontos próximos ao colapso térmico.

4.1.1. MODELO CAV

Para determinar o momento em que os limites de temperatura são atingidos, procedeu-se à simulação da evolução térmica do elemento construtivo sob exposição ao fogo. A simulação considerou um período de 300 minutos (5 horas).

Durante a simulação, monitorizou-se continuamente a temperatura dos treze pontos nodais. Os dados obtidos permitiram calcular tanto a temperatura média ($T_{méd}$) quanto a temperatura pontual máxima ($T_{máx}$) em diferentes intervalos de tempo. A interseção desses valores com os limites estabelecidos (160°C para $T_{méd}$ e 200°C para $T_{máx}$) determinou o desempenho do elemento construtivo em termos de isolamento térmico.

Na Figura 46 verificam-se os gráficos correspondentes à evolução da temperatura média na face não exposta e a temperatura do nó onde atinge a temperatura máxima.

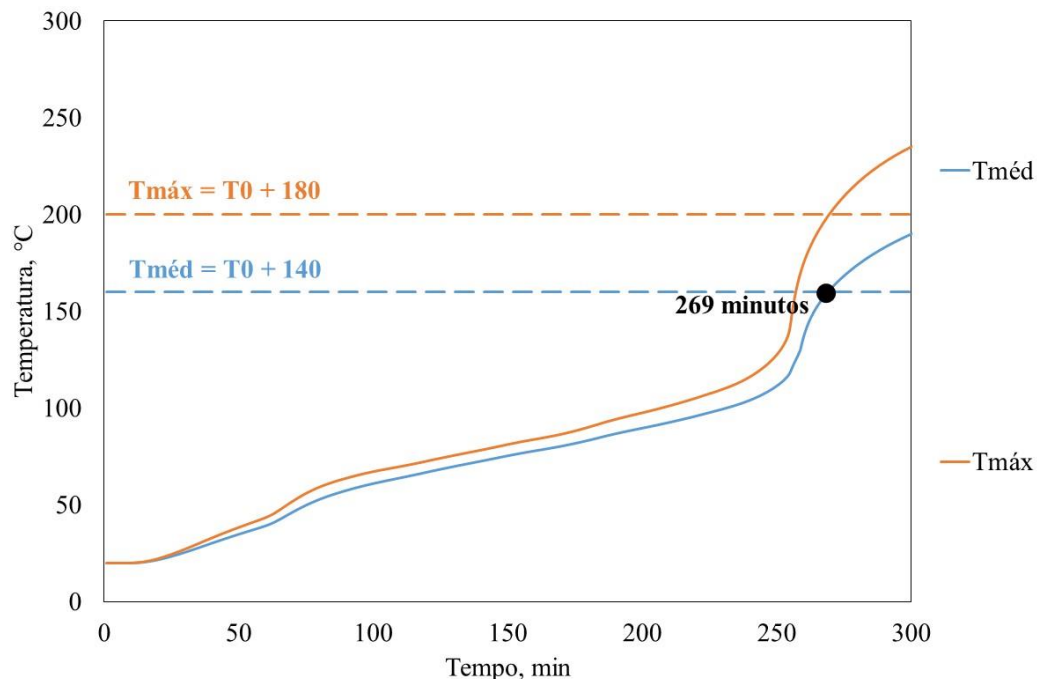


Figura 46 – Critério de isolamento térmico do modelo CAV

Analisando o gráfico, a primeira interseção é com o critério de isolamento térmico $T_{méd}$. Esta interseção realiza-se aos 269 minutos, o que está em conformidade com estudos anteriores, que indicavam uma resistência ao fogo 253,5 minutos. A ligeira diferença de 15,5 minutos pode ser atribuída à variação no intervalo de tempo utilizado nas diferentes simulações. Para o tempo de resistência ao fogo, determinou-se o campo de temperaturas respetivo, Figura 47.

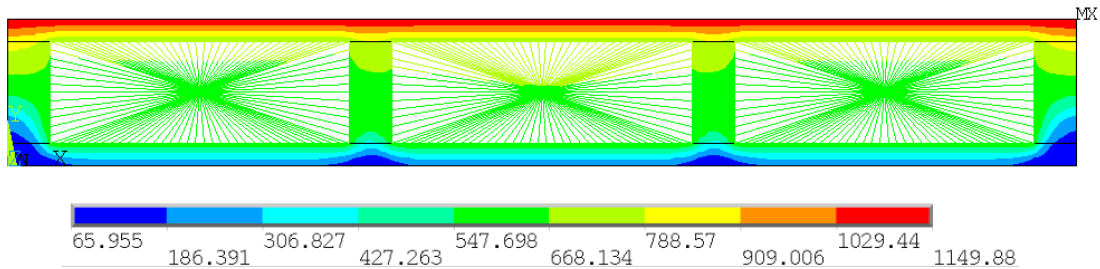


Figura 47 - Campo de temperatura do modelo CAV ao fim 269 minutos

Observando a Figura 47, é possível verificar que nas zonas onde possuem montantes de madeira, as temperaturas no lado não exposto ao fogo são as menores enquanto nas zonas onde se tem a cavidade vazia as temperaturas são mais altas.

4.1.2. Modelo CAV_SR

Para determinar o tempo de resistência ao fogo neste modelo, procedeu-se também à simulação da evolução térmica do elemento construtivo ao fogo, para o mesmo, para o mesmo de 300 minutos (5 horas).

Neste modelo também se monitorizou a temperatura de treze pontos nodais.

Após esta monitorização obtiveram-se os gráficos presentes na Figura 48, com a evolução da temperatura média na face não exposta ao fogo e a evolução da temperatura do nó onde se localiza a temperatura máxima.

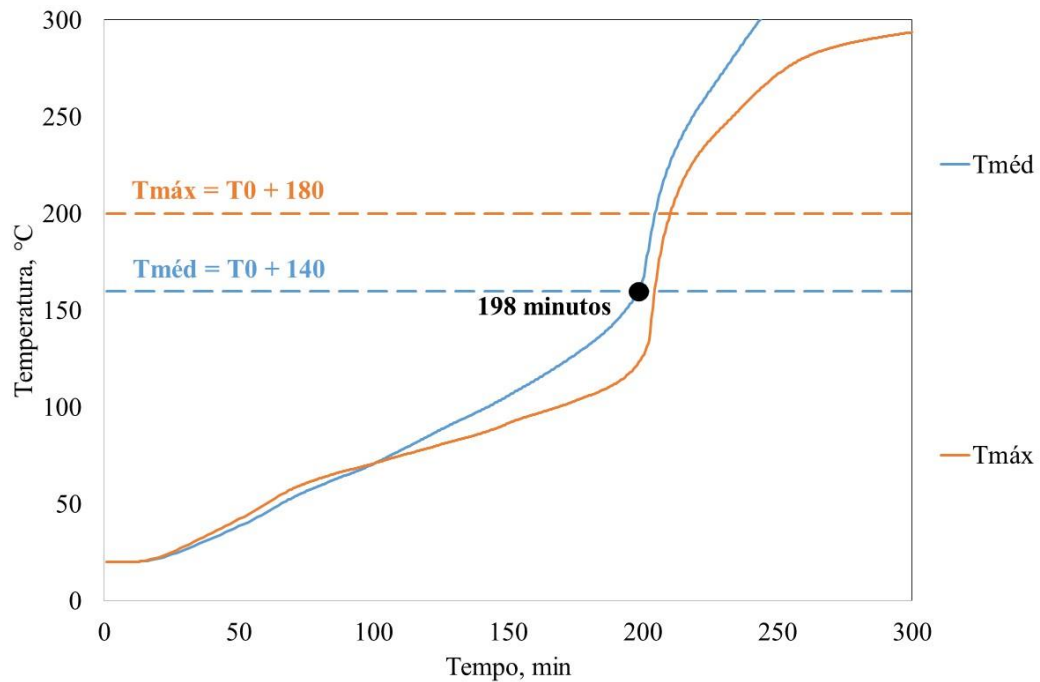


Figura 48 - Critério de isolamento térmico do modelo CAV_SR

Analisando a Figura 48, o primeiro ponto de interseção é o da temperatura média, permitindo verificar que o tempo de resistência ao fogo é de 198,2 minutos. O comportamento do campo de temperatura neste modelo, para o instante de tempo da resistência ao fogo, encontra-se representado na Figura 49.

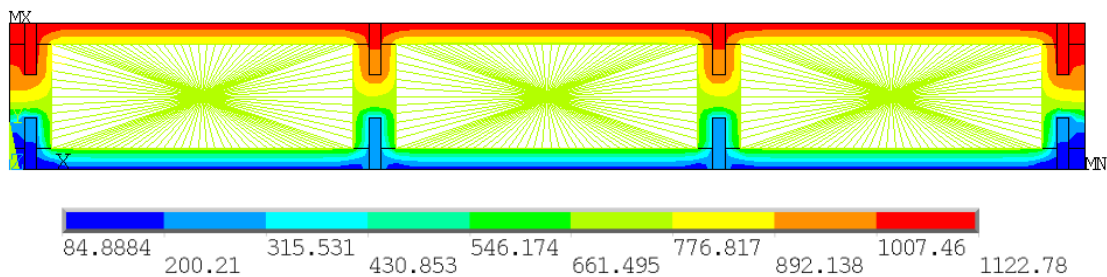


Figura 49 - Comportamento térmico do modelo CAV_SR ao fim dos 198,2 minutos

Observando a Figura 49, é possível perceber que a existência de parafusos nos modelos, faz com que a transferência de calor nessas zonas seja maior, e por consequência as temperaturas nos parafusos na camada não exposta ao fogo sejam também mais altas.

4.1.3. Modelo CAV_CR

A determinação do tempo de resistência ao fogo neste modelo não difere dos anteriores. Considerou-se também a simulação para um tempo total de 300 minutos (5 horas).

Durante a simulação obtiveram-se as temperaturas nos treze pontos nodais.

A evolução da temperatura média desses pontos nodais e a temperatura do nó com a máxima temperatura encontram-se representadas na Figura 50.

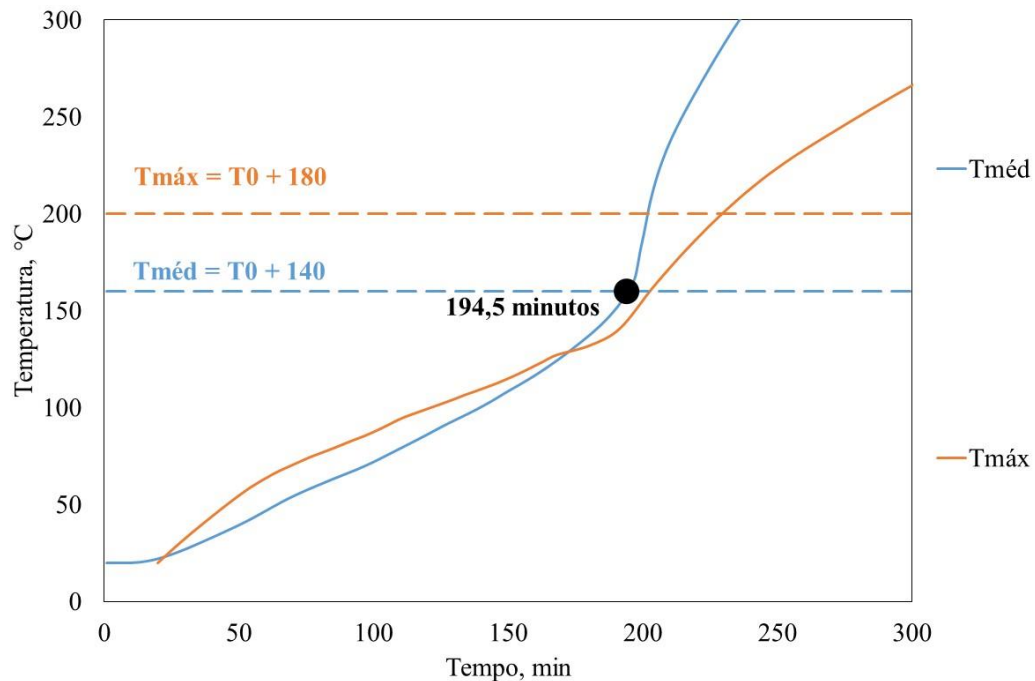


Figura 50 - Critério de isolamento térmico do modelo CAV_CR

Através da análise efetuada ao modelo CAV_CR, verifica-se que o primeiro ponto de interseção é a temperatura média, permitindo calcular a resistência ao fogo de 194,5 minutos. O perfil de temperaturas do modelo no tempo de resistência ao fogo está representado na Figura 51.

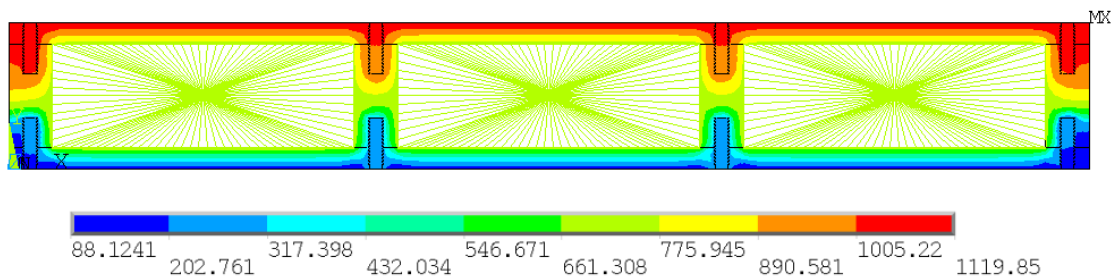


Figura 51 - Comportamento térmico do modelo CAV_CR ao fim de 194,5 minutos

Por observação do comportamento térmico do modelo CAV_CR ao fim de 194,5 minutos, é possível perceber que nas zonas onde estão os parafusos existe uma maior transferência de calor, fazendo com que as temperaturas dos parafusos na camada do lado não exposto ao fogo, também atinjam gradientes mais altos.

4.1.4. Modelo ISOL1

Para este modelo, recorreu-se ao mesmo método para se tentar verificar qual o tempo de resistência ao fogo. O tempo que se considerou na simulação foi de 250 minutos (aproximadamente 4 horas), para monitorização dos pontos treze nodais.

Os resultados encontram-se na Figura 52.

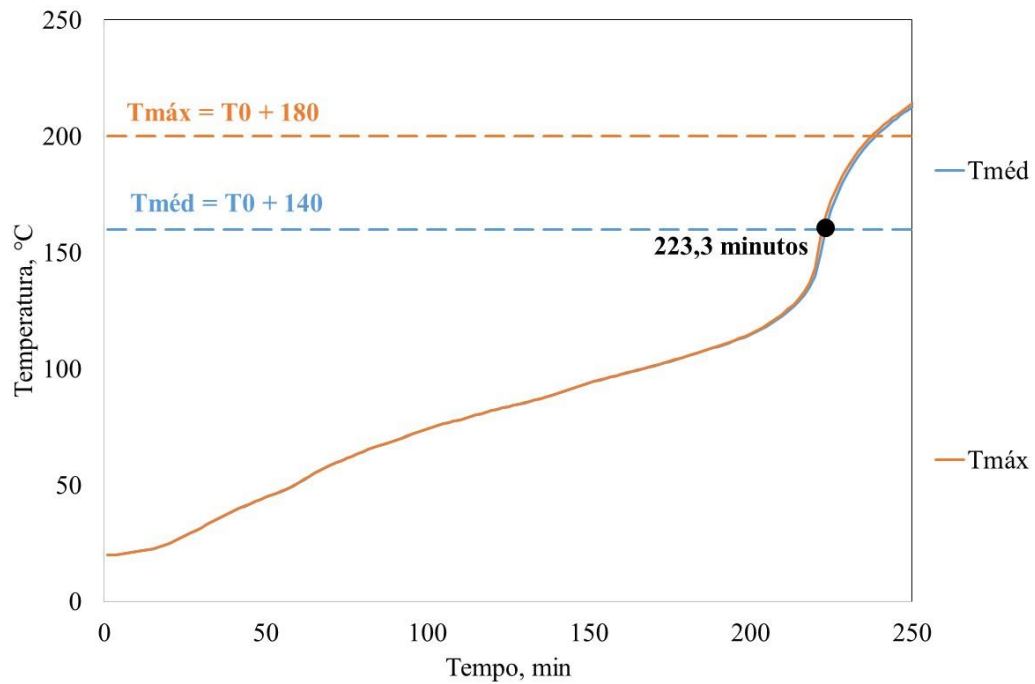


Figura 52 – Critério de resistência ao fogo do modelo ISOL1

Observando o gráfico, percebe-se que o primeiro ponto de interseção é com a curva da temperatura média, obtendo-se, o tempo de resistência ao fogo de 223 minutos. O campo de temperaturas, para o tempo de resistência ao fogo calculado, encontra-se na Figura 53.

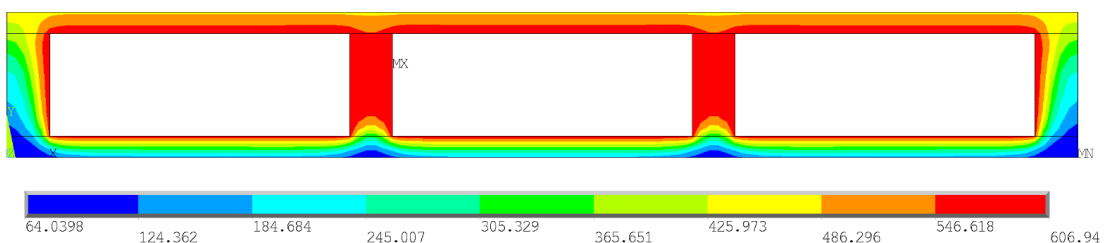


Figura 53 - Comportamento térmico do modelo ISOL1 ao fim de 223 minutos

Ao analisar-se o comportamento térmico do modelo ISOL1 ao fim de 223 minutos, percebe-se que as zonas que estão envoltas da camada preenchida por lã de vidro têm uma maior transferência de calor, facto este que pode dever-se à fusão deste material.

4.1.5. Modelo ISOL_SR1

Neste modelo o tempo de simulação foi de 250 minutos, para obtenção do campo de temperaturas nos treze pontos nodais. A evolução das curvas de temperatura para analisar o critério de resistência ao fogo verifica-se na Figura 54.

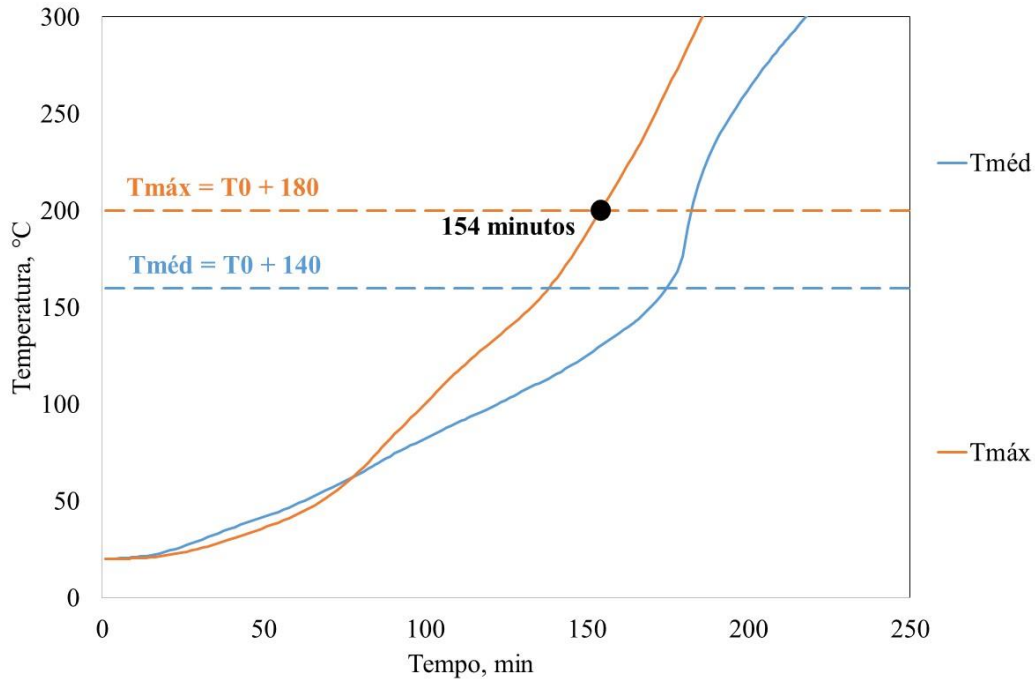


Figura 54 - Critério de Resistência ao fogo do modelo ISOL_SR1

Observa-se que o primeiro ponto de interseção é com a curva de temperatura máxima, que permite, concluir que o tempo de resistência ao fogo deste modelo é de 154 minutos. Com este valor, obteve-se o perfil de temperaturas, Figura 55.

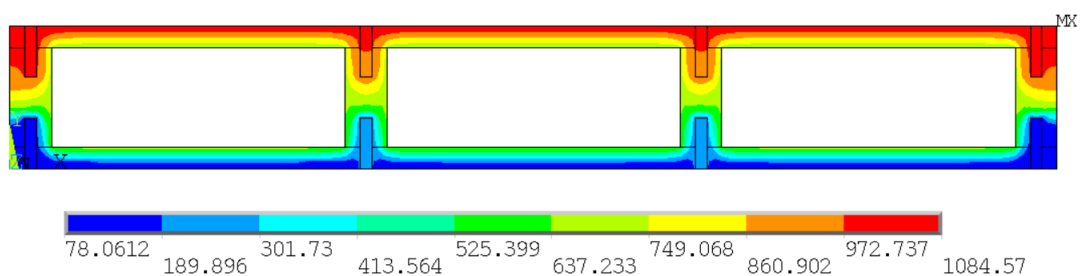


Figura 55 - Comportamento térmico do modelo ISOL_SR1 ao fim de 154 minutos

Pode verificar-se que os parafusos voltam a ter uma importância no comportamento térmico dos modelos, visto que na zona dos parafusos existe uma maior transferência de calor e por consequência, as temperaturas nos parafusos do lado não exposto também são mais altas.

4.1.6. Modelo ISOL_CR1

No modelo ISOL_CR1 a simulação decorreu ao longo de 250 minutos, durante os quais foram monitorizados treze pontos nodais. Através deste processo, foi possível obter a evolução das curvas de temperatura, para análise do critério de resistência ao fogo, Figura 56.

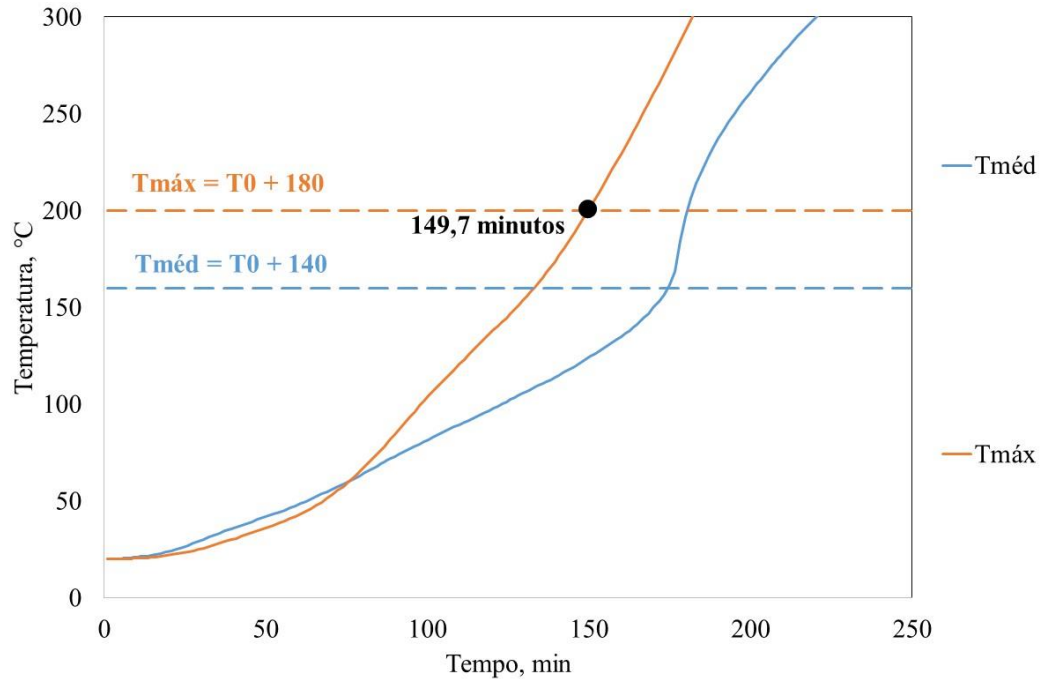


Figura 56 - Critério de resistência ao fogo do modelo ISOL_CR1

O primeiro ponto de interseção ocorre com a curva da temperatura máxima, pelo que, o tempo de resistência ao fogo é de 149,7 minutos. O comportamento térmico deste modelo, durante o período de resistência ao fogo, está representado na Figura 57.

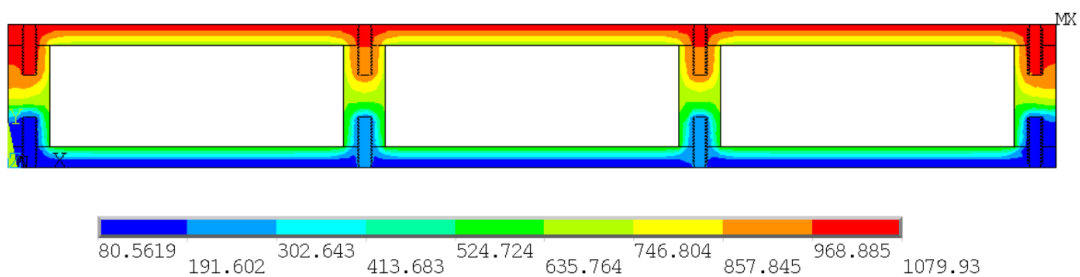


Figura 57 - Comportamento térmico do modelo ISOL_CR1 ao fim de 149,7 minutos

À semelhança do que acontece no comportamento do modelo ISOL_SR1, também no modelo ISOL_CR1, os parafusos têm grande relevância na transferência de calor, Figura 57. Mais uma vez, as temperaturas nos parafusos situados na camada do lado não exposto são mais altas.

4.1.7. Comparação da Resistência ao fogo dos modelos

A comparação dos modelos CAV_CR e CAV_SR com o modelo CAV revela uma redução significativa no tempo de resistência ao fogo, 74 minutos e 71 minutos, respectivamente. Esse resultado revela a importância crítica dos parafusos de aço na condução de calor para fora da parede divisória. A presença do parafuso roscado diminui levemente o tempo de resistência ao fogo, 3 a 4 minutos, em comparação com o parafuso não roscado, diferença esta relativamente pequena e pouco significativa.

Ao comparar os modelos sem isolamento com os modelos preenchidos com lã de vidro, observou-se uma redução média de 45 minutos na resistência ao fogo. Especificamente, a comparação entre o modelo CAV e o modelo ISOL1, revelou uma diminuição de 46 minutos na resistência ao fogo. Da mesma forma, entre os modelos CAV_CR e ISOL_CR1, houve uma redução de 45 minutos, e entre os modelos CAV_SR e ISOL_SR1, a redução foi de 44 minutos. Estes resultados indicam que, embora a lã de vidro seja eficaz na contenção inicial do fogo, a sua presença também pode acelerar a transmissão de calor para o lado não exposto, resultando numa redução global da resistência ao fogo. Este efeito é especialmente evidente quando comparado com as configurações sem isolamento.

5. Aplicação do Método Simplificado

A aplicação de metodologias analíticas de cálculo no projeto de soluções construtivas é essencial para um estudo prévio do desempenho dos materiais e sistemas utilizados, além de permitir uma avaliação antecipada do cumprimento dos critérios regulamentares. Para materiais como o gesso e a madeira, cujas propriedades térmicas são não lineares, a definição de equações analíticas que permitam uma análise geral dos elementos construtivos, considerando diferentes parâmetros geométricos, apresenta desafios significativos de previsibilidade e precisão.

Neste contexto, a metodologia desenvolvida por Frangi et al. [42] representa um avanço significativo, ao propor um método simplificado baseado em ensaios experimentais para determinar o tempo de resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira protegida. Este método simplificado proporciona uma ferramenta útil e mais acessível para a análise de desempenho ao fogo, reduzindo a complexidade dos cálculos e permitindo uma aplicação mais ampla e prática em projetos reais.

O presente capítulo visa aplicar este método simplificado aos modelos anteriormente desenvolvidos, o de cavidade de ar/vazia e de cavidade com isolante em lã de vidro. Para além disto, é realizada uma comparação detalhada dos resultados obtidos através da aplicação deste método aos modelos simulados.

5.1. Modelo com Cavidade vazia

A solução construtiva presente na Figura 58 vai ser analisada através do método simplificado.



Figura 58 – Modelo com a cavidade vazia

Para avaliar a resistência ao fogo da solução construtiva presente na Figura 58 utilizando o método simplificado, é necessário considerar diferentes camadas e fatores. A camada de proteção, representada pela letra *i*, é a primeira camada de gesso no lado exposto ao fogo. Quanto à camada de isolamento, identificada pela letra *n*, de acordo com as regras do método simplificado, apenas se considera a última camada de gesso no lado não exposto ao fogo. Adicionalmente, a formulação do método de cálculo inclui a consideração da cavidade de ar através da afetação dos coeficientes de posição e dos tempos de correção.

Seguindo a formulação proposta no método simplificado, procedeu-se à avaliação da resistência ao fogo do modelo com cavidade de ar. Tendo em conta o Capítulo 2.5.1, desenvolveu-se uma folha de cálculo (Apêndice A), para obtenção dos valores necessários no cálculo do tempo de resistência ao fogo para este modelo.

A avaliação da resistência ao fogo iniciou-se com a análise da camada de proteção (*i*=1). De acordo com o método simplificado, a cavidade de ar não é considerada nesta etapa. O valor básico de resistência ao fogo para esta camada, constituída pela placa de gesso, foi obtido utilizando a equação 46.

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{25}{15}\right)^{1,2} = 55,4 \text{ min} \quad (46)$$

Posteriormente, foram calculados os coeficientes de posição para ambos os lados (exposto e não exposto ao fogo) utilizando as equações 47 e 48, respetivamente:

$$k_{pos,exp,i=1} = 1 \quad (47)$$

$$k_{pos,unexp,i=1} = 0,5 \times 25^{0,15} = 0,81 \quad (48)$$

O valor da equação 47 é devido ao facto de não haver outra camada a anteceder a camada da placa de gesso. O valor da equação 48 é pelo facto desta camada anteceder a cavidade vazia.

O tempo de correção associado à camada de proteção $\Delta t_{i=1}$, é considerado nulo, por ser a primeira camada.

O coeficiente de ligação $k_{j,i=1}$, é unitário, em vez que esta camada não possui qualquer tipo de ligação, conforme descrito na Tabela 11.

Com base nos valores anteriores, calculou-se o tempo de resistência ao fogo nesta camada:

$$t_{prot,1} = 44,9 \text{ min} \quad (49)$$

De seguida, procedeu-se à análise da camada de isolamento (*n*=1). O valor básico de resistência ao fogo nesta camada constituída por placa de gesso foi determinado pela equação do Capítulo 2.5.1.

$$t_{ins,0,1} = 49,07 \text{ min} \quad (50)$$

O coeficiente de posição no lado exposto ao fogo $k_{pos,exp,n=1}$ é também unitário.

O tempo de correção $\Delta t_{n=1}$ calculado foi igual a 9,7 min.

O coeficiente de ligação $k_{j,n=1}$ é também unitário por não possuir qualquer ligação na camada.

O tempo de resistência ao fogo associado a esta camada foi de 70 min.

$$t_{ins,1} = 70 \text{ min} \quad (51)$$

Por fim, o tempo total de resistência ao fogo da solução construtiva foi determinado considerando os tempos das camadas de proteção e isolamento, equações 49 e 50, respetivamente. O tempo total obtido foi de 114,9 min.

$$t_{ins} = 44,9 + 70 = 114,9 \text{ min} \quad (52)$$

5.2. Modelo com Cavidade com Isolante de Lã de Vidro

O método simplificado vai ser agora aplicado ao modelo construtivo em estudo, presente na Figura 59.

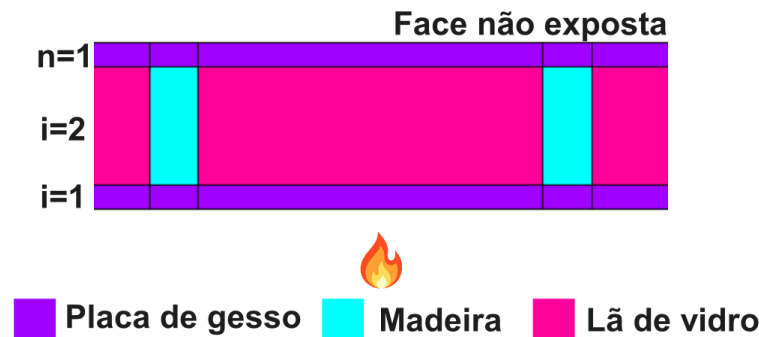


Figura 59 – Modelo com cavidade preenchida por lã de vidro

Assim sendo, procedeu-se à avaliação da resistência ao fogo do modelo com cavidade de ar. Com base no método descrito no Capítulo 2.5.1 e uma folha de cálculo desenvolvida (Apêndice A), obtiveram-se os valores necessários para o cálculo do tempo de resistência ao fogo.

A avaliação da resistência ao fogo, neste modelo, iniciou-se pela análise da camada de proteção (i=1). De acordo com o método simplificado e ao contrário do modelo anterior, a cavidade preenchida com lã de vidro (i=2) é considerada nesta etapa. Portanto, o valor básico de resistência ao fogo para esta camada $t_{prot,0,1}$ é 55,4 min.

O cálculo dos coeficientes de posição para os dois lados da camada, o lado exposto $k_{pos,exp,i=1}$ e o lado não exposto ao fogo $k_{pos,unexp,i=1}$, são iguais a 1 e 0,81, respetivamente:

No que diz respeito ao tempo de correção associado à camada de proteção $\Delta t_{i=1}$ foi considerado nulo, já que se trata da primeira camada.

Quanto ao coeficiente de ligação $k_{j,i=1}$, foi adotado o valor unitário, dado que esta camada não possui qualquer tipo de ligação conforme apresentado na Tabela 11.

Finalmente, o tempo de resistência ao fogo desta camada foi determinado e igual a 44,9 min.

$$t_{prot,1} = 44,9 \text{ min} \quad (53)$$

Procedeu-se depois à análise da camada de proteção (i=2). O valor básico de resistência ao fogo determinado foi de 19,8 min.

$$t_{prot,0,2} = 19,8 \text{ min} \quad (54)$$

Posteriormente, calcularam-se os coeficientes de posição para ambos os lados da camada. Os valores para o coeficiente de posição do lado exposto $k_{pos,exp,i=2}$ e para o coeficiente de posição para o lado não exposto ao fogo $k_{pos,unexp,i=2}$ foram obtidos e iguais a 0,16 e 1, respetivamente.

No que diz respeito ao tempo de correção associado à camada $i=2$ $\Delta t_{i=2}$, o valor obtido foi de 11,39 min.

Como referido, para todas as camadas, o coeficiente de ligação $k_{j,i=2}$ tem um valor unitário, visto que esta camada também não possui qualquer ligação das presentes na Tabela 11.

Por fim, o tempo de resistência ao fogo garantido por esta camada foi de 14,5 min.

$$t_{prot,2} = 14,5 \text{ min} \quad (55)$$

Com as camadas de proteção analisadas, ir-se-á proceder à análise da camada de isolamento ($n=1$). O valor básico de resistência ao fogo para esta camada foi determinado e igual a 49,07 min.

$$t_{ins,0,1} = 49,07 \text{ min} \quad (56)$$

O coeficiente de posição no lado não exposto ao fogo $k_{pos,exp,n=1}$ foi obtido e igual a 0,45.

Mais uma vez, o coeficiente de ligação $k_{j,n=1}$ para esta camada foi considerado unitário, uma vez que não há qualquer ligação presente.

Para o cálculo do tempo de correção $\Delta t_{n=1}$, atribui-se o valor nulo, dado que este modelo não apresenta qualquer cavidade vazia e o valor do tempo de correção só é para modelos ou soluções construtivas que possuam cavidades vazias.

Finalmente, o tempo total de resistência ao fogo da solução construtiva foi determinado, considerando os tempos calculados as camadas de proteção e de isolamento. O tempo total obtido foi de 22,3 min.

$$t_{ins,1} = 22,3 \text{ min} \quad (57)$$

Considerando os resultados obtidos, o tempo total de resistência ao fogo desta solução construtiva é de 81,7 min.

$$t_{ins} = 44,9 + 14,5 + 22,3 = 81,7 \text{ min} \quad (58)$$

5.3. Comparação de Resultados

Para a avaliação da resistência ao fogo com aplicação do método simplificado aos modelos construtivos em estudo, foi efetuada uma comparação de resultados com os obtidos numericamente.

A Tabela 14 resume os tempos de resistência ao fogo obtidos através das duas metodologias. A comparação desses resultados permite validar o método analítico em relação ao método numérico.

Tabela 14 – Resistência ao fogo obtidas pelas diferentes análises

Modelo	Numérico sem parafusos	Numérico com parafusos simplificado	Numérico com parafusos	Analítico
Cavidade de Ar	269,1 min	198,2 min	194,5 min	114,9 min
Cavidade com Lã de Vidro	223,3 min	154,1 min	149,7 min	81,7 min

Analisando os valores das resistências ao fogo, é possível concluir que tanto nos modelos de cavidade de ar como os modelos de cavidade com lã de vidro, a introdução dos parafusos tem o efeito na diminuição da resistência ao fogo. No caso da cavidade de ar os parafusos reduzem o tempo de resistência ao fogo em cerca de 75 minutos e no caso da cavidade com lã de vidro o tempo de resistência reduz cerca de 73 minutos, que correspondem, respectivamente, a uma redução de 28% e de 33%.

Ao comparar-se os valores de resistência ao fogo, entre os dois modelos numéricos para o caso mais crítico (Numérico com parafusos), é possível aferir que o modelo com cavidade de lã de vidro tem uma resistência ao fogo menor que o da cavidade com ar.

Comparando agora, o caso mais crítico do modelo numérico com o analítico, é possível concluir que o modelo analítico, está desenvolvido para o lado da segurança. Os valores do modelo analítico são inferiores ao numérico. Com estes resultados pode-se calcular o rácio entre os métodos, analítico e o numérico mais crítico cujo tempo de resistência ao fogo é menor. O rácio para os modelos de cavidade de ar é de 1,69 e para a cavidade com lã de vidro é de 1,83.

Pode assim confirmar-se que o rácio é sempre conservativo aquando da utilização do modelo analítico.

6. Conclusão

6.1. Conclusões finais

A madeira possui um potencial significativo para ser amplamente utilizada em soluções construtivas, por se tratar de um material abundante e renovável. O seu desempenho, quando protegida com materiais de revestimento como o gesso, melhora significativamente em situações de exposição ao fogo. No entanto, a natureza não linear das propriedades térmicas dos materiais dificulta o processo de regulamentação e a definição de normas e dos eurocódigos. Para colmatar estas dificuldades, o desenvolvimento de modelos numéricos e de métodos analíticos tem proporcionado um maior conhecimento e suporte na definição das regras, para a utilização destes materiais em elementos construtivos.

A análise computacional da resistência ao fogo nas soluções construtivas de madeira protegidos com gesso baseou-se no primeiro estudo desenvolvido por D. Pereira et.al [49], [50]. Os modelos numéricos, desenvolvidos agora na presente dissertação, envolveram análises térmicas não lineares em regime transiente, avaliando a resistência ao fogo segundo o critério de isolamento térmico, mas considerando o efeito do isolamento interno na cavidade e o efeito dos ligadores em aço entre os elementos. Os primeiros resultados numéricos permitiram concluir que o método desenvolvido nos modelos com isolamento térmico de lã de vidro, não era o mais adequado, pelo que foram desenvolvidos novos métodos de análise. Foram propostos diferentes estudos e determinada uma curva característica de temperatura a incorporar como condição fronteira em modelos com cavidades protegidas por lã de vidro. Para além dos diferentes modelos numéricos, foi ainda aplicado o método simplificado, baseado em ensaios experimentais, proposto por um grupo de investigadores liderado por A. Frangi [33]. Este método foi aplicado, através do desenvolvimento de uma folha de cálculo, permitindo obter diferentes estudos comparativos.

Com base na aplicação prévia do método simplificado, foram obtidos os resultados para a avaliação da resistência ao fogo nos diferentes modelos em estudo. Os resultados indicaram que a resistência ao fogo diminui de um modelo com cavidade de ar para um modelo com cavidade de lã de vidro. Também indicaram que os modelos com parafusos em comparação aos modelos sem parafusos têm uma redução significativa no tempo de resistência ao fogo, em cerca de 30%. No caso da comparação da resistência ao fogo entre os modelos numéricos e os obtidos de forma analítica, o tempo de resistência ao fogo de uma forma analítica têm um rácio conservador médio de 1,7.

6.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, devem realizar-se mais estudos (numéricos e experimentais) a fim de verificar a tendência no cálculo do fator conservativo entre as soluções. Como sugestão, os parâmetros introduzidos nas equações de cálculo simplificado deverão ter a inclusão dos ligadores entre as camadas de proteção e a madeira, bem como considerar os pontos de fusão dos materiais de isolamento térmico. As equações de cálculo poderão também ser ajustadas por outros valores de correção. Em relação ao modelo numérico, pretende-se criar um modelo tridimensional com a inclusão de elementos finitos de contato entre as superfícies dos componentes, e eventuais camadas de ar entre as interfaces.

Por fim, este estudo sublinha assim, a importância de continuar a desenvolver novos modelos numéricos, aferir novos métodos analíticos para melhorar a compreensão e a regulamentação da resistência ao fogo das soluções construtivas em madeira. A combinação destes métodos proporciona a continuação de uma base sólida na definição de normas mais precisas e eficazes, contribuindo para a segurança e durabilidade das construções no projeto.

Referências

- [1] J. Delbeke, A. Runge-Metzger, Y. Slingenberg, e J. Werksman, «The Paris Agreement», em *Towards a Climate-Neutral Europe*, London: Routledge, 2019, pp. 24–45. doi: 10.4324/9789276082569-2.
- [2] P. A. G. Piloto e E. M. M. Fonseca, «Load Bearing Capacity of Light Timber Frame Walls Under Fire», *Math. Comput. Sci.*, vol. 16, n. 1, p. 8, 2022, doi: 10.1007/s11786-022-00521-y.
- [3] L. Shi e M. Y. L. Chew, «A review of thermal properties of timber and char at elevated temperatures», *Indoor Built Environ.*, vol. 32, n. 1, pp. 9–24, 2023, doi: 10.1177/1420326X211035557.
- [4] M. J. M. Figueroa e P. D. de Moraes, «Comportamento da madeira a temperaturas elevadas», *Ambient. Construído*, vol. 9, n. 4, pp. 157–174, 2009, doi: 10.1590/s1678-86212009000400525.
- [5] N. L. K. R. Kerdiati, «Understanding wood finishing using the japanese wood burning technique (Shou Sugi Ban) in architecture», *J. Aesthetics, Des. Art Manag.*, vol. 1, n. 1, pp. 15–23, 2021, doi: 10.58982/jadam.v1i1.100.
- [6] CEN, «EN 1363-1: Fire resistance test - Part 1: General requirements», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, pp. 1–54, 2020.
- [7] J. Kolb, *Systems in Timber Engineering*. DE GRUYTER, 2008. doi: 10.1007/978-3-7643-8690-0.
- [8] V. Žegarac Leskovic e M. Premrov, *Energy-Efficient Timber-Glass Houses*, 1ª Edição. em *Green Energy and Technology*. London: Springer London, 2013. doi: 10.1007/978-1-4471-5511-9.
- [9] M. Premrov e V. Žegarac Leskovic, «Innovative Structural Systems for Timber Buildings: A Comprehensive Review of Contemporary Solutions», *Buildings*, vol. 13, n. 7, pp. 1–24, 2023, doi: 10.3390/buildings13071820.
- [10] A. Frangi, C. Erchinger, e M. Fontana, «Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities», *Fire Saf. J.*, vol. 43, n. 8, pp. 551–564, 2008, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.12.009.
- [11] CEN, «EN 1995-1-2, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, pp. 1–71, 2003.
- [12] CEN, «EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, pp. 1–59, 2002.
- [13] ISO, «ISO 834-8, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction», *Int. Organ. Stand.*, 1999.
- [14] R. J. Ross e F. P. L. USDA Forest Service., «Wood handbook : wood as an engineering material», 2010. doi: 10.2737/FPL-GTR-190.
- [15] A. Frangi, M. Knobloch, e M. Fontana, «Fire design of timber slabs made of hollow core elements», *Eng. Struct.*, vol. 31, n. 1, pp. 150–157, 2009, doi:

Referências

- 10.1016/j.engstruct.2008.08.002.
- [16] P. B. Cachim e J. Franssen, «Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5», *Fire Mater.*, vol. 33, n. 3, pp. 129–143, 2009, doi: 10.1002/fam.985.
- [17] J. Wang, J. Liu, J. Li, e J. Y. Zhu, «Characterization of Microstructure, Chemical, and Physical Properties of Delignified and Densified Poplar Wood», *Materials (Basel)*, vol. 14, n. 19, p. 5709, 2021, doi: 10.3390/ma14195709.
- [18] L. B. Otani, P. G. de A. Segundinho, E. A. M. Morales, e A. H. A. Pereira, «Elastic moduli characterization of wood and wood products using the Impulse Excitation Technique», vol. 1, p. 33, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3074.9608.
- [19] G. J. P. Ravenshorst, «Species independent strength grading of structural timber», Civil Engineering and Geosciences, 2019. doi: <https://doi.org/10.4233/uuid:b2243d5d-3275-4d93-9378-b39f97a39f02>.
- [20] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, e L. A. Bisby, «A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction», *Fire Technol.*, vol. 55, n. 1, pp. 1–49, 2019, doi: <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>.
- [21] American Institute of Timber Construction, *Timber Construction Manual*. Wiley, 2012. doi: 10.1002/9781118279687.
- [22] Binderholz, «GLULAM GLT binderholz nature in architecture», 2022. Disponível em: https://www.binderholz.com/fileadmin/user_upload/pdf/products/glulam.pdf
- [23] I. Rahmanian e Y. Wang, «Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach», *Acta Polytech.*, vol. 49, n. 1, 2009, doi: 10.14311/1081.
- [24] H. Takeda e J. R. Mehaffey, «WALL2D: A model for predicting heat transfer through wood-stud walls exposed to fire», *Fire Mater.*, vol. 22, n. 4, pp. 133–140, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-1018(1998070)22:4<133::AID-FAM642>3.0.CO;2-L.
- [25] S. Kukuck, «Heat and mass transfer through gypsum partitions subjected to fire exposures», Gaithersburg, MD, 2009. doi: 10.6028/NIST.IR.7461.
- [26] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, e E. Hugi, «Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire», *Fire Technol.*, vol. 46, n. 1, pp. 149–167, 2010, doi: 10.1007/s10694-009-0097-5.
- [27] CEN, «EN 1995-1-1, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, n. 2005, 2011.
- [28] CEN, «EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, p. 78, 2005.
- [29] J. P. Soares, «Aços Características e tratamentos», 6ª Edição., Publindústria, Ed., 2010, p. 371.
- [30] K. Mróz, I. Hager, e K. Korniejenko, «Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing», *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 284–291, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.388.
- [31] A. M. Papadopoulos, «State of the art in thermal insulation materials and aims for

- future developments», *Energy Build.*, vol. 37, n. 1, pp. 77–86, 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
- [32] P. Keerthan e M. Mahendran, «Thermal Performance of Composite Panels Under Fire Conditions Using Numerical Studies: Plasterboards, Rockwool, Glass Fibre and Cellulose Insulations», *Fire Technol.*, vol. 49, n. 2, pp. 329–356, 2013, doi: 10.1007/s10694-012-0269-6.
- [33] A. Frangi, V. Schleifer, e M. Fontana, «Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies», *Eng. Struct.*, vol. 32, n. 4, pp. 1184–1195, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.12.044.
- [34] E. M. Abblaoui, M. Malendowski, W. Szymkuc, e Z. Pozorski, «Determination of Thermal Properties of Mineral Wool Required for the Safety Analysis of Sandwich Panels Subjected to Fire Loads», *Materials (Basel)*, vol. 16, n. 17, p. 5852, 2023, doi: 10.3390/ma16175852.
- [35] I. San Diego Seal, «High Temperature , Heat & Flame Resistant Thermal Very High Temperature , Heat & Flame Resistant Thermal». Acedido: 1 de Setembro de 2024. Disponível em: <http://sandiegoseal.com/pdf/fibercloth.pdf>
- [36] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, e D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8ª Edição. 2018.
- [37] A. Frangi e M. Fontana, «Charring rates and temperature profiles of wood sections», *Fire Mater.*, vol. 27, n. 2, pp. 91–102, 2003, doi: 10.1002/fam.819.
- [38] T.-H. Yang, S.-Y. Wang, M.-J. Tsai, e C.-Y. Lin, «The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test», *Build. Environ.*, vol. 44, n. 2, pp. 231–236, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.02.010.
- [39] A. Frangi, M. Fontana, E. Hugli, e R. Jübstl, «Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire», *Fire Saf. J.*, vol. 44, n. 8, pp. 1078–1087, 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007.
- [40] CEN, «EN 520:2004+A1: Gypsum plasterboards. Definitions, requirements and test methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, 2009.
- [41] CEN, «EN 15283-2:2008+A1:Gypsum boards with fibrous reinforcement - Definitions, requirements and test methods - Part 2: Gypsum fibre boards», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, 2009.
- [42] P. A. G. Piloto e E. M. M. Fonseca, «Timber framed walls lined with gypsum plates under fire», *Proc. IRF2020 7th Int. Conf. Integrity-Reliability-Failure, INEGI-FEUP*, pp. 547–556, 2020.
- [43] D. A. M. Pereira e E. M. M. Fonseca, «Modelo de elementos finitos para avaliar o efeito do aquecimento nas cavidades em elementos construtivos protegidos ao fogo», *Rev. FLAMMAE*, 2023, doi: <https://doi.org/10.56081/2359-4837/flammae.v9n27.a2>.
- [44] D. A. M. Pereira, «Análise computacional para a avaliação da resistência ao fogo em elementos construtivos de suporte em aglomerado de madeira com proteção», Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.
- [45] E. Fonseca, «Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens Sob a

Referências

- Acção de Fortes Gradientes Térmicos», Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2003.
- [46] CEN, «EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints», *CEN-European Comm. Stand. Brussels*, vol. 1, n. 2005, 2011.
- [47] ISO, «ISO 4014, Hexagon head bolts — Product grades A and B», *Int. Organ. Stand.*, 1988.
- [48] S. Morais, *Desenho Técnico Básico 3*, 26ª Edição. 2016.
- [49] D. Pereira, E. M. M. Fonseca, e M. Osório, «Computational Analysis for the Evaluation of Fire Resistance in Constructive Wooden Elements with Protection», *Appl. Sci.*, vol. 14, n. 4, 2024, doi: 10.3390/app14041477.
- [50] D. Pereira, E. M. M. Fonseca, e M. Osório, «Temperature Evolution inside Hollow Core Wood Elements and Fire Resistance», *Fire*, vol. 7, n. 2, 2024, doi: 10.3390/fire7020057.
- [51] Inc. ANSYS, «ANSYS Mechanical APDL Element Reference». Acedido: 25 de Maio de 2024. Disponível em:
https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_ElemTOC.html

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P. PORTO.

NOME: Miguel Ângelo Teixeira Osório

ISEP, Porto, 13 de setembro de 2024

Apêndice A

Tipo de Estrutura	Tipo de Canela	Localização da Canela	Tipo de Usado	Materia	Capitular
Tipi Chilo	Proteção	Antes da Cavidade	A	GRASSO TIPO X	SH
Tipi Trande	Isolamento	Depois da Cavidade	B	GRASSO TIPO X	MDO
			C	MADREIRA MACIA	
			D	ALUMINADO DE MADREIRA	
				OSB	
				LIDE FIBRADA	
				EMBRALADO	
				SEMATERIAL	

Tipo de Estrutura	Tipo de Canela	Localização da Canela	Tipo de Usado	Materia	Capitular
Tipi Chilo	Proteção	Antes da Cavidade	A	GRASSO TIPO X	SH
Tipi Trande	Isolamento	Depois da Cavidade	B	GRASSO TIPO X	MDO
			C	MADREIRA MACIA	
			D	ALUMINADO DE MADREIRA	
				OSB	
				LIDE FIBRADA	
				EMBRALADO	
				SEMATERIAL	

Tipo de Estrutura	Tipo de Canela	Localização da Canela	Tipo de Usado	Materia	Capitular
Tipi Chilo	Proteção	Antes da Cavidade	A	GRASSO TIPO X	SH
Tipi Trande	Isolamento	Depois da Cavidade	B	GRASSO TIPO X	MDO
			C	MADREIRA MACIA	
			D	ALUMINADO DE MADREIRA	
				OSB	
				LIDE FIBRADA	
				EMBRALADO	
				SEMATERIAL	

Tipo de Estrutura	Tipo de Canela	Localização da Canela	Tipo de Usado	Materia	Capitular
Tipi Chilo	Proteção	Antes da Cavidade	A	GRASSO TIPO X	SH
Tipi Trande	Isolamento	Depois da Cavidade	B	GRASSO TIPO X	MDO
			C	MADREIRA MACIA	
			D	ALUMINADO DE MADREIRA	
				OSB	
				LIDE FIBRADA	
				EMBRALADO	
				SEMATERIAL	