



Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção

Gabriel Nagafugi de Souza Costa

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professora Elza Maria Morais Fonseca
Professor Laercio Javarez Junior

junho de 2017

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi fruto de muito esforço e dedicação, distribuídos em horas de trabalho e pesquisa científica. Inúmeras são as pessoas que influenciaram direta ou indiretamente na sua construção. A todas essas pessoas venho deixar meus sinceros agradecimentos. Para minha família, pelo apoio que me foi fornecido durante toda a graduação. Pelos conselhos e palavras de coragem que me deram forças para enfrentar qualquer desafio durante esta jornada. Pela fé que depositaram em mim e pelo seu amor incondicional. Para as instituições de ensino superior envolvidas, nomeadamente Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Instituto Politécnico de Bragança, que me proporcionaram esta magnífica experiência de vivência internacional. Para a Associação dos Estudantes Brasileiros no IPB, as equipes de volei feminino do Brasil e da África, aos amigos músicos que tive o prazer de encontrar e aos estudantes internacionais. Obrigado por me partilharem sua cultura, seus costumes e suas experiências. Agradeço a Juliana Przybyszewski pelo apoio, pela amizade e pelos momentos de felicidade que me proporcionou durante esta jornada. Ao Adriano Henrique, agradeço por seus conselhos e experiências, e também por me ajudar na preparação deste trabalho. Para Vitor Gomes e Hermínia Morais, sou grato por me fornecerem acesso ao LSIG sempre que precisei. Para o professor Dr. Laercio J. Junior que foi mediador do programa de dupla diplomação entre as instituições e orientador deste trabalho. Em especial, agradeço à professora Dra. Elza M. Fonseca, pela qual tenho muito carinho e admiração. Agradeço por seus conselhos e orientações, pelas correções e pela paciência que teve comigo desde o início de nossa jornada.

Resumo

A madeira tem sido amplamente utilizada como material de construção devido à sua disponibilidade na natureza, variedade de espécies, leveza e características físicas, químicas e mecânicas. Este material é utilizado em muitas aplicações da construção civil, nomeadamente em pavimentos, paredes e soalhos. Em condições de trabalho adversas, como exposição ao fogo, suas propriedades sofrem degradação, comprometendo o seu desempenho e a segurança no local. Este trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento de lajes celulares de madeira quando expostas em uma situação de incêndio, de acordo com a utilização da curva ISO 834, através de simulações numéricas para análise térmica não-linear em regime transiente, utilizando o método dos elementos finitos. Foram consideradas as propriedades da madeira Abeto, com massa volúmica de 341 [kg/m³] e um teor de humidade a 11%. As propriedades térmicas foram utilizadas de acordo com as recomendações do Eurocódigo 5. A validação do modelo térmico utilizado foi realizada através da comparação entre velocidade de carbonização calculada para todos os modelos propostos e os valores prescritos no Eurocódigo. Verificou-se o aumento da resistência ao fogo com a utilização de materiais isolantes de diferentes espessuras e densidades, onde a fibra de vidro de 145 [mm] de espessura apresentou melhor desempenho para cavidades em condições adiabáticas. Posteriormente, uma malha de elementos finitos com as propriedades do ar foi inserida nas simulações, influenciando significativamente no comportamento térmico dos materiais, sendo que para esta situação a lã de rocha de 60 [mm] obteve melhor desempenho. A realização deste estudo foi importante, pois permitiu verificar a influência da espessura e densidade dos materiais isolantes e a presença do ar nas simulações. Em geral, a análise térmica baseada em simulação numérica contribuiu para o aumento nos níveis de segurança e de resistência ao fogo em lajes celulares de madeira com e sem isolamento.

Abstract

Wood has been widely used as a building material because of its availability in nature, variety of species, lightness and physical, chemical and mechanical characteristics. This material is used in many civil construction, floor and wall applications. With adverse working conditions such as fire exposure, their properties suffer degradation, compromising their performance and safety in place. The main objective of this work is to analyze the behavior of wood slabs exposed to the fire situation, according to the use of the ISO 843 curve, performing numerical simulations for transient and nonlinear thermal analysis with the finite element method. The properties of Spruce with a density of 341 [kg/m³] and a moisture content of 11% were considered. The thermal properties were used in accordance with Eurocode 5. The validation of the thermal model was performed by comparing the obtained charring rate with the values prescribed in the literature. The increase in fire resistance was verified with the use of insulating materials with different thicknesses and densities, where 145 [mm] thick glass fiber showed better performance under adiabatic conditions. Afterwards, the air effect was considered in the simulations, influencing the thermal behavior of the slab, where the rock wool of 60 [mm] obtained the better performance. This study was important because it allowed to verify the effect of the insulation thickness, the density and the air modelling effect in the numerical simulations. In general, thermal analysis based on numerical simulation contributes to the increase in levels of safety and fire resistance in wooden cellular slabs with and without insulation.

Índice

1. Introdução.....	2
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Apresentação sumária dos capítulos.....	4
2. Estado da arte.....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Trabalhos desenvolvidos.....	7
3. Análise térmica.....	12
3.1. Processos de transferência de calor.....	12
3.1.1. Transferência de calor por condução.....	12
3.1.2. Transferência de calor por convecção.....	14
3.1.3. Transferência de calor por radiação.....	16
3.1.4. Transferência de calor por convecção e radiação combinada.....	18
3.2. Curvas de incêndio.....	19
3.2.1. Curva de incêndio natural.....	20
3.2.2. Curva de incêndio padrão ISO 834.....	21
3.2.3. Curva de incêndio para elementos exteriores.....	21
3.2.4. Curva de incêndio de Hidrocarbonetos.....	21
3.2.5. Curva de incêndio ASTM.....	22
4. Comportamento térmico da madeira.....	24
4.2. Pirólise.....	25
4.2. Ignição.....	26
4.3. Carbonização da madeira.....	27
4.4. Camada de carbonização efetiva.....	28
4.5. Propriedades térmicas da madeira.....	29

4.5.1. Condutividade térmica	29
4.5.2. Calor específico.....	30
4.5.3. Massa específica.....	32
4.6. Materiais isolantes	33
4.6.1. Fibras de vidro.....	33
4.6.2. Lã de rocha	34
4.6.3. Propriedades térmicas de materiais isolantes	34
4.7. Propriedades térmicas do Ar	35
5. Método dos elementos finitos.....	38
5.1. Introdução	38
5.2. Equação diferencial da condução e condições de fronteira	38
5.3. Método dos resíduos pesados	41
5.4. Método dos elementos finitos aplicado à equação do calor.....	42
5.5. Discretização no espaço	42
5.6. Discretização no tempo.....	44
5.7. Processo iterativo para problemas não lineares	45
5.8. Elementos finitos	46
6. Simulação numérica em lajes de madeira	49
6.1. Introdução	49
6.2. Dimensões das lajes de madeira	49
6.3. Estudo bidimensional da laje celular de madeira.....	50
6.3.1. Apresentação dos modelos e geometrias.....	50
6.3.2. Malhas de elementos finitos e condições de fronteira.....	52
6.4. Resultados do estudo bidimensional.....	53
6.4.1. Velocidade de carbonização.....	54
6.4.2. Distribuição de temperaturas e camada carbonizada	56
6.4.3. Desenvolvimento de temperaturas em pontos nodais	62
6.5. Estudo da carbonização secundária em lajes de madeira.....	66
6.5.1. Modelos para carbonização secundária	67
6.5.2. Curvas de fogo no interior das cavidades.....	69
6.5.3. Resultados para o pós-isolamento	70
6.5.3.1 Velocidade de carbonização nas vigas	71

6.5.3.2 Distribuição de temperaturas no pós-isolamento	74
6.5.3.3 Temperaturas em pontos nodais no pós-isolamento	77
7. Considerações finais	81
7.1. Conclusões gerais	81
7.2. Trabalhos futuros	82
Referências bibliográficas	84

Lista de símbolos

- a Difusividade (mm^2/s)
- A Área (m^2)
- A_1 Área da superfície 1 (m^2)
- A_2 Área da superfície 2 (m^2)
- β_0 Velocidade de carbonização para um lado de exposição ao fogo (mm/min)
- β_n Velocidade de carbonização considerando os efeitos de arredondamento (mm/min)
- C_p Calor específico (kJ/kgK)
- d_0 Espessura da camada de pirólise (mm)
- $d_{char,0}$ Camada carbonizada para um lado de exposição ao fogo (mm)
- $d_{char,n}$ Camada carbonizada para efeitos de arredondamento (mm)
- d_{eff} Camada carbonizada efetiva (mm)
- E Poder emissivo (W/m^2)
- G_{abs} Taxa de radiação absorvida pelo corpo
- G Irradiação
- h_c Coeficiente de convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
- h_r Coeficiente de radiação ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
- h_{cr} Coeficiente total de convecção e radiação ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
- Q Quantidade de calor (W)
- q'' Fluxo de calor (W/m^2)

q''_n Fluxo de calor na direção n (W/m²)

q''_{cr} Fluxo de calor efetivo (W/m²)

q''_c Fluxo de calor líquido por convecção (W/m²)

q''_r Fluxo de calor líquido por radiação (W/m²)

t Tempo (s)

T_0 Temperatura inicial (K)

T_f Temperatura de fusão (K)

T_s Temperatura da superfície (K)

T_{s1} Temperatura da superfície 1 (K)

T_{s2} Temperatura da superfície 2 (K)

T_∞ Temperatura do fluido (K)

T_{viz} Temperatura da vizinhança (K)

Símbolos gregos

α Absortividade (-)

ε Emissividade (-)

σ Constante de Stefan Boltzmann

k_0 Fator de superfícies protegidas por revestimento

ρ Densidade (kg/m³)

λ Condutividade Térmica (W/mK)

∇ Operador vetorial gradiente

ω Humidade

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores para velocidades de carbonização	28
Tabela 2: Fator k_0	29
Tabela 3: Condutividade térmica da madeira.....	30
Tabela 4: Calor específico da madeira	31
Tabela 5: Coeficientes da massa específica da madeira.	32
Tabela 6: Massa específica da madeira de Abeto.....	33
Tabela 7: Propriedades térmicas dos materiais isolantes	35
Tabela 8: Propriedades térmicas do ar [32].....	36
Tabela 9: Modelos considerados.	52
Tabela 10: Malhas de elementos finitos utilizadas.....	53
Tabela 11: Velocidade de carbonização para S/ISO_S/AR.	54
Tabela 12: Velocidade de carbonização para todos os modelos.	55
Tabela 13: Espessura carbonizada e taxa de carbonização.	55
Tabela 14: Comparação da velocidade de carbonização.....	56
Tabela 15: Camada carbonizada em $t = 1860$ [s].	58
Tabela 16 - Perfil de temperaturas em $t = 1860$ [s]	59
Tabela 17: Camada carbonizada em $t = 3720$ [s].	60
Tabela 18 - Distribuição de temperaturas em $t = 3720$ [s]	61
Tabela 19: Evolução da temperatura no decorrer do tempo - modelos sem ar.	63
Tabela 20: Picos de temperatura - modelos sem ar.	63
Tabela 21: Comparação dos modelos com efeitos do ar.	65
Tabela 22: Picos de Temperatura - efeitos do ar.	65
Tabela 23: Evolução da temperatura para todos os modelos.	66
Tabela 24: Modelos propostos para carbonização secundária.	68
Tabela 25: Velocidade de carbonização CARB-SEC_S/ISO - Carbonização secundária	72
Tabela 26: Velocidade de carbonização média das células - Carbonização secundária.	73
Tabela 27: Velocidades de carbonização - Fase primária e secundária.	74
Tabela 28: Camada residual e perfil de temperaturas para 1860 [s] da pós-degradação.....	74
Tabela 29 - Distribuição de temperaturas pós isolamento em $t = 1860$ [s]	75
Tabela 30: Camada residual para 3720 [s] – pós degradação.	76
Tabela 31 - Distribuição de temperaturas na pós degradação em $t = 3720$ [s]	76
Tabela 32: Evolução das temperaturas em pontos nodais - pós degradação.	78
Tabela 33: Picos de temperatura - pós degradação.	79

Lista de figuras

Figura 1: Formação da camada limite fluido-dinâmica. [28]	14
Figura 2: Formação da camada limite termodinâmica. [28].....	15
Figura 3: Troca de calor por radiação entre duas superfícies. [30]	18
Figura 4: Fases de um incêndio natural. [31]	20
Figura 5: Comportamento das curvas de incêndio.	22
Figura 6: Camadas de degradação térmica [30].	25
Figura 7: Efeitos de arredondamento da exposição em três lados. [30].....	28
Figura 8: Definição de camada residual e camada efetiva. [29].....	29
Figura 9: Condutividade térmica da madeira em função da temperatura. [29]	30
Figura 10: Calor específico da madeira em função da temperatura. [29].....	31
Figura 11: Massa específica da madeira de Abeto em função da temperatura. [29].....	33
Figura 12: Condições de fronteira para a equação diferencial do calor. [42].....	40
Figura 13. Nós e geometria, Plane 77. [12].....	46
Figura 14: Lajes de madeira. [45]	49
Figura 15 – Modelo S/ISO_S/AR	51
Figura 16 – Modelos FV_14_60_s/ar, FV_20_60_s/ar e LR_30_60_s/ar	51
Figura 17 – Modelo FV_14_145_s/ar	51
Figura 18 – Modelos FV_14_60_c/ar, FV_20_60_c/ar e LR_30_60_c/ar.....	51
Figura 19 – Modelo FV_14_145_c/ar.....	51
Figura 20 – Modelo S/ISO_C/AR.....	52
Figura 21: Malha de elementos finitos sem isolante com exposição ao fogo.	67
Figura 22: Malha de elementos finitos com isolante e exposição ao fogo.	67
Figura 23 - Modelo CARB-SEC_S/ISO.	68
Figura 24 - Modelo CARB-SEC_C/ISO.	68
Figura 25: Curva característica para o fogo sem material isolante.	69
Figura 26: Curva característica para o fogo com material isolante.	70
Figura 27: Região para velocidade de carbonização CARB-SEC_S/ISO.....	71
Figura 28: Região para os modelos sem isolante	72
Figura 29: Região para os modelos com isolante.....	72
Figura 30:Ponto nodal selecionado para a análise da carbonização secundária.....	77

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A madeira sempre foi um material utilizado como matéria-prima nos mais diversos tipos de construção, sendo que sua disponibilidade na natureza e facilidade de confecção acabaram por viabilizar a aplicação desse material. Atualmente, a madeira é um material de construção muito requisitado, pois suas necessidades energéticas para a produção de um produto final são muito menores se comparadas a outros materiais de construção, tais como aço, betão ou plástico [1].

A utilização deste material cresceu exponencialmente durante a revolução industrial. Devido a este fato, a madeira passou a ser alvo de pesquisas científicas que deram início em meados de 1950. Através destes estudos, foi observado que a madeira possui muitas vantagens em relação aos outros materiais de construção, o que ficou comprovado devido às propriedades físicas e mecânicas que apresenta [2].

A madeira é considerada material leve, mas apresenta altos níveis de resistência mecânica, podendo ser empregada na sustentação de estruturas, revestimentos de paredes e pisos, e confecção de produtos. Além disso, possui bons níveis de durabilidade quando associada ao exercício de boas práticas construtivas, sendo resistente à água salgada, oxidação e agentes corrosivos [3].

Quando entra em combustão, menores são os valores de gás carbônico emitidos para a atmosfera, se comparada a outros materiais. Estudos mostraram que a madeira evita a liberação de 5,2 toneladas de gás carbônico em comparação aos materiais metálicos. Já em comparação aos minerais, a liberação pode ser evitada em 1,2 toneladas [4].

No entanto, a queima da madeira em construções estruturais é caracterizada como condição de trabalho adversa e provoca variações em suas propriedades. Com base neste fato, muitos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos experimentais e numéricos sobre o estudo de modelos de cálculo da degradação física da madeira na presença de temperaturas elevadas [5], [6], [7], [8].

Em uma situação de incêndio, à medida que a madeira queima e perde massa, a sua combustão produz gases inflamáveis que são expelidos para o ambiente. Simultaneamente, uma camada de carvão é formada, e protege o interior da secção transversal contra o calor fornecido. A taxa (ou velocidade) de carbonização da madeira é o principal parâmetro para descrever o comportamento de estruturas de madeira durante a exposição ao fogo e depende do tipo (espécie) da madeira. Cada espécie possui variações em relação às propriedades térmicas, à resistência ao fogo, ao teor de água, à composição química. Além disso, os fatores externos, tais como as temperaturas de exposição ao fogo, a duração da exposição e a ventilação no ambiente também influenciam no comportamento da madeira a elevadas temperaturas [9], [10], [11].

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento de lajes celulares de madeira expostas ao fogo com e sem proteção no seu interior, utilizando métodos de cálculo avançado e analíticos. É utilizada uma ferramenta computacional, baseada em elementos finitos, através do programa *Ansys*. Serão determinados os perfis de temperatura em regime transiente na seção transversal da laje em estudo, assim como a determinação e validação da velocidade de carbonização e os efeitos da atuação de materiais como isolantes durante a queima da estrutura da laje de madeira.

A utilização de materiais isolantes tem como objetivo reduzir a taxa de transferência de calor no interior das cavidades. Geralmente esse tipo de material possui baixa condutividade térmica, alterando significativamente o coeficiente global de transferência de calor. Sua utilização depende de vários fatores, tais como: a condutividade térmica, a humidade, a resistência, a facilidade de instalação, a durabilidade, o custo, a toxicidade e inflamabilidade. Para o estudo em questão, optou-se em analisar o comportamento de fibras de vidro e lã de rocha como materiais isolantes [12].

Através do estudo do comportamento da madeira sob a ação do fogo e de possíveis materiais de revestimento, pode prever-se de que forma cada espécie de madeira será influenciada pela sua combustão, e conseqüentemente, definir a resistência ao fogo que o material possui, com e sem isolante térmico. Tais resultados são importantes pois contribuem para incrementar o nível de segurança de resistência ao fogo em lajes com e sem proteção.

1.1. Objetivos

Os principais objetivos desse trabalho são:

- Avaliar o comportamento térmico de lajes em madeira submetidas ao fogo, utilizando um modelo de elementos finitos através do programa *Ansys*.
- Obter resultados para incrementar o nível de segurança de resistência ao fogo em lajes de madeira com e sem proteção no seu interior.
- Avaliar diferentes materiais de proteção, função da sua difusividade térmica.

1.2. Apresentação sumária dos capítulos

O capítulo 1 apresenta uma introdução sobre o estudo térmico de lajes celulares de madeira quando submetidas ao incêndio. A utilização da madeira como material de construção é discutida, tanto na antiguidade quanto nos dias atuais, relacionando suas vantagens em comparação a outros tipos de materiais. Seu uso é justificado devido às propriedades físicas, químicas e mecânicas que este material apresenta. Ainda menciona alguns estudos referentes à análise numérica para o comportamento térmico, e justifica a importância de tais estudos na atualidade. São definidos os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma listagem cronológica dos principais estudos referentes à análise térmica e modelos numéricos. Estudos de relevância são citados e analisados, comparando seus resultados e conclusões.

O capítulo 3 sintetiza os conceitos teóricos necessários para compreensão da análise térmica, relacionados aos diferentes modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) e curvas de incêndio naturais e padronizadas.

Na primeira parte do capítulo 4 o comportamento térmico da madeira é analisado de forma a descrever as etapas de queima da madeira tais como a pirólise, ignição e carbonização. Ainda são discutidas as propriedades térmicas da madeira, obtidas através do Eurocódigo 5 (EC5). Em seguida, é realizada uma breve abordagem sobre materiais isolantes, apresentando a fibra de vidro e lã de rocha. As respectivas propriedades térmicas destes materiais são apresentadas de acordo com o auxílio de seus fornecedores. Por fim, considerações do ar e suas propriedades são introduzidas para a utilização nas simulações numéricas.

O capítulo 5 descreve, detalhadamente, o método dos elementos finitos utilizando o *Ansys* para a análise térmica. A relação entre o método dos elementos finitos e os resíduos pesados é apresentada através de equações diferenciais da condução do calor discretizada no tempo e no espaço. Os processos iterativos para problemas não lineares são caracterizados, e os elementos finitos utilizados são apresentados.

O capítulo 6 sintetiza todas as considerações relacionadas com a simulação numérica. Inicialmente apresenta todos os modelos considerados, suas geometrias e dimensões, relacionando a malha de elementos finitos e as condições de fronteira adotadas. Após a realização das simulações, são apresentados os resultados em três diferentes formas: a velocidade de carbonização, utilizada para a validação dos modelos, a distribuição de temperatura nos elementos em estudo e a evolução da temperatura no tempo em pontos nodais específicos das malhas de elementos finitos. Uma breve discussão dos resultados é efetuada. Em seguida, um estudo adicional com considerações da carbonização secundária, ou seja, a carbonização que ocorre após a introdução dos efeitos do fogo no interior das cavidades é realizado. Inicialmente, são apresentadas as definições de carbonização secundária, onde novos modelos e curvas para o comportamento do fogo nesta etapa do projeto são propostos. Novamente os resultados são apresentados com relação a velocidade de carbonização, a distribuição de temperatura nas lajes de madeira, e a evolução da temperatura em pontos nodais.

Por fim, o capítulo 7 apresenta de forma sucinta os dados que ilustram os resultados do estudo numérico, e dão base para a construção das conclusões deste trabalho. Relações empíricas obtidas através das simulações são apresentadas, e sugestões para novos trabalhos que podem dar continuidade a esta investigação são propostos.

Capítulo 2

Estado da Arte

2. Estado da arte

2.1. Introdução

Para prever o desempenho térmico de elementos confeccionados a partir da madeira é necessário ter acesso às informações que descrevem o comportamento desses materiais em situações adversas, tal como é a exposição ao fogo. Através de uma análise térmica, podem ser desenvolvidos modelos numéricos a fim de determinar a taxa à qual o material carboniza e a sua distribuição de temperaturas. Muitos modelos analíticos e numéricos têm sido desenvolvidos, variando desde simples expressões até sistemas mais complexos de resolução de equações diferenciais, descrevendo a transferência de calor e massa nos materiais [13].

Neste capítulo, alguns desses estudos são apresentados cronologicamente, a fim de contextualizar e relacionar os estudos já desenvolvidos, suas variantes e conclusões que contribuíram para o acréscimo de novos dados científicos.

2.2. Trabalhos desenvolvidos

O desenvolvimento de métodos numéricos e experimentais para o cálculo da resistência ao fogo de estruturas de madeira se intensificou após a segunda grande guerra. Em 1977, alguns modelos que simulavam a exposição ao fogo de vigas e colunas de madeira já estavam sendo desenvolvidos. Os métodos tinham como base os resultados dos estudos teóricos e experimentais. Na altura, a comparação com os resultados experimentais demonstrou concordância entre as resistências de fogo calculadas e medidas [14].

Mais tarde, investigações experimentais realizadas na Universidade de Liège, tiveram como objetivo estudar o comportamento de espécies de madeira tropicais submetidas à ação do fogo. A motivação deste estudo justificou-se devido à falta de informações sobre a taxa de carbonização de espécies de madeiras tropicais. No estudo, as espécies foram submetidas em um forno com utilização de termopares para a recolha de dados. A comparação dos resultados com o Eurocódigo EC5-1.2, com a norma australiana AS1720.4 e o modelo de White, mostrou que madeiras tropicais não podem

utilizar os mesmos modelos numéricos já desenvolvidos. Este estudo também mostrou a influência significativa da massa volúmica sobre a taxa de carbonização [15].

Assim como a massa volúmica, a condutividade térmica também é uma importante propriedade do material, sendo fundamental para o desenvolvimento de análises numéricas. Essa propriedade foi alvo de estudo de alguns investigadores, como Henrik Thunman e Bo Leckner, que em 2002, propuseram dois modelos numéricos para determinar esta propriedade com base na estrutura dos poros da madeira. Os modelos foram capazes de determinar a condutividade térmica de todo o tipo de espécies de madeira a partir da sua massa volúmica, teor de humidade e retração. Sua precisão foi verificada e validada através da comparação de valores mensurados por medição [16].

Contribuições importantes ao nível de propriedades térmicas também surgiram dos trabalhos de J. Hunt, através do desenvolvimento de modelos de elementos finitos que se basearam nas características estruturais fundamentais da madeira e sua anisotropia. Os modelos mostraram os efeitos do alinhamento celular, densidade celular e outros fatores como a influência da porosidade sobre a condutividade térmica efetiva [17].

Os estudos térmicos são de extrema importância para a prevenção contra incêndio. No entanto, a avaliação das medidas e dispositivos de proteção também contribui para o aumento do nível de segurança. Em 2005, os trabalhos de Frangi et al consideraram esta hipótese. Salas, em escala total, foram submetidas à ação do fogo, sendo avaliadas as medidas técnicas e as medidas estruturais de segurança contra incêndio. Os resultados mostraram que a utilização dos sistemas de aspersão de resposta rápida compensa os danos causados na estrutura pelas superfícies combustíveis, extinguindo o fogo no estágio inicial. Foi comprovado que para dimensões estruturais puras é possível limitar a propagação do fogo mesmo com a utilização da madeira [18].

Em 2006, Simon Schnabl trabalhou com modelos matemáticos baseados em equações diferenciais parciais, que determinaram a taxa de carbonização e os gradientes de temperaturas para transferências combinadas de calor e humidade em vigas de madeira. Os resultados de sua pesquisa mostraram o bom acordo entre o modelo desenvolvido e os resultados apresentados pela literatura (Fredlund, Eurocodigo 5, White e Nordheim) [19].

Mais tarde, outro modelo computacional foi desenvolvido por Andrej Horvat e Yehuda Sinai. Com o objetivo de simular o desenvolvimento do fogo de superfícies sólidas e gases combustíveis, este modelo seguiu os dados experimentais do CNRS-ENMA-Poitiers. O trabalho foi realizado na ANSYS Europe Ltd, enquadrando-se como parte do projeto Firenet, que investigava fenômenos relacionados a incêndios sob ventilação. Em geral, o desempenho do modelo desenvolvido foi satisfatório, embora seja necessário cuidado em sua aplicação devido à sensibilidade relacionada com as propriedades do material e as simplificações geométricas [20].

A consideração de montagens de parede e soalho de madeira com cavidades interiores foi incorporada, em parte, pelos trabalhos desenvolvidos por Frangi et al. Nestes estudos, é importante a análise da laje após os materiais isolantes se degradarem, considerando a fase secundária da carbonização. A carbonização secundária ocorre após a completa degradação de uma das superfícies que compõem a cavidade, introduzindo assim os efeitos do fogo para dentro das cavidades. Análises térmicas de elementos finitos em vigas de madeira expostas ao fogo foram realizadas, determinando os principais parâmetros que influenciam a carbonização durante a fase pós-proteção. As conclusões do trabalho explicaram os efeitos das altas temperaturas após a degradação do isolante. O fogo, em elevadas temperaturas, atingiu as superfícies internas da cavidade de forma tão repentina que provocou a carbonização severa das superfícies circundantes. Assim, quanto mais o revestimento de proteção atrasa o início da carbonização, mais a taxa de carbonização aumenta após a falha do revestimento de proteção [21], [22].

Em 2014, o trabalho intitulado “Resistência ao fogo de blocos de betão leve a base de caroço de espiga de milho (BBLGCEM)” foi apresentado durante a 4ª Jornada de segurança aos incêndios urbanos realizada no Instituto Politécnico de Bragança. Este trabalho avaliou o comportamento peculiar dos blocos BBLGCEM expostos ao fogo. Os resultados dos testes experimentais permitiram a validação e desenvolvimento de um modelo numérico proposto pelos autores. Desta forma, será possível a realização de novas pesquisas, ajuste de parâmetros como a geometria e determinação de propriedades térmicas [23].

Outra importante combinação de materiais que se traduz no aumento das resistências térmica e mecânica é a união entre a madeira e o aço. Inúmeros pesquisadores investigam o comportamento desse importante conjunto que, atualmente se aplica em muitos elementos de construções estruturais. O trabalho intitulado “Resistência ao fogo de vigas de madeira e secções de perfis em aço” apresentou diferentes soluções construtivas na utilização de vigas de madeira com secções de perfis em aço, avaliando a sua distribuição de temperaturas quando submetidas ao fogo [24].

O estudo térmico de lajes de madeiras com perfurações foi tema da investigação realizada por E. Fonseca et al. Em 2017, trabalhos relevantes para o aumento das informações relacionadas a esta situação específica foram publicados. A pesquisa apresentou abordagens numéricas tridimensionais e experimentais, que seguem a norma europeia (EN1365-2, 2012). Os modelos de elementos finitos desenvolvidos no *Ansys* foram validados com testes experimentais em escala real. Os resultados mostraram a influência do tamanho e formato das perfurações analisadas, sendo que o tamanho da perfuração é responsável pela evolução de temperatura diferente, enquanto a forma não assume diferenças significativas. O efeito de dano do fogo é maior na laje com perfurações maiores. Ainda foi verificado o critério de isolamento conduzido de acordo com a relação entre o aumento médio de temperatura e a temperatura inicial, não excedendo os 140 [°C] [25].

No Brasil, as principais referências de estudos relacionados com a análise térmica de estruturas de madeira expostas a situação de incêndio são Pinto e Caliu. Estes autores apresentam estudos teóricos e experimentais sobre a degradação térmica e gradientes térmicos da madeira exposta ao fogo. Em sua pesquisa, peças estruturais de madeira são expostas ao aquecimento pela curva ASTM E 199. Dentro de um forno com queimadores, a medição das temperaturas nas vigas foi realizada por termopares. Resultados mostraram que a madeira apresenta aquecimento lento, devido à massividade dos seus elementos estruturais e a baixa condutividade térmica da camada de carvão originada [26].

Capítulo 3

Análise Térmica

3. Análise térmica

A análise térmica define-se como o método utilizado para determinar o desenvolvimento da temperatura no interior dos elementos com base nas ações e propriedades térmicas dos materiais constituintes dos elementos e das superfícies de proteção [27]. Em outras palavras, o objetivo de uma análise térmica é obter a distribuição de temperaturas de um elemento que sofre transferência de calor no decorrer do tempo. Com a distribuição de temperatura é possível prever o comportamento de determinado elemento quando submetido a diversas situações extremas.

O estudo da análise térmica é de fundamental importância para a engenharia, uma vez que pode contribuir para maiores níveis de estabilidade e segurança. Além disso, após a criação e validação do estudo, torna-se possível a sua alteração e adequação para outras situações. Para entender esse processo, faz-se necessário o conhecimento dos possíveis tipos (ou modos) de transferência de calor, bem como seus efeitos combinados.

3.1. Processos de transferência de calor

A transferência de calor pode ser definida como uma energia térmica em trânsito, devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Para que a transferência de calor se desenvolva, é necessário que exista uma diferença de temperaturas entre corpos e/ou entre meios. Dada essa diferença de temperaturas, a troca de calor poderá ocorrer por meio de três diferentes métodos: condução, convecção e radiação [28].

3.1.1. Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução ocorre quando o calor é transferido entre corpos sólidos e/ou entre fluidos estacionários. Este modo de transferência de calor

ocorre a nível atômico molecular, onde a energia é transferida das partículas mais energéticas para as menos energéticas em contato. O calor é sempre transferido dos corpos de maior temperatura para os corpos de menor temperatura. Caso a transferência de calor ocorra entre corpos e fluidos, a troca de calor se dá inteiramente pela interação atômica molecular, ou seja, não existe movimento global do fluido.

Para cada modo de transferência de calor, é possível quantificar as taxas de calor transferido. Para a condução térmica a equação que descreve este fluxo de calor é conhecida como Lei de Fourier. Esta equação foi desenvolvida a partir de observações experimentais realizadas pelo matemático e físico Joseph Fourier. A lei permite concluir que o fluxo de calor q'' (quantidade de calor transferida em relação a uma área perpendicular ao fluxo) é proporcional à distribuição de temperaturas na direção do fluxo e a uma constante de proporcionalidade denominada λ , função da equação 1.

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

A constante de proporcionalidade λ é uma propriedade de transporte denominada condutividade térmica e varia de acordo com o material. Esta propriedade também varia de acordo com a temperatura, mas na maioria dos casos, essas variações são muito pequenas e podem ser desprezadas.

O fluxo de calor quantificado acima não transita por uma única direção, ou seja, possui características tridimensionais. Com base neste fato, uma equação geral para a lei de Fourier que engloba as três possíveis direções de transferência é apresentada:

$$q'' = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

O operador vetorial gradiente “ ∇ ” confere características tridimensionais à equação e $T(x, y, z)$ representa o campo de temperaturas em coordenadas cartesianas. Portanto, uma forma alternativa da lei de Fourier pode ser apresentada, com o índice “ n ”, representando uma direção específica de transferência:

$$q''_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

3.1.2. Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção ocorre quando um fluido escoar sobre uma superfície ou escoar por dentro de um canal, onde a temperatura do fluido é diferente da temperatura das superfícies em questão. Neste modo de transferência, as trocas de calor são definidas pelo efeito cumulativo entre a difusão e a advecção. A difusão é a troca de calor que está associada ao movimento molecular aleatório. A advecção corresponde a troca de calor associada ao movimento global do fluido [28].

No escoamento de um fluido sobre uma superfície, os efeitos da viscosidade proporcionam o surgimento da camada limite fluido-dinâmica. Essa camada caracteriza-se por apresentar diferentes valores de velocidade do fluido, que variam de zero (superfície da placa - condição de não deslizamento) até a velocidade livre de escoamento, localizada no topo da camada limite.

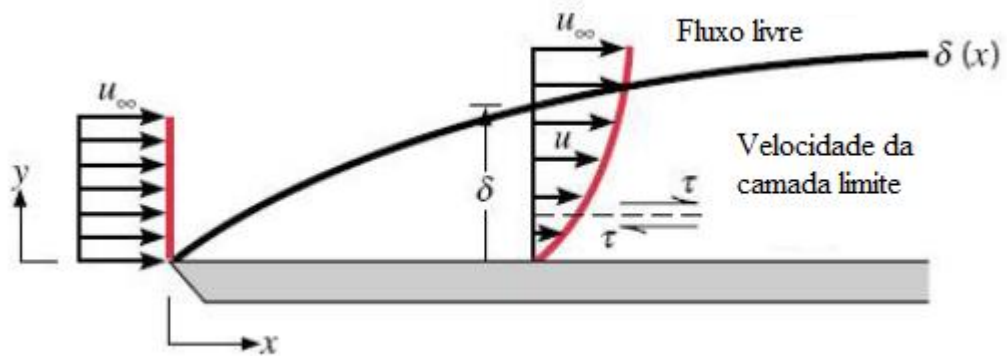


Figura 1: Formação da camada limite fluido-dinâmica. [28]

Na presença de um gradiente de temperaturas entre o fluido de escoamento e a superfície, uma camada similar pode ser desenvolvida. Esta placa denomina-se camada limite termodinâmica e caracteriza-se por apresentar a variação da temperatura entre a superfície e o fluido. Considerando que a temperatura da superfície é maior em relação à temperatura do fluido que escorre, pode-se observar a distribuição de temperatura dentro da camada termodinâmica ilustrada na figura 2. A temperatura varia entre T_∞ (temperatura do fluido) até a T_s (temperatura da superfície) e a troca de calor neste caso ocorre no sentido da superfície para o fluido.

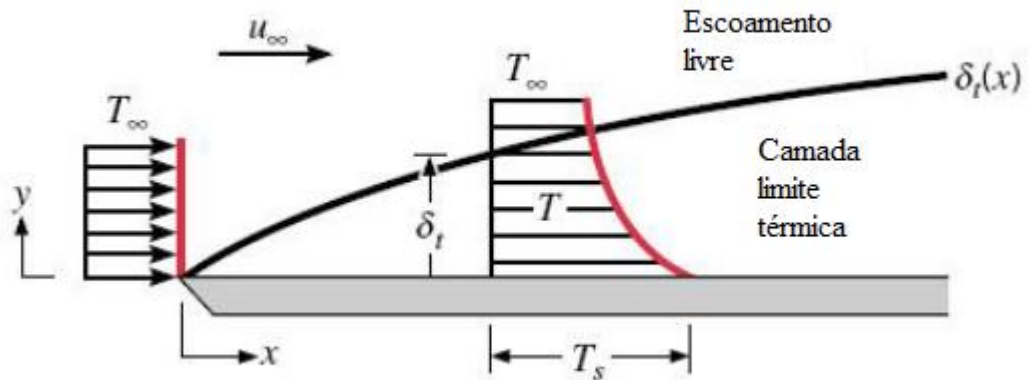


Figura 2: Formação da camada limite termodinâmica. [28]

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Se o movimento do fluido é proporcionado por um equipamento mecânico (bombas ou ventiladores) que induz a passagem do fluido sobre a superfície, diz-se que a convecção é forçada. Se o movimento do fluido é proporcionado pelos efeitos da diferença de massa, causada pela diferença de temperatura do fluido, diz-se que a convecção é livre. Assim como na troca de calor por condução, o fluxo de calor por convecção, q'' , também pode ser quantificado. O efeito global da transferência de calor por convecção pode ser expresso pela lei de Newton:

$$q'' = h_c(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Nesta equação q'' representa o fluxo de calor transferido por convecção, T_s a temperatura da superfície e T_∞ a temperatura do fluido de escoamento. A grandeza h_c é definida como o coeficiente de transferência de calor por convecção. Ele está associado a vários fatores que envolvem condições de camada limite, geometria da superfície em questão, natureza do escoamento do fluido, entre uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. A determinação deste coeficiente é o principal objetivo dos problemas que envolvem este tipo de troca de calor. Para este trabalho, levar-se-á em consideração h_c é igual a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ [27].

3.1.3. Transferência de calor por radiação

A radiação térmica corresponde ao modo de transferência de calor no qual a troca energética se dá por meio de ondas eletromagnéticas e/ou fótons. É deste modo que o fluxo de calor é emitido ou absorvido por um corpo. Qualquer substância com temperatura diferente do zero absoluto (seja ela líquida, sólida ou gasosa) pode emitir ou receber energia térmica, já que, neste modo de transferência o fluxo pode ser atribuído às mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos e moléculas. Diferente dos outros métodos de troca de calor, a radiação não necessita de um meio material para acontecer, podendo ser efetiva no vácuo.

Quando um corpo emite radiação térmica podemos classificá-lo de acordo com seu poder emissivo E . O poder emissivo corresponde à quantidade de radiação que este corpo pode emitir. A Lei de Stefan Boltzmann, que descreve o comportamento de corpos negros, apresenta um limite superior para o poder emissivo. Esta lei quantifica o poder emissivo de um corpo pela equação:

$$E = \sigma T_s^4 \quad (5)$$

Nesta equação T_s corresponde à temperatura absoluta da superfície [K]. Ainda, σ define-se como a constante de Stefan Boltzmann e possui valor de $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m^2K^4].

O corpo negro define-se como corpo ideal, ou seja, ele possui a capacidade de emitir toda a sua energia térmica. Para corpos reais, o poder emissivo é sempre menor em comparação ao corpo negro, sendo que diminui de acordo com as propriedades químicas, físicas e organização microestrutural de cada material. A emissividade é uma propriedade que tem por finalidade definir a quantidade de energia que um corpo real pode emitir. Para esses casos, a lei utilizada é a seguinte:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (6)$$

Onde ε corresponde à emissividade do corpo. Como esta propriedade relaciona a capacidade que um corpo tem de emitir energia em relação aos corpos negros, seus valores variam de zero a um. Para este estudo, a emissividade da madeira quando exposta a situação de incêndio em uma superfície seguirá os valores estabelecidos pelo

EC5 de $\varepsilon = 0,8$. O EC5 também estabelece a emissividade do fogo, que assumirá o valor de $\varepsilon = 1$ [29].

No processo de radiação, a energia que é emitida por um corpo incide sobre outro corpo que se encontra no mesmo ambiente. A esta energia dá-se o nome de *Irradiação* (G). No entanto, parte da energia que incide sobre o corpo não é absorvida, e sim refletida para o ambiente. A percentagem de energia que pode ser absorvida por um corpo é determinada de acordo com a sua *absortividade*. A *absortividade* (α) é uma propriedade radiante da superfície, que se define como a capacidade de absorção de energia. Sendo assim, a taxa de radiação que é absorvida pelo corpo (G_{abs}) é expressa por:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (7)$$

Os valores da absortividade também variam em um intervalo de zero a um. Esses valores dependem do tipo de material utilizado e da fonte de emissão de energia. Para um mesmo sistema, com diferentes fontes de energia (sol ou paredes de um forno), a absortividade do material pode variar.

Em casos reais, a emissividade e a absortividade são definidas por diferentes valores. No entanto, para muitas aplicações de engenharia essas propriedades sempre são consideradas similares (*superfícies cinza*) [28]. Nesses casos, podemos relacionar o poder emissivo (E) e a taxa de calor absorvida por um corpo (G_{abs}), a fim de determinar o fluxo líquido de transferência de calor (q''):

$$q'' = \varepsilon\sigma T_s^4 - \alpha G = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (8)$$

Onde T_{viz} é a temperatura da vizinhança [K]. Essa equação descreve o comportamento radioativo líquido entre corpos que trocam calor por radiação com a vizinhança.

Para ilustrar este modo de transferência de calor, consideremos a figura 3. As duas superfícies representadas, de área A_1 e A_2 , estão sujeitas a diferentes temperaturas de superfície T_{s1} e T_{s2} . Quando expostas em um meio transparente a radiação, as mesmas trocarão calor por radiação, através da distância que as separa. Tanto a superfície S_1 quanto a superfície S_2 emitem calor de acordo com as suas emissividades e

absorvem calor de acordo com suas absorvidades. O corpo mais quente sofre a perda de calor e o corpo mais frio sofre acréscimo de calor.

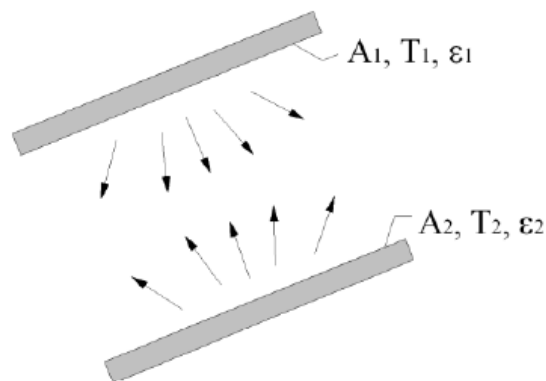


Figura 3: Troca de calor por radiação entre duas superfícies. [30]

A radiação pode ainda ser descrita pela utilização de uma expressão alternativa que contém um coeficiente de transferência de calor por radiação h_r . Em algumas situações na engenharia, é conveniente a utilização desta forma devido ao efeito combinado da troca de calor por radiação e convecção. Além disso, com a utilização desta equação, é possível observar a linearização das equações relacionadas, uma vez que anteriormente, a equação da radiação possuía ordem 4 (equação 8), devido à quarta potência do expoente. A quantidade de calor transferido nesta forma é então definida como:

$$q = h_r A (T_s - T_{viz}) \quad (9)$$

Onde A corresponde a área [m^2] em que a troca de calor acontece. Nesses casos o coeficiente de transferência de calor por radiação é determinado pela equação:

$$h_r \equiv \epsilon \sigma (T_s - T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (10)$$

3.1.4. Transferência de calor por convecção e radiação combinada

Em muitos casos práticos da engenharia a transferência de calor total que uma superfície sofre ocorre simultaneamente por convecção para o meio ambiente e por radiação para a vizinhança. Algumas normas regulamentadoras sugerem o uso de uma expressão que considere os efeitos de ambas as trocas de calor [27]. Dessa forma, é

conveniente definir uma expressão para determinar a quantidade líquida de fluxo térmico efetivo, ou seja, a quantidade de calor transferido por convecção e radiação em conjunto. Nas superfícies expostas ao fogo, o fluxo de calor efetivo pode ser expresso:

$$q''_{cr} = q''_c + q''_r = h_c(T_s - T_\infty) + h_r(T_s - T_{viz}) \quad (11)$$

Nesta expressão, q''_{cr} é o fluxo de calor efetivo, q''_c é o fluxo líquido de calor por convecção e q''_r é o fluxo líquido de calor por radiação, ambos em $[W/m^2]$. Para o caso específico em que $T_\infty = T_{viz} = T$ a expressão acima pode ser simplificada, e os coeficientes de convecção e radiação podem ser então reorganizados:

$$q_{cr} = h_c(T_s - T) + h_r(T_s - T) = (h_c + h_r)(T_s - T) = (h_{cr})(T_s - T) \quad (12)$$

Como já definido anteriormente, tanto o coeficiente convectivo quanto radioativo podem ficar expressos em conjunto pela expressão:

$$h_{cr} = (h_c + h_r) = h_c + \varepsilon\sigma(T_s - T_{viz})(T_s^2 - T_{viz}^2) \quad (13)$$

3.2. Curvas de incêndio

Um dos fatores mais importantes para o estudo de elementos expostos em situações de incêndio é a caracterização do próprio fogo. Para isso, algumas normas regulamentadoras disponibilizam curvas que tem por objetivo caracterizar esse comportamento. Tais curvas são nomeadas de curvas de incêndio. Uma curva de incêndio define-se como a variação da temperatura dos gases presentes na vizinhança das superfícies dos elementos que são expostos ao fogo em função do tempo. Essas curvas podem ser descritas de duas diferentes formas. As *curvas nominais* são curvas convencionais que são utilizadas para classificar ou verificar a resistência ao fogo de determinado tipo de material. As *curvas paramétricas* são criadas com base em modelos específicos de incêndio e descrevem o comportamento do fogo mediante parâmetros pré-existentes [27].

A seguir, serão listadas as curvas de incêndio natural e as curvas propostas pelas normas regulamentadoras EC1 (EN1991-1-2, 2002) e ASTM E119 (*American Society for Testing and Materials*).

3.2.1. Curva de incêndio natural

A curva de incêndio natural descreve o comportamento natural do fogo que está presente em uma situação de incêndio. O incêndio identifica-se como sendo uma combustão sem controle no espaço e no tempo, e necessita de condições específicas para se desenvolver, como a fonte de calor, o material combustível e o oxigênio.

Quando o incêndio se desenvolve, seu comportamento natural pode ser descrito por quatro fases distintas bem definidas, sendo elas a ignição, a fase inicial, a fase de combustão plena e a fase de arrefecimento. A figura 4 apresenta o desenvolvimento da curva natural de incêndio, indicando as quatro fases de seu comportamento.

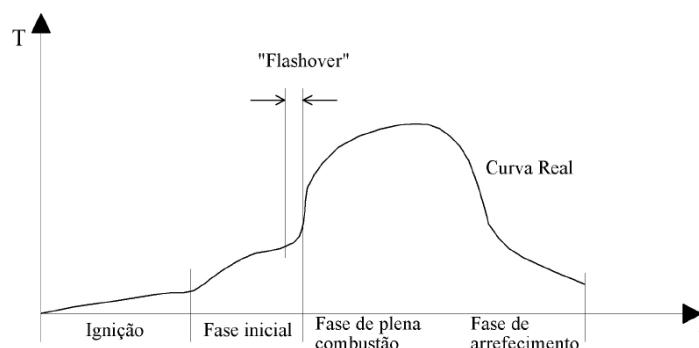


Figura 4: Fases de um incêndio natural. [31]

A primeira fase apresentada no gráfico é a ignição. Esta fase não apresenta altas temperaturas, ou seja, não influencia no comportamento estrutural dos edifícios. No entanto, nesta fase que são produzidos gases tóxicos prejudiciais para o ser humano.

A segunda fase, denominada propagação, apresenta temperaturas elevadas em relação à primeira, uma vez que ocorre após um nível mínimo de radiação ser atingido. Os materiais combustíveis presentes no ambiente iniciam o processo de queima, dando origem à faixa crítica denominada *Flashover*, ou inflamação generalizada. Temperaturas ainda maiores são atingidas devido à produção de chamas e oxigênio presente no ar. As propriedades dos materiais combustíveis e suas resistências ao fogo influenciam nesta fase.

A terceira fase denomina-se desenvolvimento pleno. Nesta fase os materiais presentes no ambiente queimam completamente em temperaturas constantes. A fase de

arrefecimento, última de todo o processo, caracteriza-se pela diminuição das temperaturas devido à total queima dos materiais combustíveis e à extinção do oxigénio presente.

3.2.2. Curva de incêndio padrão ISO 834

A curva padrão ISO 834 demonstrada no Eurocódigo 1 (EN1991-1-2, 2002), é descrita pela equação 14.

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (14)$$

T corresponde à temperatura dos gases do compartimento de incêndio, em um instante t [min], T_0 corresponde à temperatura inicial, geralmente igual a 20 [°C]. Para esta curva a temperatura não se mantém constante em nenhum intervalo de tempo.

3.2.3. Curva de incêndio para elementos exteriores

Esta curva descreve o comportamento de incêndio para elementos exteriores, ou seja, elementos que não estejam dentro do compartimento de incêndio, mas que de alguma forma são influenciados pelo fogo.

$$T = 660[1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}] + T_0 \quad (15)$$

Aqui, T representa a temperatura [°C], T_0 a temperatura inicial [°C] e t [min] o tempo decorrido. Para esta curva, a partir de 30 [min] a temperatura apresenta valores próximos à $T = 679,99$ [°C] com pequenas variações. Decorridos 80 [min], a temperatura se mantém constante e igual a $T = 680$ [°C].

3.2.4. Curva de incêndio de Hidrocarbonetos

Esta curva descreve o comportamento de incêndio para elementos cuja classificação química é indicada como hidrocarbonetos.

$$T = 1080[1 - 0.325e^{-0.167it} - 0.675e^{-2.5t}] + T_0 \quad (16)$$

T [°C] representa a temperatura, T_0 [°C] a temperatura inicial e t [min] o tempo decorrido. Para esta curva, a partir de 30 [min] a temperatura apresenta valores próximos à $T = 1099,6$ [°C] com pequenas variações. A partir de 80 [min], a temperatura se mantém constante e igual à $T = 1100$ [°C].

3.2.5. Curva de incêndio ASTM

A curva caracterizada pela norma ASTM E119 (*American Society for Testing and Materials*), é utilizada na avaliação ao fogo de elementos estruturais. É representada pela equação 16, onde T [°C] representa a temperatura, T_0 [°C] a temperatura inicial e t [min] o tempo decorrido. As quatro curvas são representadas na figura 5.

$$T = 750 \left[1 - e^{-3,7955\sqrt{t}} \right] + 170,41\sqrt{t} + T_0 \quad (16)$$

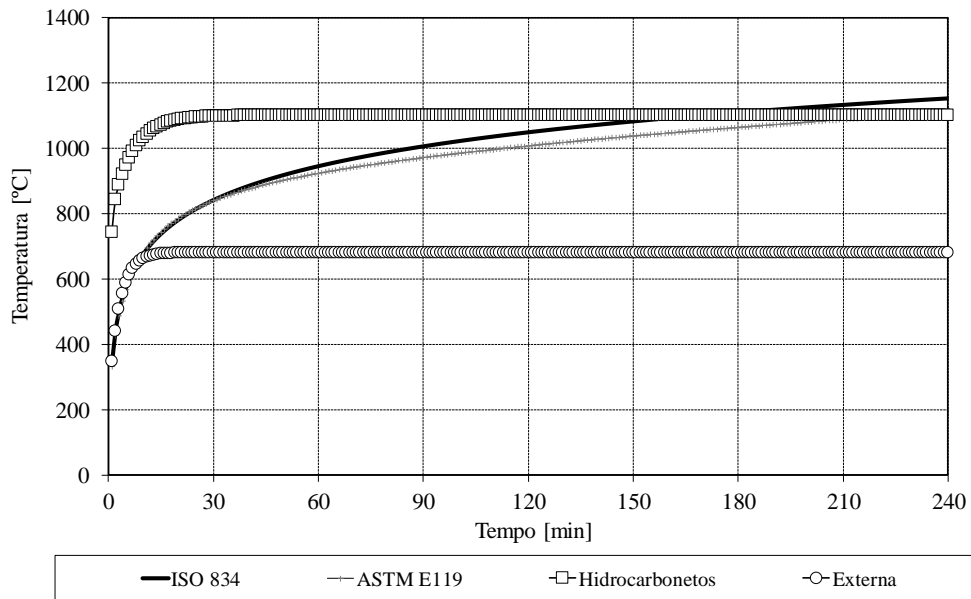


Figura 5: Comportamento das curvas de incêndio.

Capítulo 4

Comportamento térmico

4. Comportamento térmico da madeira

A madeira é classificada como material combustível. Neste sentido, quando é submetida à condição de incêndio, ela libera gases inflamáveis que contribuem para a propagação das chamas. As novas chamas, por sua vez, atingem outras regiões da madeira que ainda não haviam sido consumidas.

Após atingir um determinado tempo e temperatura, a madeira em decomposição forma uma camada de carbono sob a superfície queimada. Esta camada atua como resistência ao fogo, uma vez que diminui a velocidade de liberação de gases inflamáveis para o ambiente, e conseqüentemente o processo de degradação térmica [11].

A velocidade de carbonização é um parâmetro importante para a análise do comportamento térmico da madeira. Este parâmetro está relacionado com as diferentes propriedades térmicas, físicas e químicas que cada espécie de material possui. Fatores como resistência e rigidez, e ainda, fatores intrínsecos da madeira, tais como a densidade, o teor em água, a inclinação do fio, a composição química, a permeabilidade e a condutividade térmica influenciam na determinação da velocidade de carbonização. A consideração de fatores externos, as temperaturas de exposição ao fogo, a duração da exposição e a ventilação do ambiente também influenciam no processo de carbonização da madeira [11].

Além da camada de carvão, outra importante região de menor espessura resulta do processo de queima da madeira. Esta região define-se por zona ou camada de pirólise e apresenta parte das propriedades físicas e mecânicas alteradas devido à ação do fogo.

Abaixo desta camada, encontra-se a madeira restante que, em temperaturas menores, não sofre a alteração de suas propriedades. Esta região inalterada mantém as capacidades mecânicas, contribuindo para a resistência da estrutura. A figura 6 ilustra as regiões mencionadas anteriormente.

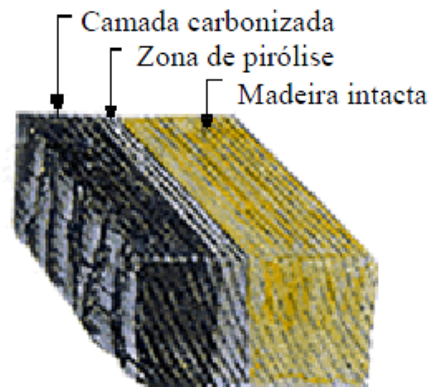


Figura 6: Camadas de degradação térmica [30].

O processo de combustão da madeira pode ser descrito por etapas bem definidas, uma vez que se divide de acordo com as faixas de temperatura. No subcapítulo seguinte, são descritos os processos da pirólise, ignição e formação da camada de carbono.

4.2. Pirólise

Se a quantidade de calor necessária é fornecida e a temperatura limite é atingida, o processo de degradação térmica tem seu início. A pirólise define-se como o processo de degradação térmica em que não existe a presença de oxigênio. Esse processo pode ser observado no intervalo de temperatura de 100 [°C] a 500 [°C].

Inicialmente, a madeira exposta a temperaturas menores de 100 [°C], não apresenta variações significativas das suas propriedades, uma vez que poucas reações químicas ocorrem nessas temperaturas. À medida que a temperatura ultrapassa os 100 [°C] a água presente no interior da madeira evapora, implicando na diminuição gradual da sua humidade.

Para 200 [°C], as superfícies externas sofrem pequenas degradações e as propriedades se alteram devido à desidratação da madeira. Nesta temperatura, ocorre liberação total da humidade existente, bem como a liberação de calor e dióxido de carbono para o ambiente. No intervalo de 200 [°C] a 280 [°C], a degradação presente na superfície da madeira transporta-se para o núcleo, dando início à criação de uma camada que se forma lentamente, onde o processo de pirólise ocorre.

A decomposição da celulose ocorre no intervalo de 240 [°C] a 350[°C], dando origem a uma pequena formação de carvão. Para intervalos próximos de 280 [°C] a 500 [°C], dá se inicio a liberação acentuada de gases combustíveis e alcatrão na forma de fumo. Nessa faixa de temperaturas, as reações observadas são caracterizadas como exotérmicas. Para temperaturas acima de 500 [°C], pode-se observar o processo de combustão incandescente. Neste processo, a chama se extingue e tanto carvão, quanto monóxido de carbono e hidrogénio começam a queimar de forma luminosa. Por fim, atingindo a temperatura de 1000 [°C], todo o carbono restante é rapidamente consumido, completando a assim a carbonização [2].

4.2. Ignição

Define-se como ignição, o processo no qual a madeira é exposta a temperaturas suficientemente altas, juntamente com oxigénio em abundância presente no ambiente. Nesta situação, as reações são isotérmicas e as temperaturas aqui envolvidas são consideradas por alguns autores como pontos de ignição da madeira. O efeito combinado das altas temperaturas e atmosferas ricas em oxigénio proporciona um ambiente suscetível ao surgimento da ignição forçada e da ignição espontânea.

Na ignição forçada o processo ocorre quando a superfície da madeira entra em contato com qualquer fator que possa iniciar o processo de ignição (fator de ignição), seja uma chama ou faísca.

Na ignição espontânea o processo se inicia sem a atuação direta de um fator de ignição. Geralmente a ignição espontânea ocorre com combustão sem chamas, quando o material é submetido a fontes de calor relativamente baixas durante largas escalas de tempo. Ela pode ocorrer devido ao calor transferido em uma situação de incêndio, ou a um fluxo de energia, ou a qualquer objeto que não esteja diretamente em contato a superfície da madeira, mas que esteja suficientemente quente para transferir calor (troca de calor por convecção ou radiação). Este processo apresenta carbonizações consideráveis, e superfícies carbonizadas com composições químicas distintas daquelas encontradas em processos de carbonização comuns.

4.3. Carbonização da madeira

A carbonização da madeira ocorre quando este material é exposto em determinadas temperaturas por um intervalo de tempo específico. Quando as condições necessárias são atingidas, o processo de carbonização inicia-se, formando uma camada de carbono sobre a superfície do material, proveniente da decomposição do mesmo.

Como dito anteriormente, a velocidade de carbonização depende de vários fatores, internos e externos ao processo de queima da madeira. Estudos mostram que a determinação da velocidade de carbonização é de fundamental importância para a análise térmica, uma vez que as propriedades do material e também sua resistência ao fogo estão diretamente relacionadas com as espessuras das regiões afetadas e não afetadas pela ação térmica.

A determinação da velocidade de carbonização pode ser realizada por meio de modelos empíricos formulados a partir de dados experimentais ou teóricos, baseados em princípios físicos e químicos. Esta grandeza pode se apresentar de duas formas distintas: perda de massa [g/s] ou avanço da carbonização [mm/s], sendo que o avanço da carbonização é o mais utilizado, uma vez que evidencia de forma direta a secção residual.

Considerando superfícies não protegidas por nenhum material isolante, a evolução da carbonização, $d_{char,0}$, em [mm], pode ser obtida pela expressão 17, que relaciona a velocidade de carbonização, β_0 em [mm/min] e o tempo t em [min] de exposição ao fogo. A velocidade de carbonização é apresentada em função dos diferentes tipos de madeiras, com diferentes valores de densidade, conforme a tabela 1. [29]

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (17)$$

A equação 17 não considera a fissuração e o arredondamento dos cantos que podem ser formados quando a madeira é exposta ao fogo em várias direções diferentes. Para este cálculo, a expressão recomendada é a seguinte [29]:

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (18)$$

Tabela 1: Valores para velocidades de carbonização

Tipologia	Material	β_0	β_n
<i>Softwood</i> (madeira macia)	MLC, $\rho \geq 290[kg/m^3]$	0,65	0,7
	Madeira Maciça, $\rho \geq 290[kg/m^3]$	0,65	0,8
<i>Hardwood</i> (madeira estrutural)	MLC ou madeira maciça, $\rho \geq 290[kg/m^3]$	0,65	0,7
	MLC ou madeira maciça, $\rho \geq 450[kg/m^3]$	0,5	0,55

MCL - Madeira laminada colada, β_0 - Taxa de carbonização para a exposição ao fogo numa direção. β_n - Taxa de carbonização nominal incluindo o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras.

A ação do fogo atuando em várias regiões pode ser observada na figura 7. Considera-se que a superfície superior do elemento de madeira retangular está isolada, sendo que as outras três superfícies estão sob a ação do fogo. Nesses casos, a queima do elemento estrutural processa-se mais rapidamente, criando regiões arredondadas. O arredondamento dessas regiões será igual à espessura da superfície carbonizada.

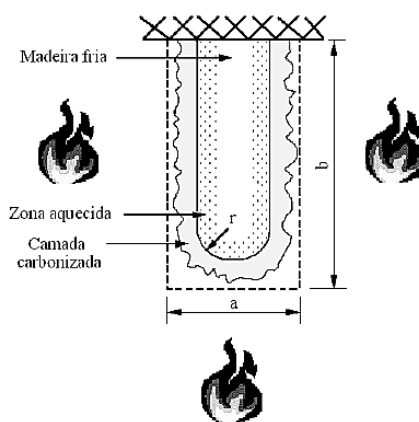


Figura 7: Efeitos de arredondamento da exposição em três lados. [30]

4.4. Camada de carbonização efetiva

A camada de carbonização efetiva leva em consideração as espessuras da camada de carbonização e da camada de pirólise, que também são formadas durante o processo de queima da madeira. Para o cálculo da camada de carbonização efetiva, utiliza-se a expressão 19, onde $d_{char,n}$ corresponde à camada de carbonização

apresentada anteriormente, d_0 define-se como espessura da camada de pirolise e k_0 é o fator para superfícies protegidas por revestimento, determinado através da tabela 2 [29]:

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{char},n} + k_0 \times d_0 \quad (19)$$

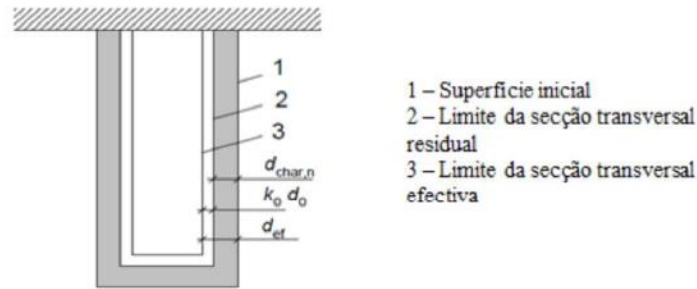


Figura 8: Definição de camada residual e camada efetiva. [29]

Tabela 2: Fator k_0 .

Tempo	k_0
$t \leq 20$ [min]	$t/20$
$t \geq 20$ [min]	1

4.5. Propriedades térmicas da madeira

4.5.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade térmica do material, classificada como propriedade de transporte. Ela apresenta a indicação da taxa de energia que será transferida no processo de transferência de calor por condução. Essa propriedade está em função da estrutura física da matéria, atômica e molecular, ou seja, depende do estado em que o material se encontra. Como regra geral, para materiais sólidos observa-se uma condutividade maior em relação a materiais líquidos. Os líquidos por sua vez, apresentam condutividade térmica maior em relação a gases. A diferença de condutividade entre esses estados é considerável (alguns sólidos possuem condutividade térmica quatro vezes maior do que alguns líquidos) [28].

A lei de Fourier, dada pela equação 1, mostra que para um determinado gradiente de temperatura, o fluxo térmico por condução é diretamente proporcional à

condutividade térmica, ou seja, quanto maior a condutividade térmica do material, maior o fluxo de calor transferido. Esta propriedade é muito importante, pois é utilizada para classificar bons condutores de calor e materiais isolantes.

Neste trabalho, a condutividade térmica da madeira utilizada é a recomendada em norma e está apresentada na tabela 3, variando com a temperatura [29].

Tabela 3: Condutividade térmica da madeira

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [W/mK]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

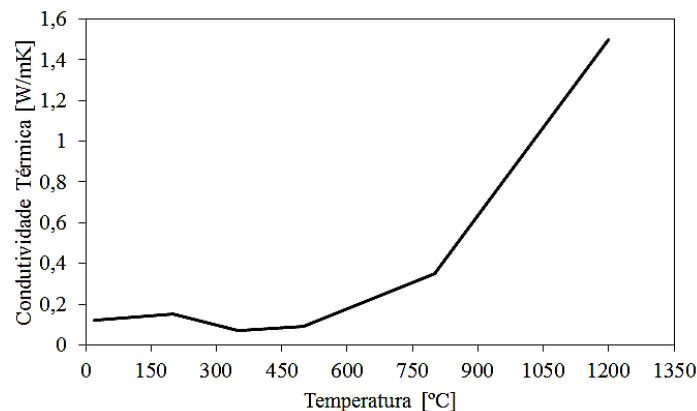


Figura 9: Condutividade térmica da madeira em função da temperatura. [29]

4.5.2. Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa da substância em um grau [33].

Existem duas formas distintas de análise utilizadas para a dedução desta propriedade termodinâmica. A primeira delas é desenvolvida a volume constante, e seus valores são determinados em função da relação entre a variação de energia interna e a

variação do gradiente de temperatura, nomeados pela variável C_v . Em contrapartida, também é possível determinar valores para o calor específico considerando a pressão constante, ou seja, valores nomeados C_p , que são definidos pela relação entre as variações de entalpia e gradientes de temperatura [33].

Os valores dos calores específicos adotados neste trabalho seguiram as recomendações presentes nos Eurocódigos, e são apresentados na tabela seguinte [29].

Tabela 4: Calor específico da madeira

Temperatura [°C]	Calor Específico [kJ/kgK]
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

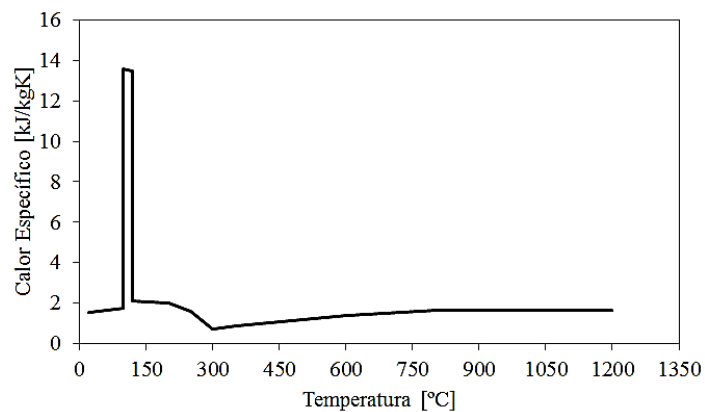


Figura 10: Calor específico da madeira em função da temperatura. [29]

4.5.3. Massa específica

A massa específica é a relação existente entre a massa de um corpo e seu volume. As unidades mais comuns para essa grandeza são g/cm^3 , kg/m^3 ou lbs/ft^3 . Para a madeira, alguns fatores importantes influenciam a densidade, tais como: composição química, estrutura da madeira, teor de humidade, largura do anel anual e porção de lenho de princípio/fim de estação.

Existem diversos métodos para se determinar a massa específica de um material. Vários estudos são realizados para determinar qual o melhor método em relação à madeira. O princípio básico consiste em realizar a pesagem para obter a massa. O volume pode ser determinado pela medição das dimensões do provete de madeira, ou pelo método do deslocamento de água [princípio de Arquimedes]. A densidade da madeira está diretamente relacionada com várias de suas propriedades, entre mecânicas, térmicas, acústicas, elétricas [34].

Tabela 5: Coeficientes da massa específica da madeira.

Temperatura [°C]	Coefficiente
0	$1 + \omega$
99	$1 + \omega$
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

Considerando as propriedades da espécie Abeto, com massa específica média de $\rho = 341 [\text{kg/m}^3]$ e humidade relativa de $\omega=11\%$, a tabela e o gráfico seguintes podem ser obtidos [35]:

Tabela 6: Massa específica da madeira de Abeto.

Temperatura [°C]	Massa específica [kg/m ³]
0	378,51
99	378,51
120	341
200	341
250	317,13
300	259,16
350	177,32
400	129,58
600	95,48
800	88,66
1200	1

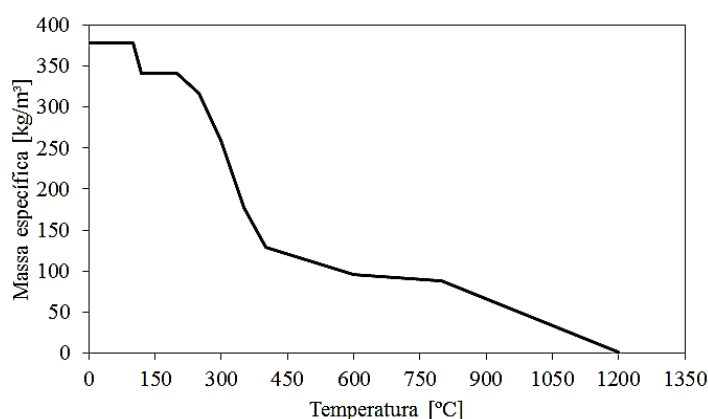


Figura 11: Massa específica da madeira de Abeto em função da temperatura. [29]

4.6. Materiais isolantes

4.6.1. Fibras de vidro

A fibra de vidro, como o próprio nome sugere, é um material derivado do vidro. Sua produção iniciou-se na antiga Síria, Grécia e Egito. A aproximadamente 250 a. C a produção deste material era realizada através de uma vara de vidro aquecida para aplicar como relevo sobre a superfície de produto acabados. A fibra de vidro começou a ser desenvolvida comercialmente no ano de 1939, no decorrer da 2ª Guerra Mundial [36].

O processo de produção de fibra de vidro é relativamente simples. Inicialmente funde-se o vidro, até o que o mesmo atinja um nível específico de viscosidade. Em

seguida o vidro fundido é forçado a escorrer através de pequenos furos ou orifícios. À medida que filetes de vidro escorrem, um jato de ar ou vapor a alta pressão o atinge, produzindo a lã de vidro, que da origem as fibras de vidro. Neste processo, variáveis como temperatura do vidro, dimensão dos orifícios e pressão dos jatos definem qual o tipo de material que será fabricado.

4.6.2. Lã de rocha

Desde a antiguidade, os homens utilizavam as pedras provindas de erupções vulcânicas para a produção de telhados residenciais, em busca de proteção contra o frio. Além de excelente desempenho como isolante térmico, este material também apresenta bons níveis como isolante acústico [37].

A lã de rocha é formada a partir de rochas vulcânicas, tais como basalto e calcário. Quando submetidas em altas temperaturas, por volta de 1600 [°C], essas pedras se fundem e servem de matéria-prima no processo de produção. Após a fusão, o material líquido gerado é submetido ao processo de centrifugação, onde surgem as fibras de rocha. Então, aditivos aglomerantes e óleos impermeáveis são aplicados às fibras, transformando-as em massas de lãs de rocha. Estas ainda podem passar por outros processos de fabricação, com o objetivo de produzir diferentes formatos, tais como feltro, painéis, mantas ou coquilhas [38].

4.6.3. Propriedades térmicas de materiais isolantes

Os isolantes selecionados para a avaliação do desempenho em relação ao fogo foram baseados nos mesmos materiais utilizados no estudo “*Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels*”, realizado no Instituto de Engenharia Estrutural, em Zurique (*ETH Zurich*). Dentre estes materiais estão fibras de vidro e lãs de rocha [35].

O primeiro material selecionado é um laminado de placas confeccionadas por fibra de vidro com ponto de fusão superior a 700 [°C], segundo a norma DIN 4102 – 17. Este material é fabricado pela empresa *ISOVER Saint Agrobain*. O segundo material analisado também é um composto de lã de vidro, com densidade e ponto de fusão (1000

[°C]) superiores ao primeiro, também produzido pela *ISOVER Saint Agrobain*. O terceiro material é produzido pela fabricante *Knauf Insulation*, sendo este um composto de ligado de placa de lã de rocha, não inflamável, que proporciona isolamento térmico e acústico, também possui ponto de fusão superior a 1000 [°C] segundo a normal DIN 4102.

As propriedades térmicas consideradas para este estudo foram fornecidas por seus fabricantes. Algumas das propriedades como a emissividade, foram estimadas para os materiais de base de sua composição, uma vez que não existem estudos que apresentem as propriedades com essas específicas densidades. Ainda, para título de comparação, foram calculadas as difusividades de todos os isolantes considerados. Os valores encontram-se na tabela 7.

Tabela 7: Propriedades térmicas dos materiais isolantes

	Densidade [Kg/m ³]	Calor Específico [J/kgK]	Condutividade [W/m ² K]	Emissividade	Temperatura de Fusão [°C]	Difusividade [mm ² /s]
Fibra de vidro	14	1030 [39]	0,039 [39]	0,75 [39]	700 [39]	2,0746
Fibra de vidro	20	1030 [39]	0,036 [39]	0,75 [39]	>1000 [39]	1,7475
Lã de Rocha	30	1030 [40]	0,04 [40]	0,9 [40]	>1000 [40]	1,2945

4.7. Propriedades térmicas do Ar

O ar é um importante composto presente no ambiente. Sua composição química apresenta diferentes percentagens de gases específicos, tais como oxigênio e nitrogênio, argônio, e também uma relativa percentagem de vapor de água. Suas propriedades variam de acordo com as condições de pressão e temperatura, presentes no ambiente [32].

A consideração das propriedades térmicas do ar na simulação numérica enriquece os resultados aproximando os valores obtidos para situações reais. Neste estudo, as propriedades consideradas foram a densidade, o calor específico e a

condutividade térmica. Os valores encontrados em função das temperaturas são apresentados de seguida.

Tabela 8: Propriedades térmicas do ar [32]

Temperatura [°C]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kgK]	Condutividade térmica [W/mK]
20	1,166	1000	0,0258
30	1,127	1000	0,0265
40	1,091	1000	0,0272
50	1,0557	1000	0,0279
60	1,026	1001	0,0299
70	0,996	1001	0,0292
80	0,967	1001	0,0200
90	0,941	1001	0,0306
100	0,916	1001	0,0312
120	0,869	1001	0,0324
140	0,827	1002	0,0349
160	0,789	1002	0,0349
180	0,754	1002	0,0362
200	0,722	1003	0,0374
250	0,653	1003	0,0406
300	0,596	1005	0,0437
350	0,5482	1006	0,0464
1000	0,5482	1006	0,0464

Capítulo 5

Método dos Elementos Finitos

5. Método dos elementos finitos

5.1. Introdução

O método dos elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*) é uma técnica numérica utilizada para a resolução de problemas físicos que são governados por equações diferenciais parciais, ou problemas que podem ser formulados por equações de minimização. Este método é amplamente utilizado nos campos da engenharia, proporcionando soluções para problemas estruturais, problemas fluidodinâmicos, problemas de transferência de calor, entre outras.

Basicamente, o método consiste em dividir o domínio de uma função governante em partes menores. Dentro desta divisão, são criados os elementos finitos. Esta técnica permite determinar a solução para o problema de forma precisa, possibilitando o trabalho com geometrias complexas e inclusão de propriedades distintas de diferentes materiais. Quanto menor a dimensão do elemento finito, mais precisa será a análise e consequentemente os seus resultados.

Os cálculos que envolvem o método dos elementos finitos, para regimes transientes e não lineares são consideravelmente complexos. Desta forma é necessária a utilização de sistemas computacionais de alto desempenho que auxiliam na determinação das soluções pretendidas. Para este trabalho, o programa utilizado foi o *Ansys*, recorrente em análises estruturais, dinâmica de fluidos, problemas de dinâmica implícita e explícita, problemas térmicos, problemas eletromagnéticos e problemas de fadiga.

5.2. Equação diferencial da condução e condições de fronteira

A análise térmica tem como objetivo determinar a distribuição de temperaturas em um corpo, quando submetido à troca de calor. Para determinar este gradiente é necessário solucionar a equação diferencial da condução de calor, utilizando as condições de fronteira pertinentes ao problema térmico [41]. A equação 20 governa a condução de calor para sólidos.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

Nesta equação, as propriedades do material que influenciam a troca de calor são: λ correspondente à condutividade térmica [W/mK], C_p correspondente ao calor específico em [kJ/kgK] e ρ a massa específica [kg/m³]. Os termos diferenciais representam as variações do gradiente de temperaturas [°C] no plano tridimensional x y z , em função do tempo [s]. Por fim, \dot{Q} corresponde ao calor gerado internamente, por unidade de volume e tempo [J/m³s].

A partir da equação 20 define-se uma importante propriedade obtida através da relação entre a condutividade do material, calor específico e densidade expressa na equação 21.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (21)$$

A difusividade térmica α possui um papel importante para avaliar o desempenho de materiais considerados isolantes, uma vez que o seu significado físico está diretamente relacionado com a capacidade do material em dissipar energia térmica. Quando um material possui altos valores de difusividade, este apresenta maior capacidade de dissipar calor em relação a materiais que apresentam valores menores. Sendo assim, o “ajuste de temperaturas” neste material ocorre de maneira acelerada, tanto para o acréscimo quanto decréscimo de temperaturas.

As condições de fronteira e condições iniciais que são utilizadas para solucionar a equação da condução de calor são representadas na figura 12.

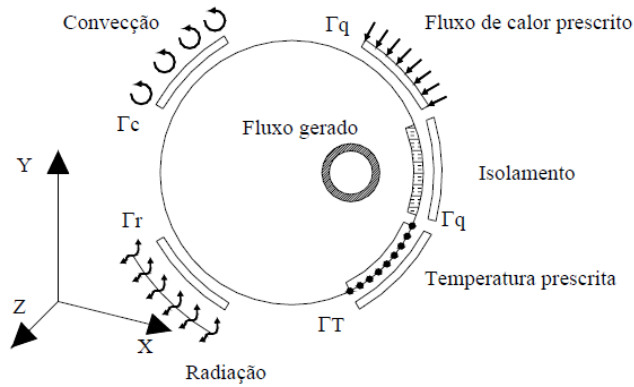


Figura 12: Condições de fronteira para a equação diferencial do calor. [42]

A distribuição de temperatura inicial e temperaturas ou fluxos prescritos no sólido são a base para as condições de fronteira, expressas em termos de:

- Condições de fronteiras essenciais (*condição de Dirichlet*) ou condição em que as temperaturas são prescritas numa única região Γ_r da fronteira, $T = \bar{T}$.
- Condições de fronteiras naturais ou condição correspondente a um fluxo inicialmente especificado (*condição de Newman*) na parte da fronteira Γ_q , sendo n o versor normal exterior a essa fronteira;

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{q} \quad (22)$$

- A condição que adiciona transferência de calor convectiva (*condição de Cauchy*) de uma parte Γ_c , da fronteira à temperatura T para o fluido de trabalho, à temperatura T_∞

$$q_c = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_\infty) \quad (23)$$

- A condição que relaciona a troca de calor radioativa, entre uma parte Γ_r , da fronteira à temperatura T para a vizinhança, à temperatura T_{viz} .

$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_r(T - T_{viz}) \quad (24)$$

5.3. Método dos resíduos pesados

O método dos resíduos pesados permite representar as equações diferenciais em formas integrais. A partir de uma aproximação realizada através do método dos elementos finitos, é possível discretizar as formas integrais para cada elemento gerado. Agrupando todos estes elementos, um sistema algébrico com possível solução aproximada é obtido. Considerando $A(u)$ uma equação diferencial da forma:

$$A(u) = Lu + p = 0 \text{ em } \Omega \quad (25)$$

Onde L corresponde a um diferencial, p é independente de u , no domínio Ω , sujeita as condições de fronteira Γ . A determinação da função u desconhecida é obtida através de métodos numéricos. O domínio Ω é discretizado, relacionando-se cada ponto de discretização a uma variável a_j que será determinada. Estas variáveis, juntamente com as funções de forma N_j definem \hat{u} como uma aproximação da função desconhecida u , no domínio Ω :

$$u = \hat{u} = \sum_{j=1}^M a_j N_j \quad (26)$$

O conjunto das funções de forma ou por aproximação N_m , deve ser escolhido de maneira a atingir um limite necessário de funções que permitem uma boa aproximação. A condição ideal para que a melhoria das aproximações seja perfeita, é atingida quando \hat{u} tende a u , e M tende ao infinito. Quando a equação 26 no domínio Ω tende a zero, considera-se que uma boa aproximação foi atingida.

$$R_\Omega = A(\hat{u}) = A\left(\sum_{j=1}^M a_j N_j\right) \quad (27)$$

Garantindo que a equação descrita acima possua valor nulo, ou seja, que a média pesada deste resíduo é nula, independente da função de peso utilizada, então a função aproximada que foi determinada coincide com a função exata. Dependendo das funções de peso escolhidas, diferentes métodos podem ser utilizados. O método selecionado pode ser o de *Galerkin*, onde as funções de peso W_i são as próprias funções N_m definidas na aproximação da função \hat{u} . Desta forma as matrizes geradas são simétricas, proporcionando vantagens na utilização computacional.

5.4. Método dos elementos finitos aplicado à equação do calor

Utilizar o método dos elementos finitos na equação do calor significa dividir o domínio Ω em vários subdomínios Ω_e , que serão interligados entre si por pontos denominados nós. Este método pode ser considerado como extensão do método dos resíduos pesados, no qual as funções de forma de cada nó são consideradas como resultado da associação das funções de forma dos elementos que tenham esse nó em comum.

5.5. Discretização no espaço

Para discretizar a equação de condução do calor no espaço, esta deve ser substituída por um sistema de equações diferenciais. Para isto, aplica-se o método dos resíduos pesados à equação de calor em regime transitório, no domínio Ω [41], [43].

$$\int_{\Omega} (W_i R_{\Omega}) d\Omega + \int_{\Gamma_q} (\bar{W}_i R_q) d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} (\bar{W}_i R_h) d\Gamma_h = 0, i = 1, 2 \dots \quad (28)$$

Os resíduos podem ser expressos pelas seguintes expressões:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ em } v \quad (29.a)$$

$$R_q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q}, \text{ em } q \quad (29.b)$$

$$R_h = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + h_{cr} T - h_{cr} T_{\infty}, \text{ em } h \quad (29.c)$$

Substituindo os resíduos das equações 29 na equação 28 obtemos integrais não tabeladas, sendo necessária a integração por partes. Após operações matemáticas e utilização do teorema de Green a expressão final detalhada é apresentada seguidamente.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial W_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_T} \bar{W}_i \lambda \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Omega} W_i \dot{Q} d\Omega - \int_{\Omega} W_i \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Gamma_q} W_i \bar{q} d\Gamma_q \\ & - \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} T d\Gamma_h + \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} T_{\infty} d\Gamma_h - = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Para esta equação, a solução pode ser obtida utilizando uma discretização parcial, substituída por um sistema de equações diferenciais que podem ser integradas

no tempo. Para o campo de temperaturas, uma boa aproximação no interior de cada elemento pode ser descrita por meio das equações abaixo.

$$T = \sum_{j=1}^M N_j(x, y, z) T_j(t) = NT^e \quad (31)$$

$$\dot{T} = \sum_{j=1}^M N_j(x, y, z) \dot{T}_j(t) = N\dot{T}^e \dots \quad (32)$$

De acordo com o método de *Galerkin*, selecionando as próprias funções N_j como funções de peso, e substituindo as expressões 31 e 32 na equação 30, obtemos para cada elemento o sistema de equações diferenciais da seguinte forma.

$$KT + C\dot{T} = F \quad (33)$$

Cada termo da equação acima pode ser estendido para uma equação integral. Para modelos bidimensionais, as operações na direção z devem ser nulas. Quando $1 \leq i, e j \leq m$, o sistema de equações diferenciais se estende:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} (\nabla N_i \lambda \nabla N_j) d\Omega^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} (h_{cr} N_i N_j) d\Gamma_h^e \quad (34)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} (\rho C_p N_i N_j) d\Omega^e \quad (35)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^p \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} T_\infty N_i d\Gamma_h^e \quad (36)$$

Nestas equações, E corresponde ao número total de elementos, n ao número de elementos de fronteira do tipo Γ_h e p ao número de elementos de fronteira do tipo Γ_q , $d\Gamma_q^e$ e $d\Gamma_h^e$ representam elementos de linha e $d\Omega^e$ representa um elemento de área.

Para o campo de temperaturas, uma boa aproximação no interior de cada elemento pode ser descrita por meio das equações 37 e 38.

$$T = \sum_{j=1}^M N_j(x, y) T_j(t) = NT^e \quad (37)$$

$$\hat{T} = \sum_{j=1}^M N_j(x, y) \hat{T}_j(t) = N \hat{T}^e \dots \quad (38)$$

Para elementos unidimensionais, o processo dedutivo se mantém o mesmo, diferenciando-se apenas na anulação das parcelas referentes à direção y das equações.

5.6. Discretização no tempo

Nesta etapa, a solução do sistema de equações diferenciais apresentado na equação 33 deve ser discretizada no tempo através de um método numérico. Para isso, é possível utilizar a técnica ou método das diferenças finitas, considerando que o sistema de equações apenas é satisfeito em pontos discretos (t_{n+a}) de cada intervalo de tempo (t_n, t_{n+1}) [41].

Derivando as expressões que permitem obter a distribuição de temperaturas em função do tempo, e substituindo os resultados na equação 33, obtém-se fórmulas de recorrência onde as matrizes são calculadas no instante (t_{n+a}). As fórmulas de recorrência são apresentadas de seguida.

$$\hat{K}_{n+a} T_{n+a} = \hat{F}_{n+a} \quad (39)$$

Onde:

$$\hat{K}_{n+a} = K_{n+a} + \frac{C_{n+a}}{\alpha \Delta t} \quad (40)$$

$$\hat{F}_{n+a} = F_{n+a} + \frac{C_{n+a} n}{\alpha \Delta t} T_n \quad (41)$$

É possível determinar o campo de temperatura no final do intervalo de tempo através da equação 42.

$$T_{n+1} = \frac{T_{n+a}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) T_n \quad (42)$$

O valor do parâmetro α expresso na equação 42 pode variar, resultando vários esquemas de integração no tempo. Utilizando a regra de *Crank-Nicolson* o parâmetro assume valor $\alpha=1/2$. Já para a regra de *Galerkin* $\alpha=1/2$. Outra possibilidade seria usar a

regra de *Backward Euler* onde $\alpha=1$. Os esquemas resultantes diferenciam-se pela sua estabilidade, convergência e precisão nos resultados, sendo difícil admitir qual escolha seria mais eficiente [42].

5.7. Processo iterativo para problemas não lineares

Em problemas não lineares, as propriedades térmicas do material são dependentes da temperatura e o sistema de equações representado na equação 33 pode ser descrito como [44], [41]:

$$\mathbf{K}_{(T,t)} \mathbf{T}_{(t)} + \mathbf{C}_{(T,t)} \dot{\mathbf{T}}_{(t)} = \mathbf{F}_{(T,t)} \quad (43)$$

Com o objetivo de satisfazer as condições não lineares do problema, é necessário aplicar processos iterativos em cada passo de tempo, uma vez que o sistema de equações não possui um método geral de resolução. Para este caso, o método de *Newton-Raphson* modificado geralmente é utilizado, através de um sistema de forças residuais dado pela seguinte expressão:

$$\Psi_{n+a}^i = \hat{\mathbf{F}}_{n+a}^i - \hat{\mathbf{R}}_{n+a}^i \mathbf{T}_{n+a}^{i+1} \neq 0 \quad (44)$$

A solução corrigida pode ser então calculada através das seguintes formas:

$$\Delta \mathbf{T}_{n+a}^i = [\hat{\mathbf{R}}_{n+a}^i]^{-1} \Psi_{n+a}^i \quad (45)$$

$$\mathbf{T}_{n+a}^i = \mathbf{T}_{n+a}^{i-1} + \Delta \mathbf{T}_{n+a}^i \quad (46)$$

O sistema representado na equação 45 é resolvido para cada intervalo $\Delta \mathbf{T}_{n+a}^i$, em cada iteração até se atingir a convergência. A verificação da convergência pode ser efetuada através do critério adotado representado na equação 47.

$$\frac{\|\Delta \mathbf{T}_{n+a}^i\|}{\|\mathbf{T}_{n+a}^{i+1}\|} < \text{TOL} \quad (47)$$

Onde TOL é a tolerância exigida, $\|\ \ \|$ representa a norma euclidiana, $\Delta \mathbf{T}_{n+a}^i$ representa a alteração do campo de temperaturas e \mathbf{T}_{n+a}^{i+1} é o valor de temperatura atual correspondente.

5.8. Elementos finitos

Elementos finitos são pequenas regiões que surgiram da divisão do domínio Ω das equações diferenciais que regem um problema físico. Esses elementos contem sistemas de equações algébricas aproximadas que em conjunto representam as equações diferenciais de origem.

Neste trabalho, o programa de elementos finitos utilizado é o *Ansys*. Esta ferramenta possui vários tipos de elementos finitos, diferenciando-se entre formatos e número de nós. A escolha de qual o tipo de elemento pode-se utilizar varia de acordo com a geometria do sólido, com o tipo de análise, a linearidade das propriedades envolvidas e o estado estacionário ou transiente do problema físico.

O elemento finito PLANE 77 foi selecionado para a análise térmica deste trabalho. Com 8 nós, este elemento é usado para simulações bidimensionais com um grau de liberdade de temperatura em cada nó. Este elemento é aplicável para materiais não lineares térmicos em análises transientes. A figura 13 apresenta a geometria e a organização dos nós presentes neste elemento.

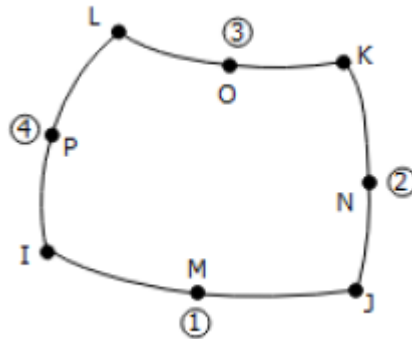


Figura 13. Nós e geometria, Plane 77. [12]

Cada nó representado na figura 13 possui uma função de forma N_i . Essas funções definem-se mediante a posição do nó relativa ao elemento selecionado. A variação das coordenadas ξ, η ($-1 \leq \xi \leq 1$ $-1 \leq \eta \leq 1$), modifica a função N_i do respectivo nó. Os nós representados são considerados isoparamétricos, ou seja, a geometria e o campo de temperatura são especificados em forma paramétrica e são interpolados com as mesmas funções. Para os nós I, J, K e L, a função é na forma:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0) - \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0) - \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 - \eta^2) \quad (31)$$

Para os nós M e O, a função assume:

$$N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0) \quad (31)$$

Por fim, para os nós P e N, a função de forma será:

$$N_i = \frac{1}{2}(1 + \xi_0)(1 - \eta^2) \quad (31)$$

Nas equações acima, ξ_i e η_i são valores de coordenadas locais e ξ , η são valores de coordenadas nos nós.

Capítulo 6

Simulação numérica em lajes de madeira

6. Simulação numérica em lajes de madeira

6.1. Introdução

As lajes de madeira são elementos estruturais com crescente uso, tanto na construção de novos ambientes e espaços, quanto na reabilitação de antigas estruturas. Este material é muito utilizado em escolas e restaurantes devido ao seu desempenho como isolante sonoro. Além de proporcionar vantagens quanto ao comportamento mecânico e térmico, elas apresentam bom aspeto visual e características arquitetónicas.

Sua construção é baseada na combinação de painéis de madeira que, sobrepostos e fixados, formam as paredes da laje. Entre as paredes inferior e superior são posicionadas vigas construídas por painéis de madeira que sustentam a estrutura. Entre as paredes e vigas são formadas cavidades ou células que conferem a estrutura uma significativa diminuição no peso, bem como boas características arquitetónicas. A figura 14 exemplifica algumas lajes de madeira.



Figura 14: Lajes de madeira. [45]

6.2. Dimensões das lajes de madeira

Neste trabalho, lajes celulares de madeira foram consideradas para as simulações numéricas. A geometria, as dimensões e a disposição dos materiais isolantes foram baseadas no estudo “*Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels*”, realizado no Instituto de Engenharia Estrutural, em Zurique (*ETH Zurich*) [35].

A superfície inferior foi a única submetida à exposição ao fogo. As dimensões para os modelos computacionais que representam a laje de madeira consideraram uma seção retangular de (2800x331) [mm] com quatro cavidades de (580x260) [mm] distribuídas horizontalmente na laje. Nestas cavidades foram representadas zonas celulares preenchidas com o ar e/ou materiais isolantes.

A superfície inferior é formada por três placas de madeira, com espessura de 9 [mm]. A superfície superior é formada por duas placas de madeira, cada uma com 22 [mm] de espessura. A sustentação da estrutura é composta por 5 vigas. As duas vigas das extremidades possuem dimensões de 60x260 [mm] enquanto as três vigas intermédias apresentam 120x260 [mm].

6.3. Estudo bidimensional da laje celular de madeira

6.3.1. Apresentação dos modelos e geometrias

Neste trabalho, considerações para um modelo bidimensional foram adotadas utilizando as dimensões já descritas. Quatro cavidades ou células foram consideradas para cada modelo da laje. As dimensões de todos os modelos considerados (laje de madeira e isolantes utilizados) são apresentadas na tabela 9.

Para as situações de fibra de vidro com massa específica de 14 [kg/m³], 20 [kg/m³] e de lã de rocha, a espessura adotada para os isolantes foi de 60 [mm]. A espessura de 145 [mm] foi considerada apenas para a fibra de vidro com 14 [kg/m³]. As diferentes combinações de situações deram origem a vários modelos, nos quais uma única superfície foi exposta à ação do fogo.

A utilização de diferentes modelos permite obter várias comparações interessantes. Neste trabalho, foi analisada a eficiência entre diferentes isolantes de mesma espessura, a influência da espessura para um mesmo isolante e a influência da densidade para isolantes de mesma composição. As figuras 15 a 20 apresentam a geometria dos modelos propostos.

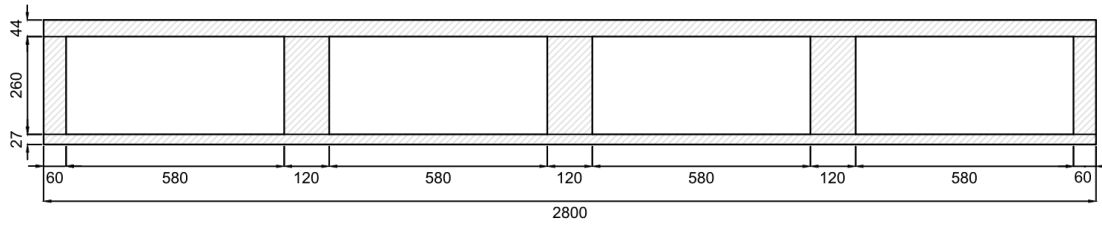


Figura 15 – Modelo S/ISO_S/AR

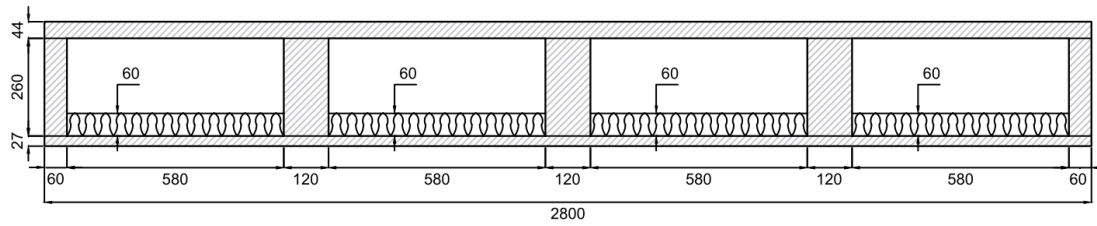


Figura 16 – Modelos FV_14_60_s/ar, FV_20_60_s/ar e LR_30_60_s/ar

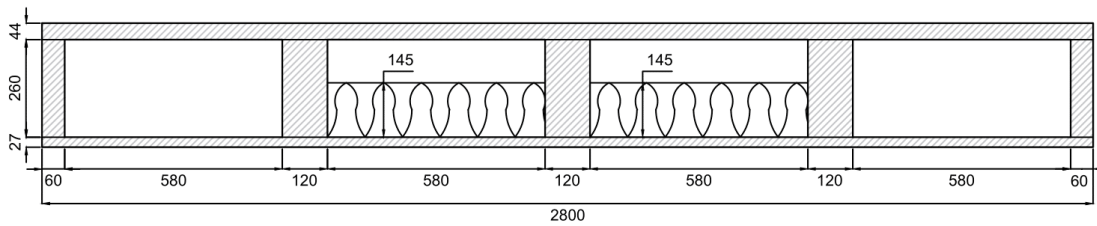


Figura 17 – Modelo FV_14_145_s/ar

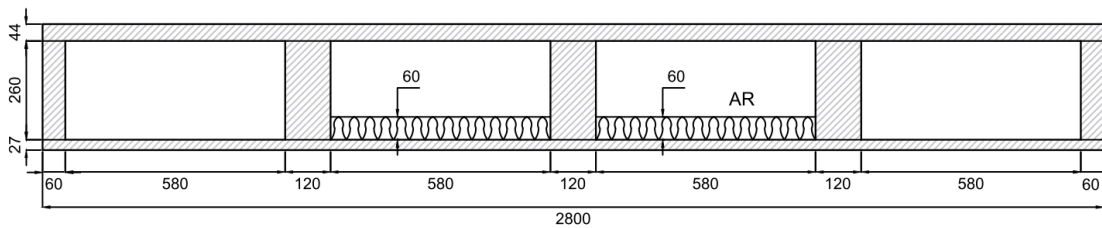


Figura 18 – Modelos FV_14_60_c/ar, FV_20_60_c/ar e LR_30_60_c/ar

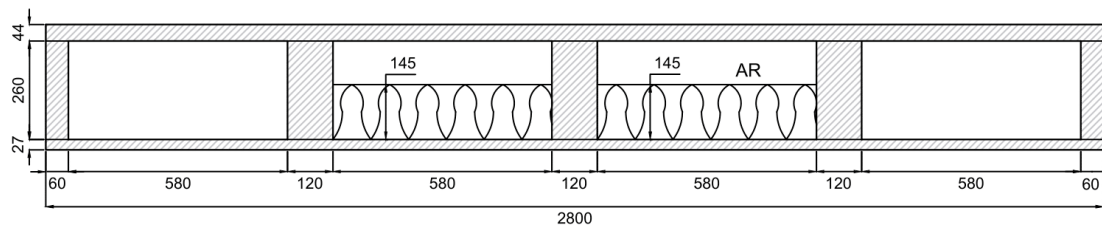


Figura 19 – Modelo FV_14_145_c/ar

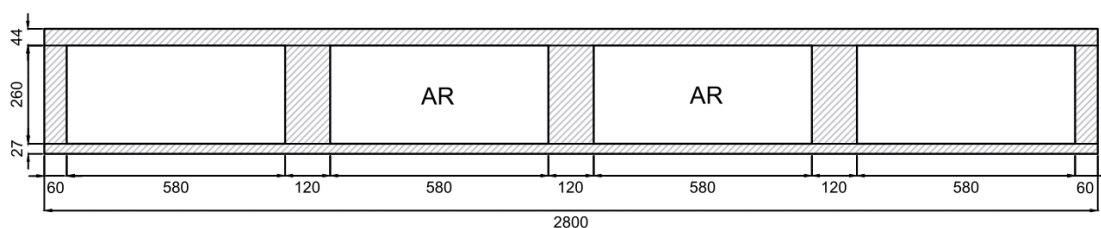


Figura 20 – Modelo S/ISO_C/AR

Os modelos propostos são apresentados na tabela 9, com as abreviações e as considerações para simulação. Apenas as abreviações são utilizadas para referenciar os modelos. Como exemplo, o modelo 10 com abreviação S/ISO_C/AR, significa S/ISO = sem isolante, C/AR = com ar. No modelo 02 FV_14_60_s/ar significa FV = fibra de vidro, 14 kg/m³, 60 [mm] de espessura, s/ar = sem considerações do ar.

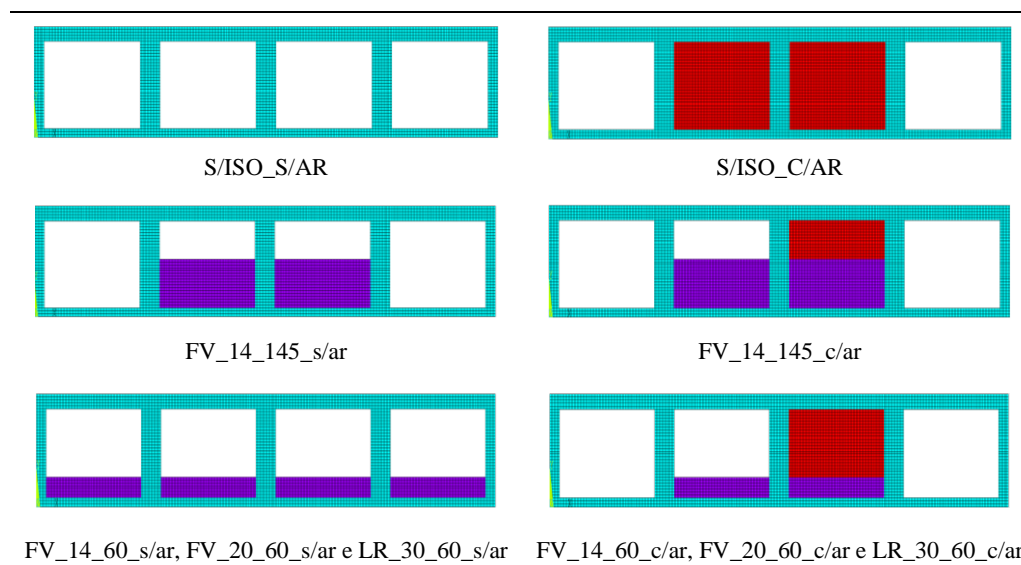
Tabela 9: Modelos considerados.

Modelo	Abreviação	Considerações
Modelo 01	S/ISO_S/AR	Validação do modelo, sem isolante, sem ar
Modelo 02	FV_14_60_s/ar	Fibra de vidro = 60 mm, $\rho = 14 \text{ kg/m}^3$, sem ar.
Modelo 03	FV_20_60_s/ar	Fibra de vidro = 60 mm, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, sem ar.
Modelo 04	FV_14_145_s/ar	Fibra de vidro = 145 mm, $\rho = 14 \text{ kg/m}^3$, sem ar.
Modelo 05	LR_30_60_s/ar	Lã de rocha = 60 mm, $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$, sem ar.
Modelo 06	FV_14_60_c/ar	Fibra de vidro = 60 mm, $\rho = 14 \text{ kg/m}^3$, com ar
Modelo 07	FV_20_60_c/ar	Fibra de vidro = 60 mm, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, com ar.
Modelo 08	FV_14_145_c/ar	Fibra de vidro = 145 mm, $\rho = 14 \text{ kg/m}^3$, com ar.
Modelo 09	LR_30_60_c/ar	Lã de rocha = 60 mm, $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$, com ar.
Modelo 10	S/ISO_C/AR	Velocidade de carbonização real sem isolante, com ar

6.3.2. Malhas de elementos finitos e condições de fronteira

O elemento utilizado para a análise térmica não linear em regime transiente foi o Plane77 com 8 nós, com malha controlada com 9 [mm] de aresta do elemento. Todas as malhas dos diferentes modelos estão representadas na tabela 10.

Tabela 10: Malhas de elementos finitos utilizadas.



Para a resolução das equações numéricas que envolvem este problema, o *Ansys* utiliza o método de *Newton-Raphson* modificado. O incremento de tempo considerado entre as iterações foi de 10 [s] com um mínimo de 0.1 [s]. A superfície exposta ao incêndio sofreu influência da curva do fogo ISO 834, durante um tempo total de 3720 [s].

Considerou-se um coeficiente convectivo de 25 [W/m²K] para a superfície exposta à troca de calor por convecção. Para os efeitos radioativos, ambas as emissividades (madeira e fogo) respeitaram a recomendação do EC5 e assumiram valores de 0,8 e 1,0 respectivamente. A temperatura ambiente considerada foi de 20 [°C].

6.4. Resultados do estudo bidimensional

O objetivo da simulação numérica é fornecer resultados para os problemas de engenharia da atualidade. Neste estudo, as malhas de elementos finitos criadas foram submetidas às condições de fronteiras especificadas. Assim sendo, resultados referentes à velocidade de carbonização, à camada carbonizada, à distribuição e evolução de temperatura ao longo da laje celular de madeira foram determinados. Esses resultados são apresentados nas sessões seguintes.

6.4.1. Velocidade de carbonização

A relação entre a espessura carbonizada e seu respectivo instante de tempo fornece a velocidade de carbonização. Essa grandeza é de fundamental importância na análise da carbonização da madeira, uma vez que ela apresenta a taxa ou quantidade de madeira (em milímetros) que está sendo carbonizada por unidade de tempo (minutos). Neste estudo, a determinação da velocidade de carbonização foi realizada com o objetivo de validação numérica para os modelos considerados em comparação com o EC5. O procedimento dividiu-se em duas etapas. Na primeira etapa calculou-se a velocidade de carbonização para o modelo S/ISO_S/AR. Foi selecionado um total de nove instantes de tempo com suas respectivas camadas carbonizadas para o modelo S/ISO_S/AR. As velocidades de carbonização foram determinadas de acordo com a equação 17 apresentada no capítulo 04. Na sequência, um valor médio entre as velocidades pontuais foi calculado. Os resultados são apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Velocidade de carbonização para S/ISO_S/AR.

<i>Step</i>	Espessura carbonizada [mm]	Tempo [min]	Velocidade de carbonização [mm/min]
106	8,85	13,68	0,646
125	12,6	16,85	0,747
175	17,6	25,18	0,698
200	22,2	29,35	0,756
250	26,2	37,68	0,695
275	29,4	41,85	0,702
325	34,1	50,18	0,679
354	37,7	55,01	0,685
396	42,3	62	0,682
Velocidade de carbonização média			0,699

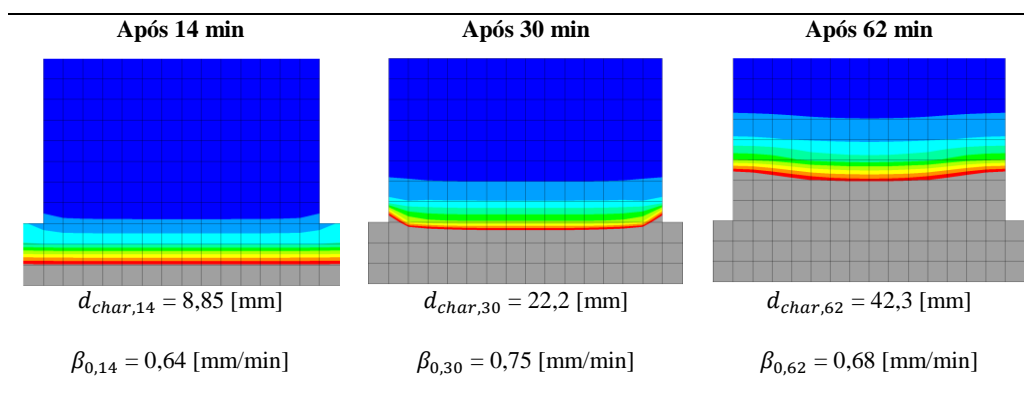
Na segunda etapa, as velocidades de carbonização foram determinadas para todos os modelos considerados. As velocidades, que variam linearmente com o tempo, foram obtidas através do mesmo procedimento utilizado, onde um determinado instante de tempo associado à sua respectiva camada carbonizada foi selecionado. A equação 17 foi novamente utilizada, sendo os resultados representados na tabela 12.

Tabela 12: Velocidade de carbonização para todos os modelos.

<i>Modelo</i>	Espessura carbonizada [mm]	Tempo [min]	Velocidade de carbonização [mm/min]
S/ISO_S/AR	8,9	13,6895	0,65
FV_14_60_s/ar	8,9	13,8005	0,645
FV_20_60_s/ar	8,9	13,9671	0,638
FV_14_145_s/ar	9,05	14,1338	0,64
LR_30_60_s/ar	9,05	14,1338	0,64
FV_14_60_c/ar	8,95	13,9671	0,641
FV_20_60_c/ar	8,9	13,9671	0,637
FV_14_145_c/ar	9	13,9671	0,644
LR_30_60_c/ar	9	13,9671	0,644
S/ISO_C/AR	8,9	13,9671	0,638
Velocidade de carbonização média			0,642

Para efeitos de visualização da metodologia utilizada, a tabela 13 apresenta alguns exemplos para o cálculo da espessura carbonizada e a velocidade de carbonização com instantes de tempo aproximados, no modelo S/ISO_S/AR.

Tabela 13: Espessura carbonizada e taxa de carbonização.



Como dito anteriormente, a velocidade de carbonização determinada pode ser comparada com outras literaturas para a validação do modelo numérico desenvolvido. Foram efetuadas comparações com o EC5, Frangi et al, e Haddad. A tabela 14 apresenta os valores comparados.

Tabela 14: Comparação da velocidade de carbonização

Modelo S/ISO_S/AR	Valor médio para todos os modelos	EC5 [29]	Frangi et al [35]	Haddad [12]
0,69	0,642	0,65	0,99	0,74

O EC5 estipula que a velocidade de carbonização para a madeira estrutural macia (*softwood*) com massa específica maior que 290 kg/m³ seja de 0,65 [mm/min]. Com base nesses valores, conclui-se que as velocidades médias de carbonização encontradas estão muito próximas da velocidade recomendada. A pequena variação encontrada em comparação aos estudos de Haddad e Frangi et al, está relacionada com a abordagem numérica e experimental. Para testes experimentais, as lajes de madeira libertam uma quantidade de calor superior àquela que está prevista para a curva ISO 834. Haddad utilizou uma curva do fogo experimental, com maiores valores de temperatura, o que conseqüentemente resultou em velocidades de carbonização maiores. Desta forma, os modelos térmicos criados para as análises deste estudo foram considerados válidos de acordo com as recomendações do EC5.

6.4.2. Distribuição de temperaturas e camada carbonizada

O estudo numérico realizado teve como um objetivo analisar a distribuição de temperaturas em lajes celulares de madeira quando submetidas a uma situação de incêndio, considerando um lado de exposição ao fogo.

Este estudo apresenta informações importantes que estão relacionadas com a degradação térmica e possíveis falhas da estrutura de madeira. Nesta sessão serão mostradas imagens referentes à distribuição de temperaturas resultante das simulações realizadas para todos os modelos considerados, com diferentes isolantes, espessuras, massas específicas e as considerações do ar.

As tabelas 15 e 16 apresentam as imagens das simulações para 1860 [s]. São mostradas duas colunas na tabela 15, que correspondem a malha de elementos finitos e a camada de madeira carbonizada. Na tabela 16 é apresentada a distribuição de temperaturas.

As tabelas 17 e 18 possuem a mesma configuração da tabela 15 e 16, com resultados no tempo final da simulação, ou seja, 3720 [s].

As cores indicam os diferentes intervalos de temperatura que cada região da malha se encontra nos tempos selecionados. Cada simulação possui uma escala específica, como é mostrado em cada modelo. As regiões de cor azul apresentam baixas temperaturas, enquanto as regiões avermelhadas apresentam as temperaturas máximas atingidas em cada simulação. As outras cores representam temperaturas intermédias.

Com base nas figuras apresentadas, alguns pontos interessantes foram observados para a análise térmica. A adição de material isolante, de modo geral, diminui o gradiente de temperatura nos modelos analisados. Para o instante de tempo de 1860 [s], a máxima temperatura atingida na superfície dos materiais isolantes foi de 300 [°C]. Com o aumento do tempo, os picos de temperatura nesta mesma região apresentaram valores próximos a 800°C, até 3720 [s]. A consideração do ar dentro das cavidades mostrou-se de grande significância para este estudo, pois altera completamente a distribuição de temperaturas dentro das cavidades.

Tabela 15: Camada carbonizada em $t = 1860$ [s].

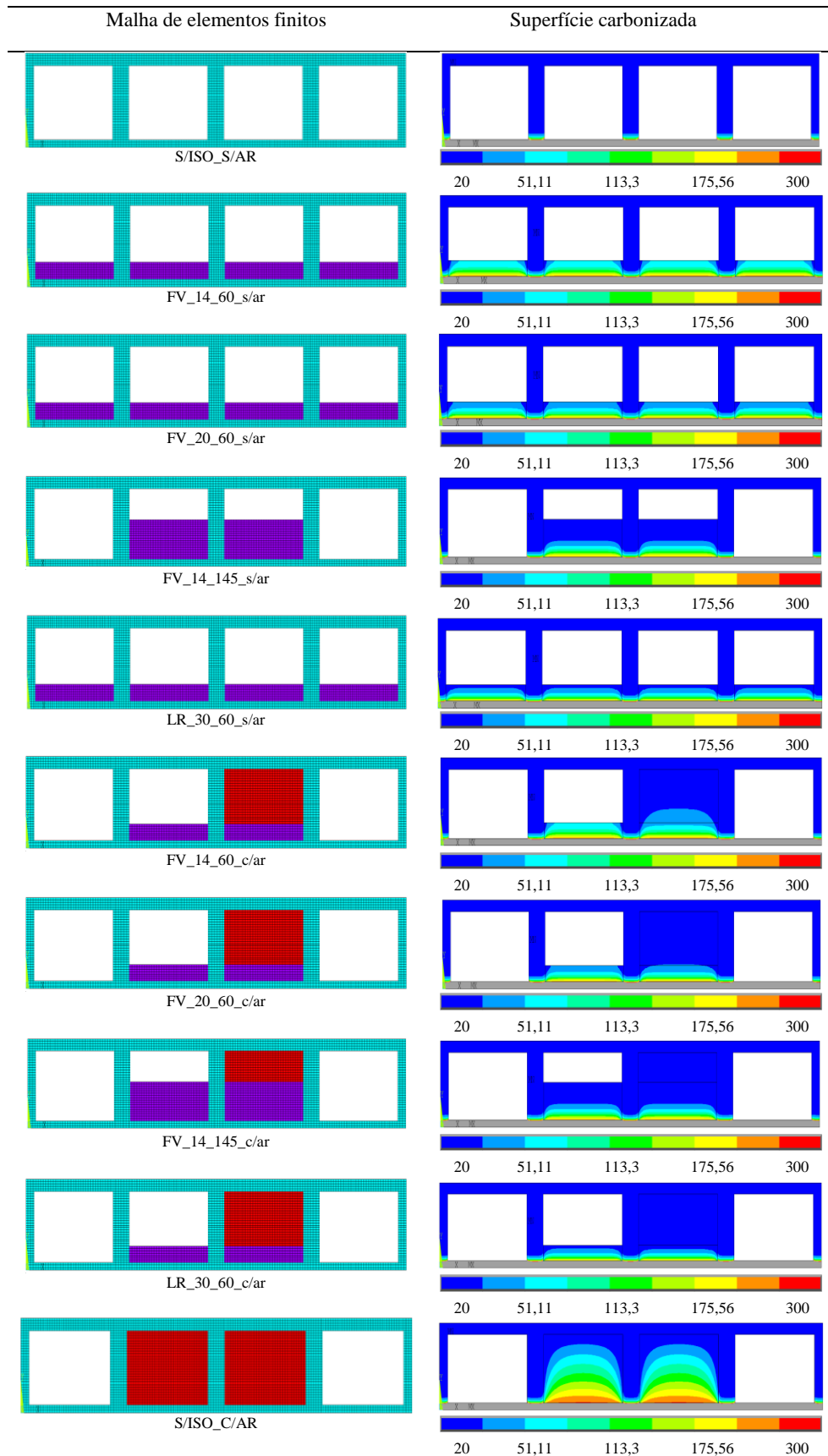


Tabela 16 - Perfil de temperaturas em $t = 1860$ [s]

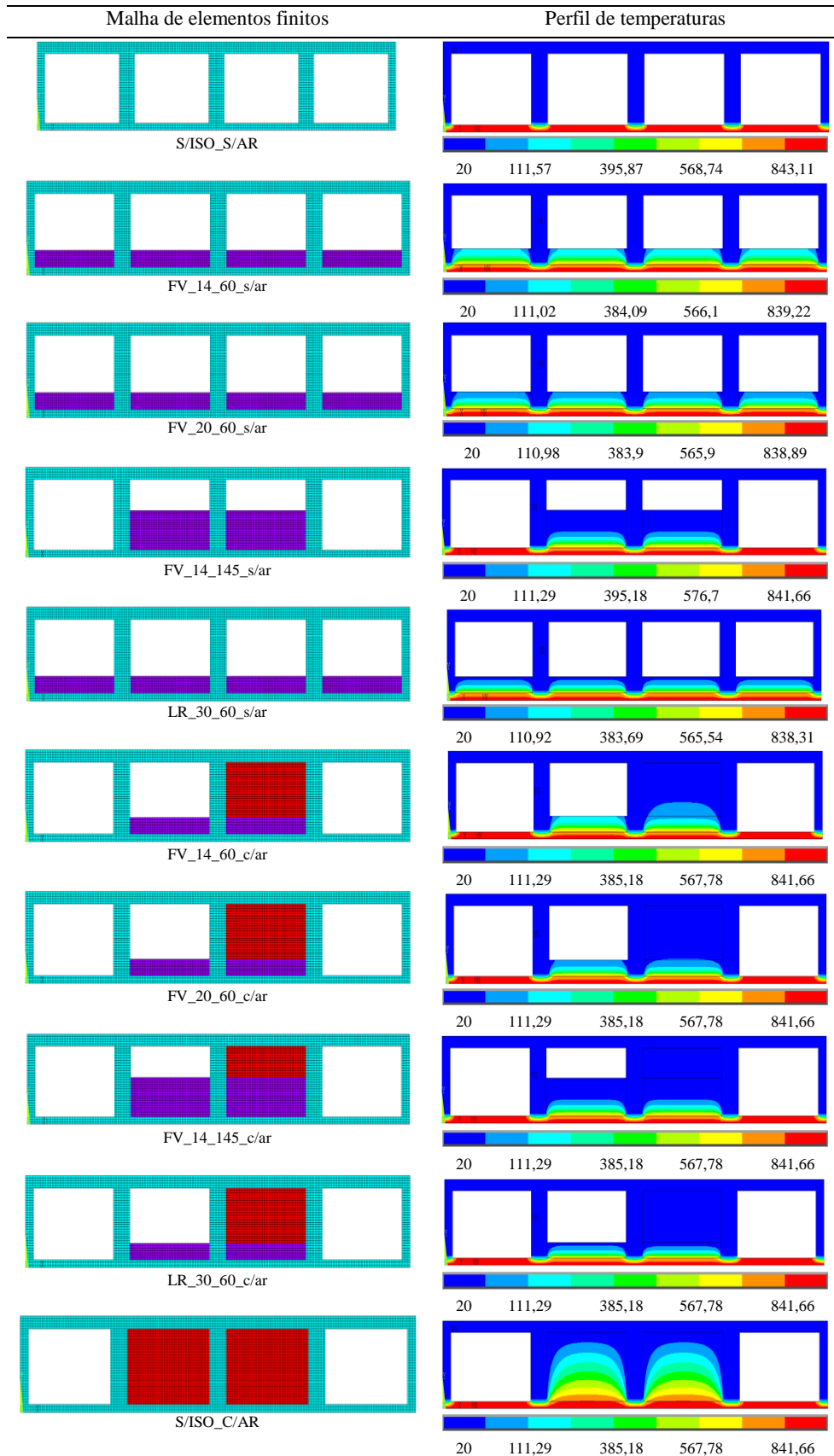


Tabela 17: Camada carbonizada em $t = 3720$ [s].

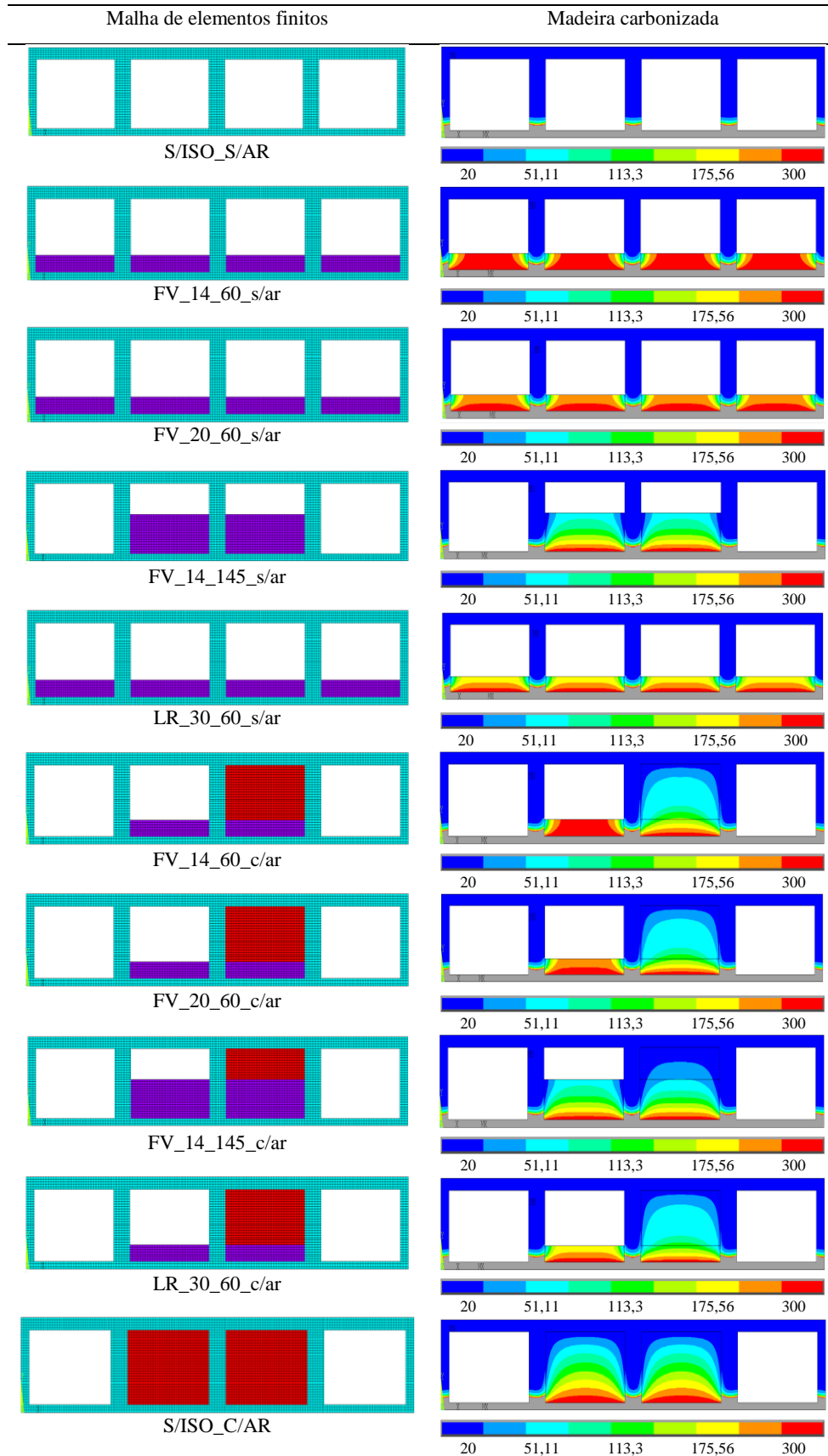
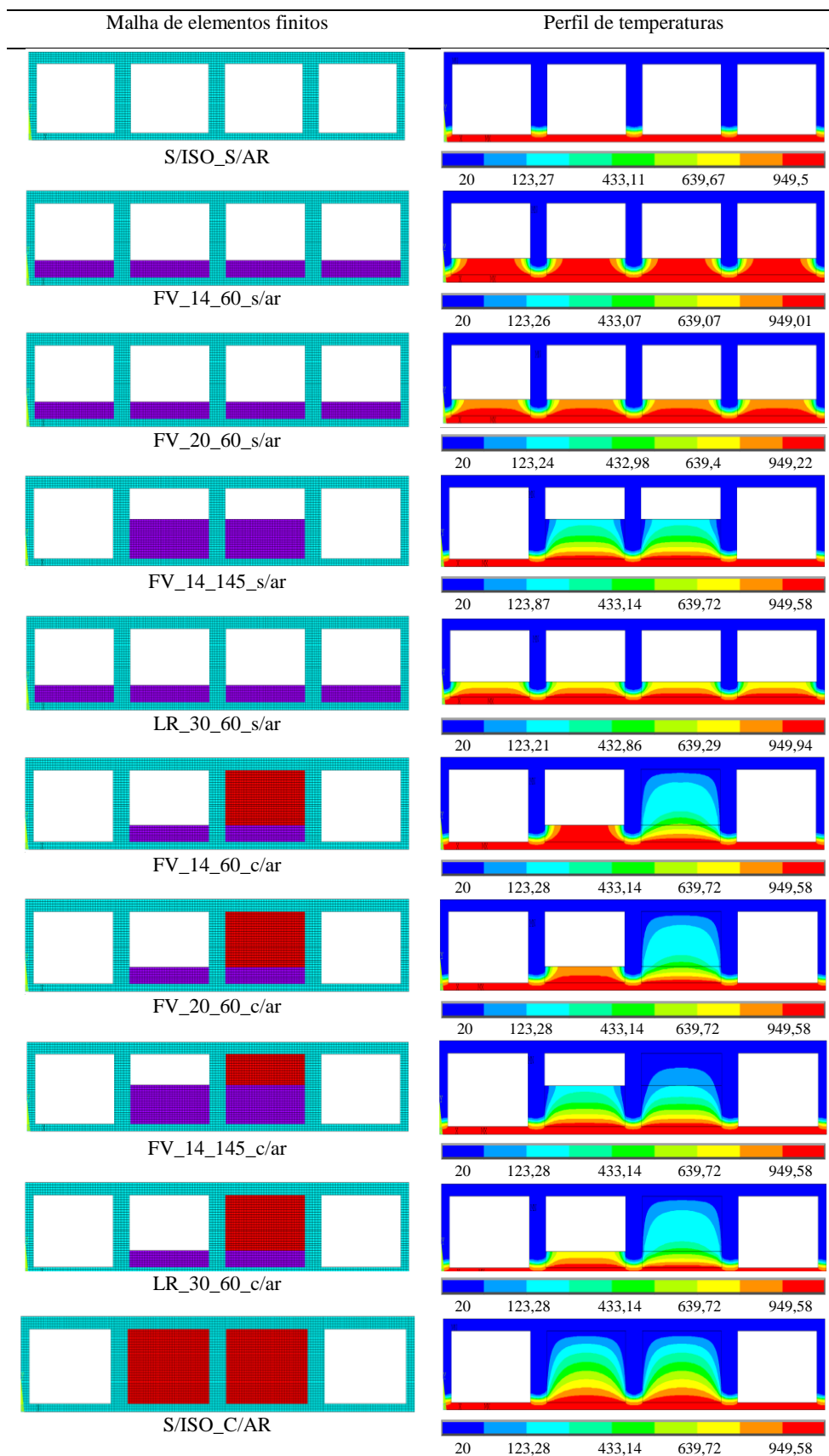


Tabela 18 - Distribuição de temperaturas em $t = 3720$ [s]



6.4.3. Desenvolvimento de temperaturas em pontos nodais

Este sub-capítulo tem por objetivo apresentar a evolução das temperaturas em pontos nodais durante o tempo total de simulação de 3720 [s]. Este estudo é de fundamental importância, pois mapeia a variação da temperatura em qualquer profundidade requerida, possibilitando visualizar sua evolução até o instante final. A partir deste tipo de análise, comparações interessantes entre isolantes de diferentes densidades e espessuras podem ser realizadas.

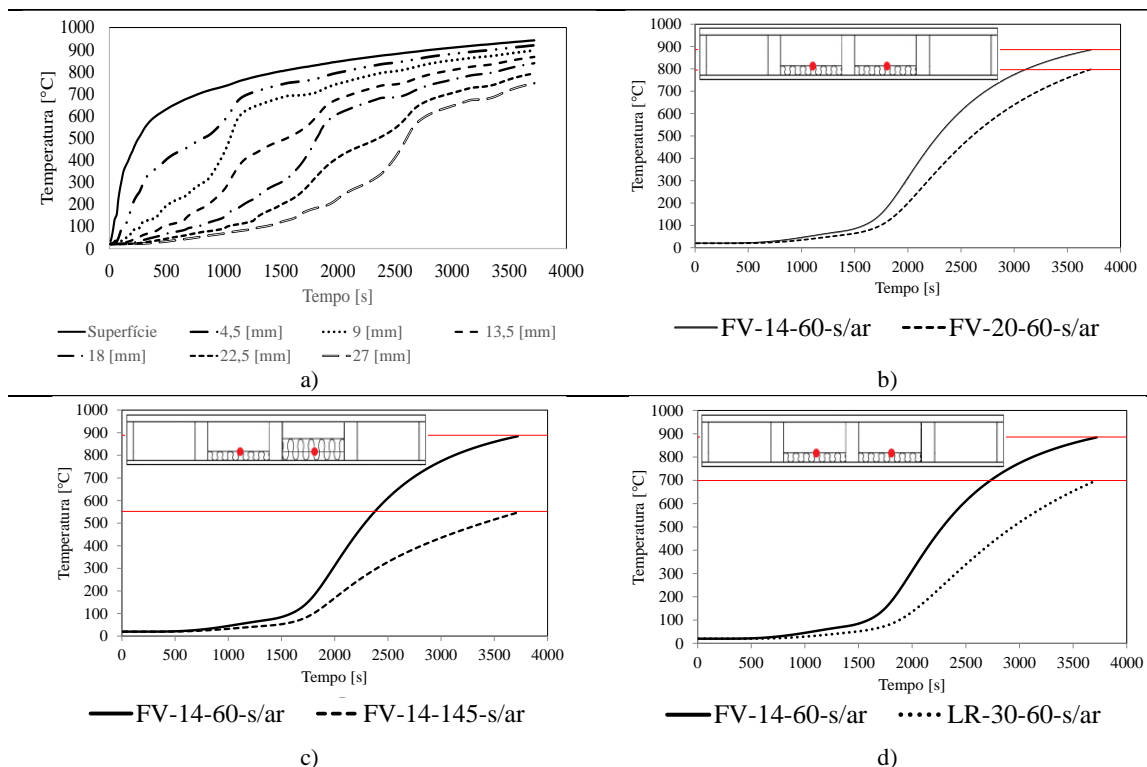
6.4.3.1. Evolução da temperatura sem a presença do ar

Na tabela 19 são apresentadas as figuras *a*, *b*, *c* e *d*, que mostram o desenvolvimento de temperaturas nos pontos nodais especificados sem a presença do ar. A partir dessas quatro imagens comparações importantes serão realizadas.

A figura *a* mostra a evolução da temperatura durante o tempo para diferentes profundidades selecionadas do modelo S/ISO_S/AR. Pode observar-se que a curva que descreve o comportamento da temperatura na superfície se assemelha à curva do fogo ISO 834 utilizada em todas as simulações, já que esta região está diretamente exposta ao incêndio. Para regiões mais profundas, quanto maior a espessura selecionada, menores são os gradientes de temperatura, sendo que as curvas alteram seu comportamento significativamente.

As figuras *b*, *c* e *d* apresentam a evolução da temperatura durante o tempo para os modelos que utilizaram materiais isolantes sem a presença do ar. Todas as análises foram efetuadas no mesmo ponto nodal, localizado na superfície do isolante, em 87 [mm] em relação à superfície exposta ao fogo.

Tabela 19: Evolução da temperatura no decorrer do tempo - modelos sem ar.



A tabela 20 mostra os modelos considerados e seus respectivos picos de temperatura para o nó selecionado. Desta forma, os resultados são mais visíveis, facilitando a comparação.

Tabela 20: Picos de temperatura - modelos sem ar.

Modelo	Pico de temperatura atingido [C]
FV-14-60-s/ar	900
FV-20-60-s/ar	800
FV-14-145-s/ar	570
LR-30-60-s/ar	700

A figura *b* apresenta o desenvolvimento das temperaturas para os modelos FV-14-60-s/ar e FV-20-60-s/ar. Podemos observar que a curva para o modelo FV-14-60-s/ar apresenta temperaturas maiores durante todo o intervalo de tempo considerado. A temperatura de 900 [°C] representa o pico de temperatura atingido, enquanto no modelo FV-20-60-s/ar esse valor foi de 800° [C].

A figura *c* apresenta valores de temperatura para os modelos FV-14-60-s/ar e FV-14-145-s/ar. Através da análise da figura, podemos observar que a fibra de vidro com 60 [mm] de espessura apresentou temperaturas significativamente maiores em comparação à fibra de vidro de 145 [mm] de espessura. As temperaturas máximas atingidas para os modelos foram aproximadamente 900 [°C] e 570 [°C], respectivamente.

A figura *d* exibe a diferença entre a distribuição de temperaturas dos modelos FV-14-60-s/ar e LR-30-60-s/ar. Analisando o gráfico e a tabela 19, pode observar-se que a lã de rocha apresenta melhor desempenho em relação à fibra de vidro de mesma espessura, uma vez que as temperaturas atingidas com a utilização deste material são significativamente menores em relação às temperaturas atingidas com o uso da fibra de vidro. No entanto, considerando todos os modelos apresentados até aqui, o melhor desempenho encontrado foi para a fibra de vidro de 145 [mm] de espessura.

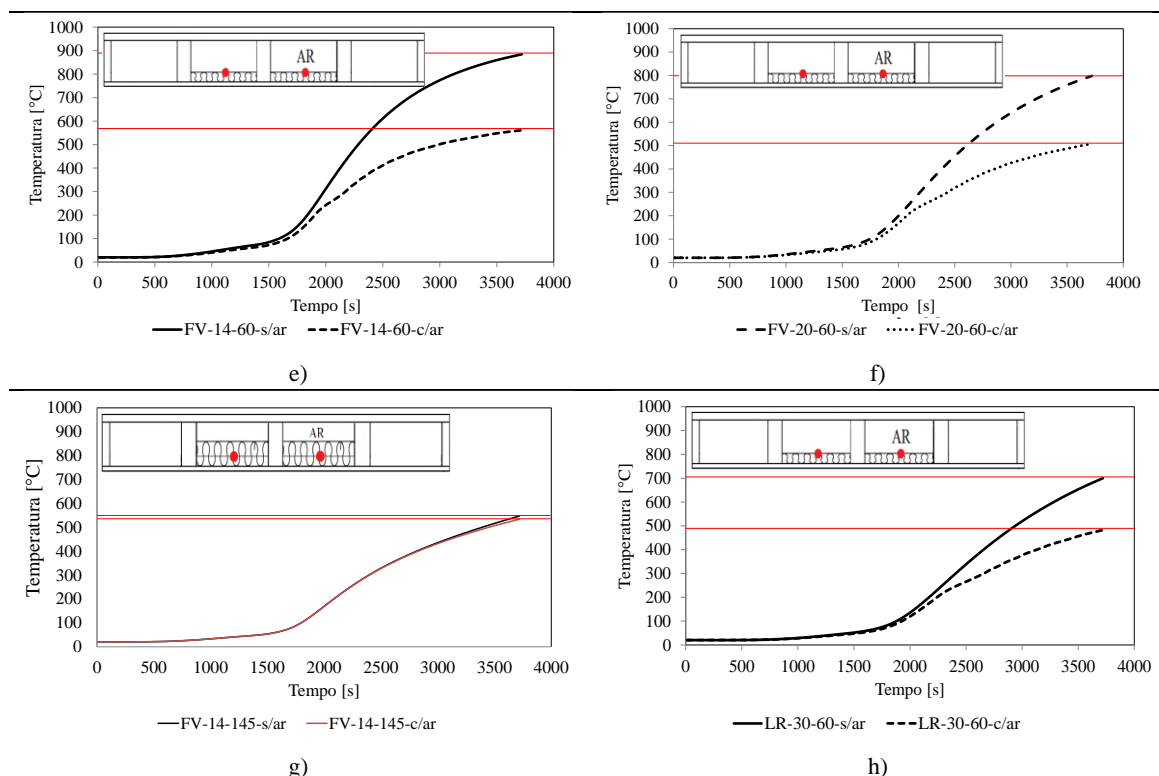
Através das análises, podemos criar relações com respeito à densidade e espessura do material isolante. Quanto maior a densidade para um mesmo material isolante, menores serão as temperaturas atingidas durante o incêndio. Assim também, quanto maior a espessura do isolante, menores são as temperaturas atingidas.

6.4.3.2. Evolução da temperatura na presença do ar

Neste capítulo serão abordados os efeitos da presença do ar no desempenho de materiais isolantes. Estes efeitos podem ser observados nas figuras *e*, *f*, *g* e *h* representadas na tabela 21. Nesta tabela, são comparados os comportamentos de todos os materiais isolantes já testados, considerando as propriedades do ar na simulação numérica.

É possível observar que, de modo geral, as temperaturas atingidas foram menores em relação à situação adiabática anteriormente simulada. A consideração do ar para as simulações é importante, pois pode apresentar modificações no desempenho de alguns tipos de materiais, além de conduzir para resultados que mais se aproximam da realidade em comparação aos modelos adiabáticos.

Tabela 21: Comparação dos modelos com efeitos do ar.



A tabela 22 sintetiza os modelos considerados nesta etapa, interligando-os com seus respectivos picos de temperatura. Como se pode observar a consideração do ar afetou significativamente os resultados numéricos, uma vez que a lã de rocha apresentou desempenho superior a todos os outros isolantes considerados. A presença do ar alterou, não somente o pico de temperaturas, mas também os comportamentos das curvas de temperatura x tempo dos pontos nodais.

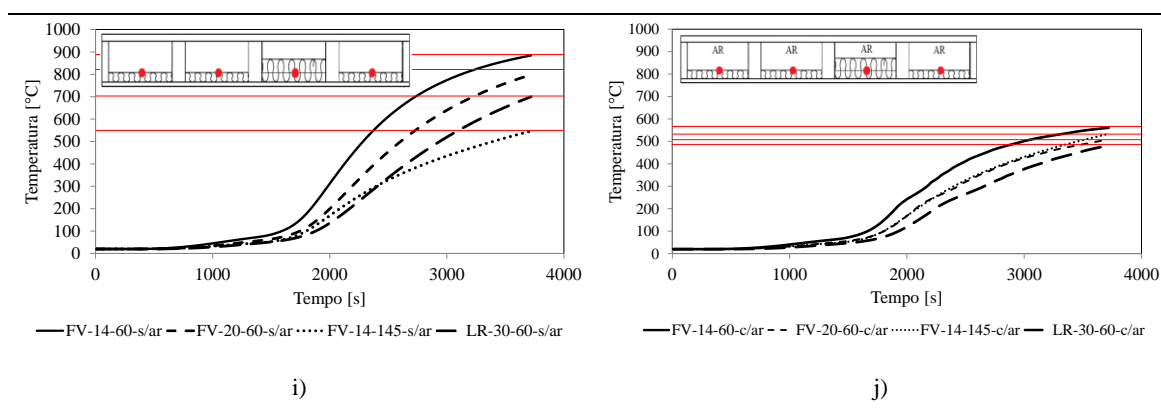
Tabela 22: Picos de Temperatura - efeitos do ar.

Modelos	Picos de temperaturas atingidos [C]	
	Sem ar	Com ar
FV-14-60	900	570
FV-20-60	800	510
FV-14-145	570	530
LR-30-60	700	490

6.4.3.3. Comparação entre todos os modelos simulados

A tabela 23 apresenta as curvas que descrevem o comportamento da temperatura dos pontos nodais durante o tempo total de simulação para todos os modelos considerados. A figura *i* exibe os quatro modelos que não consideram os efeitos do ar. É possível observar e comparar o comportamento de cada modelo durante o tempo de simulação. Análise semelhante pode ser realizada através da figura *j*, onde os mesmos materiais foram submetidos aos efeitos do ar.

Tabela 23: Evolução da temperatura para todos os modelos.



Podemos observar que até aproximadamente 2000 [s] os modelos com e sem considerações do ar não apresentam diferenças significativas quanto à evolução de temperaturas. A partir de 2000 [s] os resultados para os modelos que consideram os efeitos do ar apresentam valores significativamente menores, quando comparados aos modelos sem ar.

6.5. Estudo da carbonização secundária em lajes de madeira

Poucos são os trabalhos acadêmicos que abordam a fase secundária da carbonização em lajes de madeira. A literatura apresentada por Frangi et al baseia-se em uma análise pelo método dos elementos finitos, a fim de investigar o comportamento da madeira nesta etapa da exposição ao fogo [21].

A carbonização secundária apresenta-se após a completa degradação do material que protege as superfícies internas da cavidade, seja ele isolante ou a própria madeira. As altas temperaturas que se encontram distribuídas na superfície inferior da laje devido ao tempo decorrido, atingem diretamente as superfícies internas que formam as cavidades da laje de madeira. Desta forma, impactos severos são causados a estrutura [22]. Neste capítulo, serão analisados os impactos causados pela repentina exposição das superfícies às temperaturas elevadas, utilizando novas simulações computacionais. O estudo terá por base comparações dos resultados obtidos para os modelos anteriormente analisados.

6.5.1. Modelos para carbonização secundária

Para a análise da carbonização secundária em lajes de madeiras com cavidades, dois novos modelos foram propostos. Novas condições de fronteira são impostas a fim de caracterizar o comportamento desta nova situação. As malhas de elementos finitos e a nova situação de exposição ao fogo estão representadas nas figuras 21 e 22.

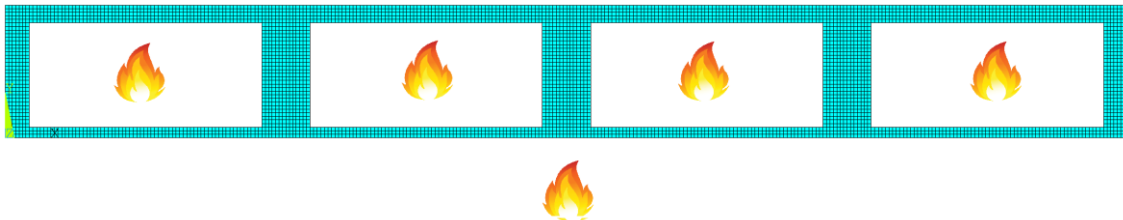


Figura 21: Malha de elementos finitos sem isolante com exposição ao fogo.

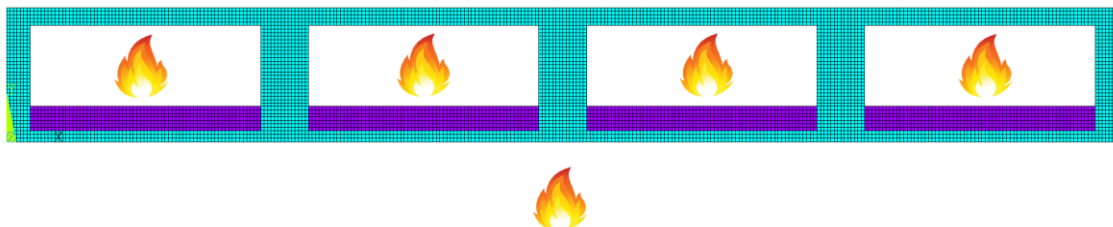


Figura 22: Malha de elementos finitos com isolante e exposição ao fogo.

As figuras 23 e 24 apresentam a geometria dos novos modelos e a tabela 24 apresenta nomenclaturas adotadas relacionando as respectivas considerações e condições de fronteira definidas para esta fase de estudo.

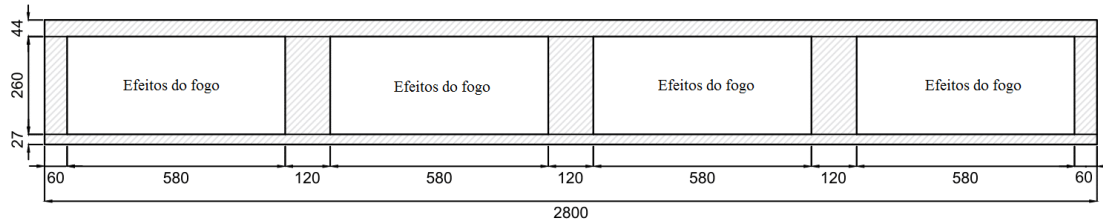


Figura 23 - Modelo CARB-SEC_S/ISO.

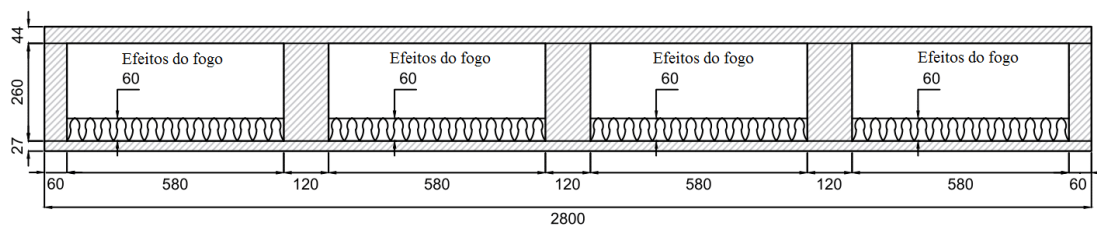


Figura 24 - Modelo CARB-SEC_C/ISO.

Tabela 24: Modelos propostos para carbonização secundária.

Modelo	Considerações
CARB-SEC_S/ISO	Ausência de isolante nas cavidades. Troca convectiva e radiativa nas três superfícies internas das cavidades. $h = 25 \text{ w/m}^2\text{K}$ Emissividade da madeira = 0,8 Emissividade do fogo = 1
CARB-SEC_C/ISO	Presença de isolante. Troca convectiva nas três superfícies internas das cavidades. Troca radiativa nas três superfícies internas das cavidades $h = 25 \text{ w/mK}$ Emissividade da madeira = 0,8 Emissividade do fogo = 1

A principal diferença entre os modelos analisados anteriormente e os novos modelos propostos é evidenciada na presença dos efeitos do fogo dentro das cavidades após a degradação da superfície inferior. A ação do fogo foi considerada dentro das cavidades e novas curvas caracterizadas são detalhadas no sub-capítulo seguinte.

6.5.2. Curvas de fogo no interior das cavidades

As elevadas temperaturas que atingem o interior das cavidades após a degradação do material isolante se justificam devido ao tempo de exposição decorrido até à degradação do material circundante. Desta forma, o comportamento do fogo imposto nas cavidades difere do comportamento imposto inicialmente na superfície exterior da laje.

A caracterização das curvas que melhor descreve o comportamento do fogo nesta nova etapa é necessária, para maior precisão nos resultados a obter. A figura 25 apresenta a curva caracterizada que descreve o comportamento do fogo dentro das cavidades para o CARB-SEC_S/ISO, onde a degradação térmica ocorrerá na superfície inferior de madeira, sem isolante.

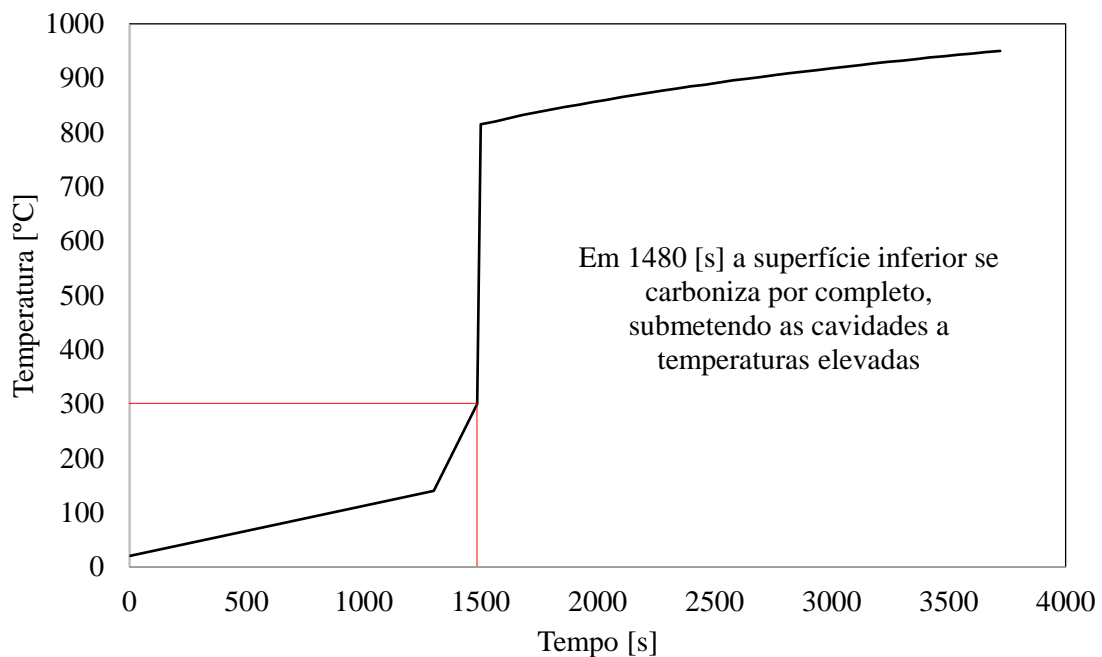


Figura 25: Curva característica para o fogo sem material isolante.

Como se pode observar, a curva permanece a temperaturas controladas até aproximadamente 1300 [s] segundos. A partir de 1480 [s] a madeira atinge 300 [°C], degradando-se e expondo as superfícies internas ao incêndio. Após esse instante, a curva caracterizada apresenta um aumento repentino nas temperaturas, até atingir o comportamento da curva do fogo ISO 834.

O comportamento da curva do fogo para lajes de madeira com material isolante também se diferencia do comportamento padrão. A figura 26 apresenta a nova curva proposta para esta análise, onde seu comportamento descreve os efeitos do fogo com relação à degradação completa da fibra de vidro (isolante considerado). Como se pode observar, nesta curva, os picos de temperatura são atingidos após 2738 [s], quando a fibra de vidro atinge sua temperatura de fusão de 700 [°C] e degrada-se, expondo as superfícies internas ao incêndio. Nesta altura, a curva atinge altas temperaturas e assume o comportamento da curva ISO 834.

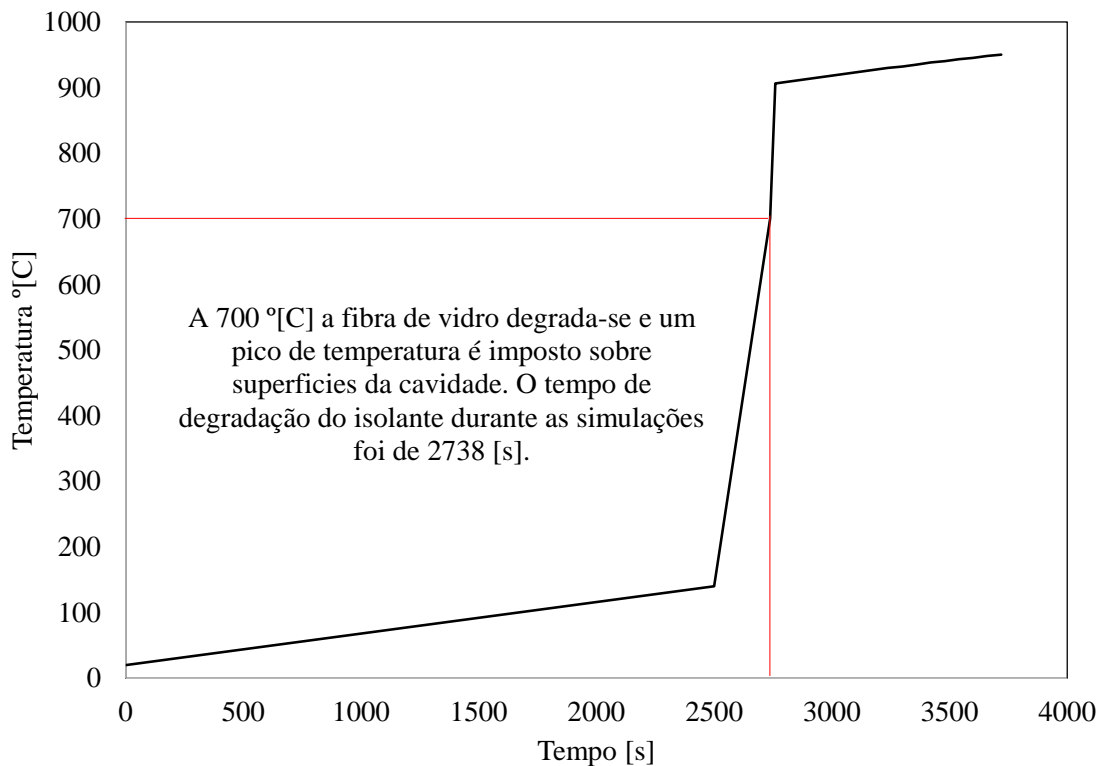


Figura 26: Curva característica para o fogo com material isolante.

6.5.3. Resultados para o pós-isolamento

Os novos modelos foram submetidos às condições de fronteira mencionadas na tabela 24 para o comportamento do fogo caracterizado pelas curvas apresentadas nas figuras 25 e 26. Desta forma, foram selecionados dados relevantes para a comparação entre os modelos. Nesta etapa, foram determinadas a velocidade de carbonização nas

vigas que formam as cavidades, a distribuição de temperaturas na laje após a degradação do material isolante e o seu desenvolvimento de temperaturas em pontos nodais.

6.5.3.1 Velocidade de carbonização nas vigas

A velocidade de carbonização é o parâmetro mais importante na análise do comportamento da madeira em uma situação de incêndio, pois ela descreve a taxa a qual a camada carbonizada cresce no decorrer do tempo. Pode ser determinada utilizando a equação 17, descrita anteriormente. Para a análise da carbonização secundária, este parâmetro foi calculado em relação às vigas. Sendo assim, as velocidades de carbonização nas vigas foram determinadas em duas diferentes regiões. Inicialmente utilizou-se o modelo CARB-SEC_S/ISO para o cálculo da velocidade de carbonização, com o objetivo de comparar os dados com o modelo S/ISO_S/AR anterior. Nesta etapa, a região central das vigas foi selecionada. De seguida, foram determinadas as velocidades de carbonização para todos os novos modelos, a fim de proporcionar a comparação com os cálculos anteriores. Nesta etapa, a região inferior das vigas foi utilizada, pois nas outras regiões não existe carbonização para os primeiros modelos (figuras 27, 28 e 29).

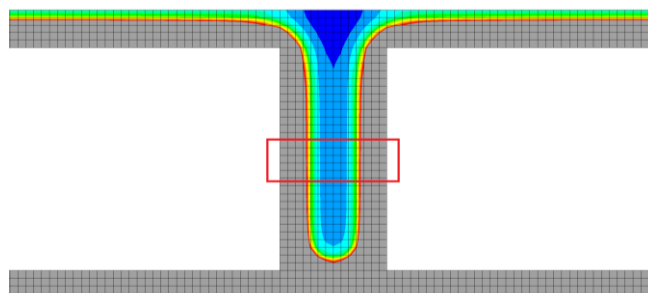


Figura 27: Região para velocidade de carbonização CARB-SEC_S/ISO.

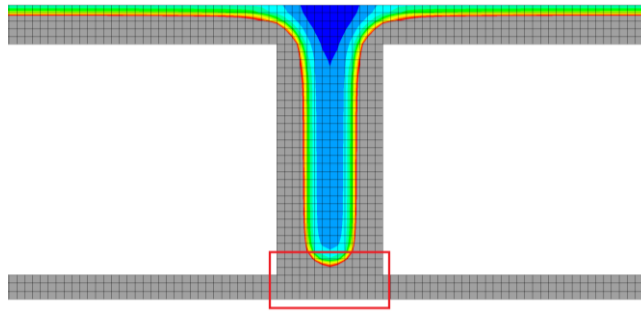


Figura 28: Região para os modelos sem isolante

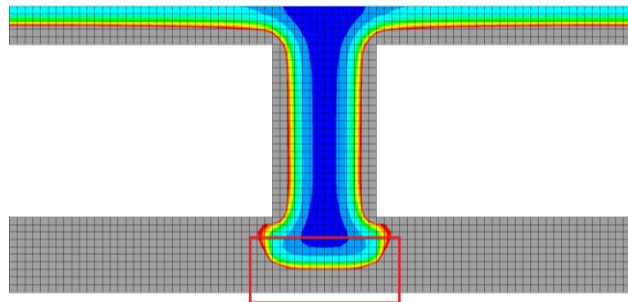


Figura 29: Região para os modelos com isolante.

A tabela 25 apresenta as espessuras carbonizadas, o tempo correspondente e a velocidade de carbonização pontual para 9 diferentes pontos do modelo CARB-SEC_S/ISO. Desta forma, um valor médio correspondente a este modelo foi calculado.

Tabela 25: Velocidade de carbonização CARB-SEC_S/ISO - Carbonização secundária

<i>Step</i>	Espessura carbonizada [mm]	Tempo [min]	Velocidade de carbonização [mm/min]
72	4,5	10,9	0,413
140	9	22,2	0,405
164	13,5	25,4	0,531
196	18	30,7	0,585
218	22,5	34,4	0,653
264	27	42,1	0,641
291	31,5	46,6	0,676
335	36	53,9	0,667
360	40,5	58,1	0,697
Velocidade de carbonização média nas vigas			0,585

Analisando os resultados da tabela 25 pode observar-se que existe boa concordância entre os valores obtidos com os estipulados pelo EC5. Apenas no início das medições, as velocidades de carbonização encontradas para 4,5 [mm] e 9 [mm] apresentaram valores significativamente baixos. Este fato se justifica, uma vez que no início da simulação, esta região ainda não sofreu os efeitos da carbonização secundária, pois a faixa inferior da madeira ainda não se degradou por completo. Sendo assim os efeitos do fogo começam a atuar somente depois de um tempo determinado.

Em seguida, foi calculada a velocidade de carbonização fixando a espessura carbonizada em aproximadamente 45 [mm] para a possível comparação dentre os modelos anteriores e os modelos de pós-degradação (figuras 20 e 21). Posteriormente, um valor médio entre os modelos foi determinado. Os resultados desta etapa são apresentados na tabela 26.

Tabela 26: Velocidade de carbonização média das células - Carbonização secundária.

Modelo	Espessura carbonizada [mm]	Tempo [min]	Velocidade de carbonização [mm/min]
S/ISO_S/AR	45	62	0,726
FV_14_60_s/ar	45	60,97	0,738
CARB-SEC_S/ISO	45	50,6	0,889
CARB-SEC_C/ISO	45	55,69	0,808
Velocidade de carbonização média nas vigas			0,79

Com base nos resultados apresentados na tabela 26, observam-se os efeitos da inclusão dos modelos que consideram efeitos do fogo dentro das cavidades, uma vez que, após a degradação do material, um aumento significativo nos valores das velocidades é apresentado. Dentro desses modelos, o efeito do material isolante mostrou ser considerável, diminuindo a velocidade de carbonização de 0,88 [mm/min] para 0,808 [mm/min].

A fim de facilitar a comparação dos valores determinados, a tabela 27 apresenta todos os valores obtidos neste trabalho para a velocidade de carbonização, e os valores relevantes encontrados na literatura.

Tabela 27: Velocidades de carbonização - Fase primária e secundária.

Modelo S/ISO_S/AR	Modelos 1ª fase	CARB-SEC_S/ISO	Modelos 2ª fase	EC5 [29]	Frangi et al.
0,69	0,642	0,58	0,79	0,65	0,99

Os valores encontrados na 2ª fase de estudo se diferem da literatura devido à consideração de uma curva adicional característica do fogo, proposta neste trabalho. Desta forma, os resultados variam razoavelmente dos obtidos anteriormente devido aos efeitos do fogo dentro das cavidades.

6.5.3.2 Distribuição de temperaturas no pós-isolamento

A distribuição foi determinada novamente para esta etapa do trabalho. A tabela 28 e 29 apresentam os resultados para os quatro modelos selecionados.

Tabela 28: Camada residual e perfil de temperaturas para 1860 [s] da pós-degradação.

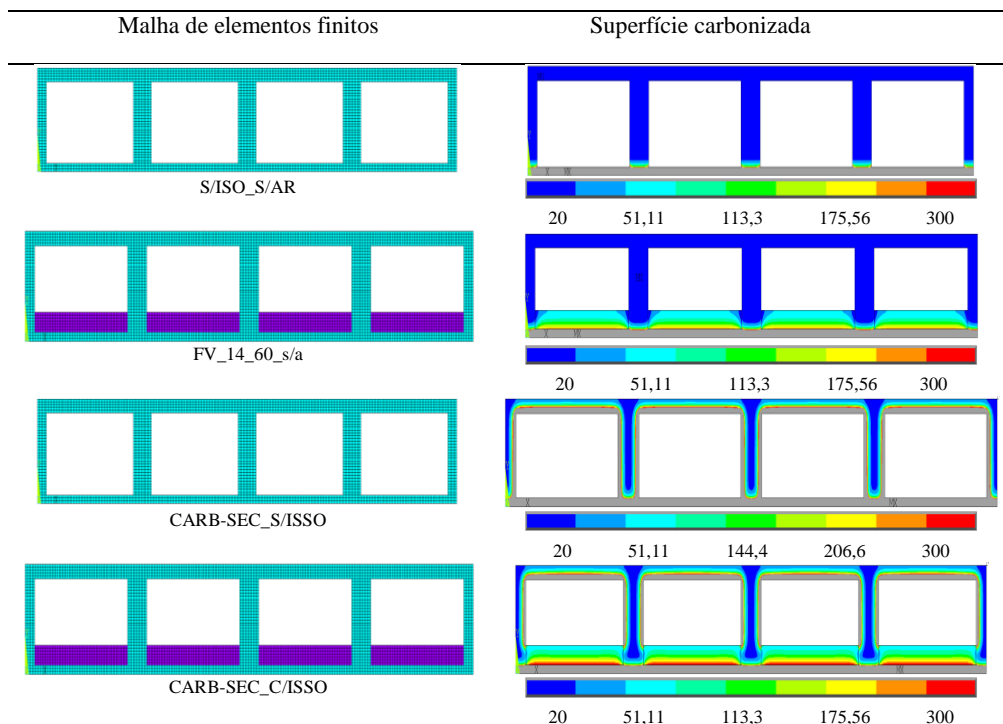
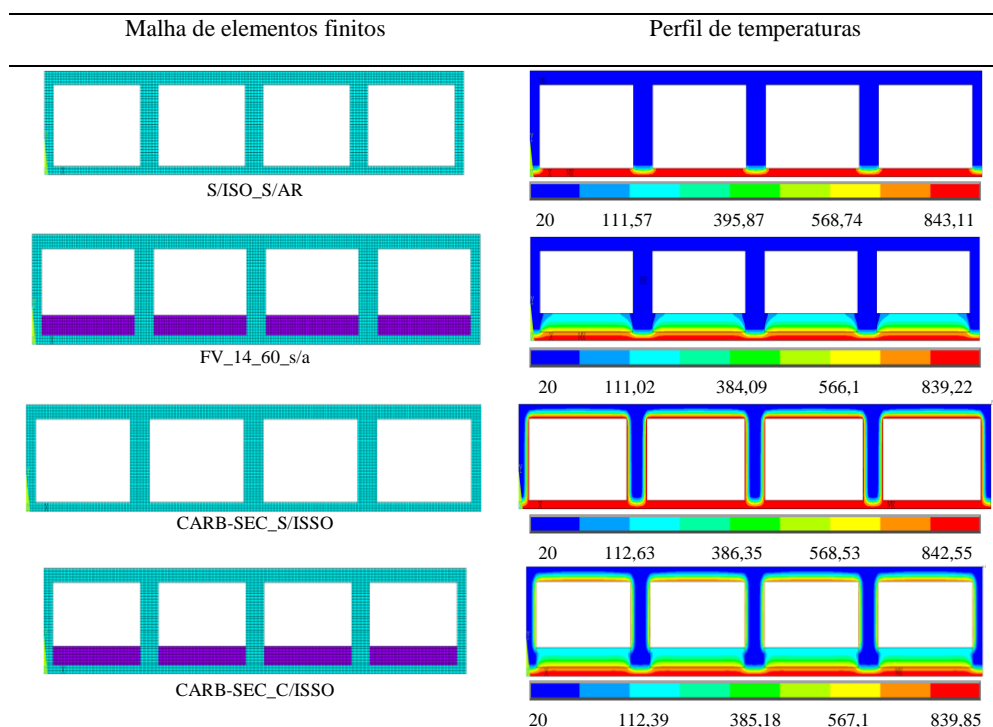


Tabela 29 - Distribuição de temperaturas pós isolamento em t = 1860 [s]



Com o tempo fixado em 1860 [s], pode observar-se que existe grande diferença entre a distribuição de temperaturas para os modelos considerados. A comparação entre os modelos sem material isolante revela que a consideração dos efeitos do fogo em cada cavidade dá início à carbonização secundária, onde uma pequena região no modelo CARB-SEC_S/ISO apresenta faixas de madeira carbonizada ao redor das cavidades. O modelo CARB-SEC_C/ISO também apresenta a mesma camada residual com menores espessuras.

A análise da distribuição de temperaturas e camadas residuais foi calculada em dois instantes de tempo, sendo 1860 [s] e 3720 [s]. A tabela 30 apresenta os resultados para t = 3720 [s]. Os modelos CARB-SEC_S/ISO e CARB-SEC_C/ISO consideraram os efeitos da carbonização secundária, que ocorre após a degradação de uma das superfícies da cavidade.

Tabela 30: Camada residual para 3720 [s] – pós degradação.

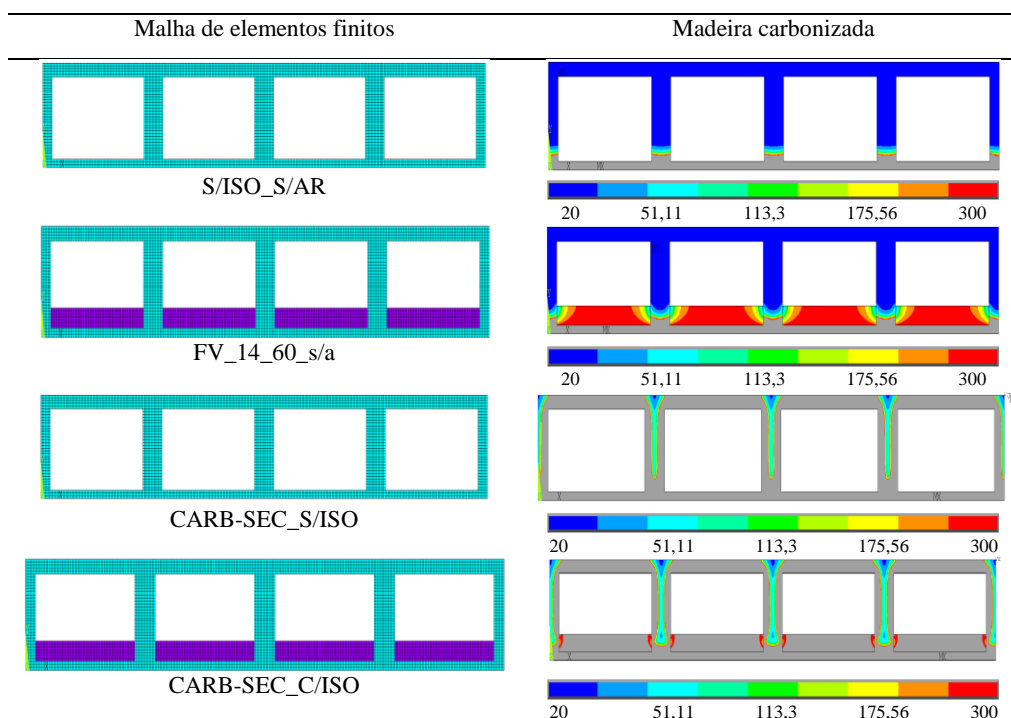
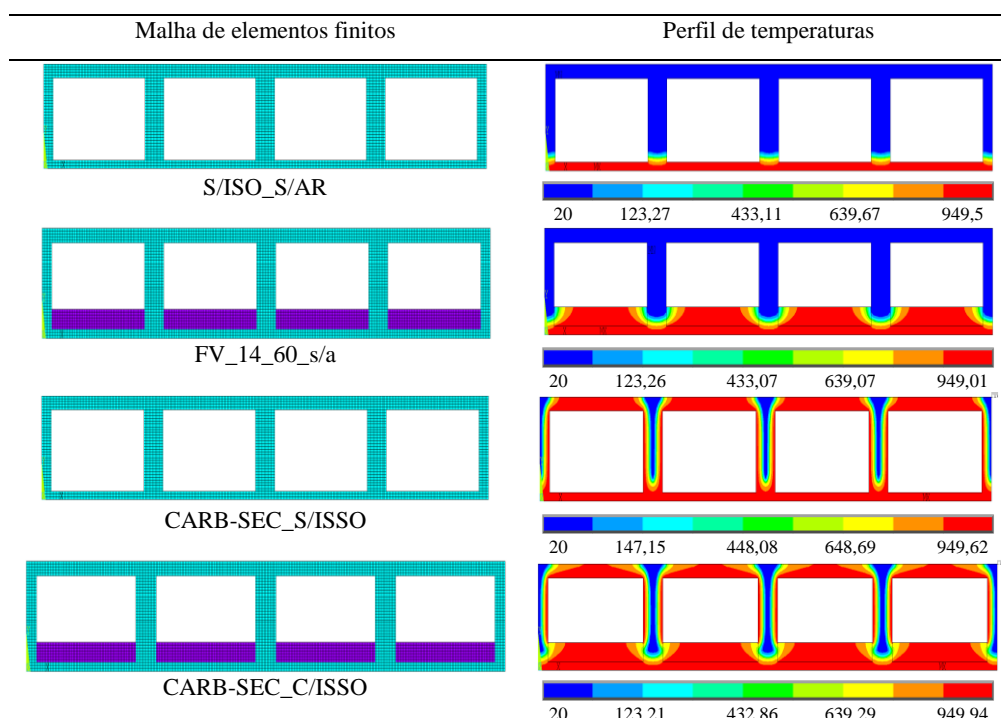


Tabela 31 - Distribuição de temperaturas na pós degradação em $t = 3720$ [s]



Analisando a tabela 30, observa-se que grande parte da estrutura de madeira atingiu a carbonização, como se pode observar nas regiões cinza de camada residual. A

partir da leitura das imagens apresentadas na tabela 31, verifica-se que os novos modelos propostos atingiram altas temperaturas ao fim da simulação, com picos de 950 [°C].

6.5.3.3 Temperaturas em pontos nodais no pós-isolamento

A evolução de temperaturas nos pontos nodais mostrou ser a ferramenta de maior precisão para determinar o desempenho entre os modelos propostos. A seleção do nó para a análise é de fundamental importância, pois influencia diretamente na análise dos resultados e conclusões. Para esta etapa, a região de interesse selecionada está representada na figura 30.

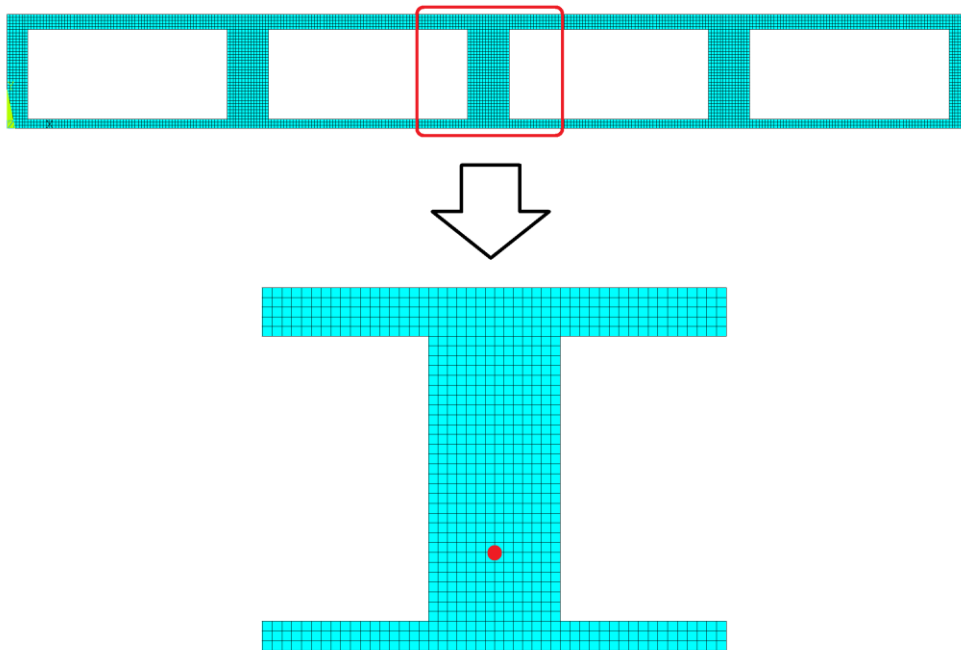


Figura 30:Ponto nodal selecionado para a análise da carbonização secundária.

A escolha desta região justifica-se uma vez que, nas outras regiões a distribuição de temperaturas não se altera de modo significativo. Nas extremidades das superfícies internas da cavidade não existe variação de temperatura nos modelos anteriores, sendo inviável a sua comparação com os modelos atuais. Na superfície inferior interna da cavidade a evolução da temperatura não se altera nos quatro modelos de análise. Desta

forma, a região central das vigas apresentada na figura 30 se mostrou de maior relevancia.

A tabela 32 apresenta a evolução da temperatura em função do tempo, para a mesma posição dos nós representados nos quatro modelos de análise. A partir das figuras apresentadas, as comparações relevantes são realizadas. A tabela 33 apresenta os picos de temperatura apresentados acima para facilitar a interpretação dos resultados.

Tabela 32: Evolução das temperaturas em pontos nodais - pós degradação.

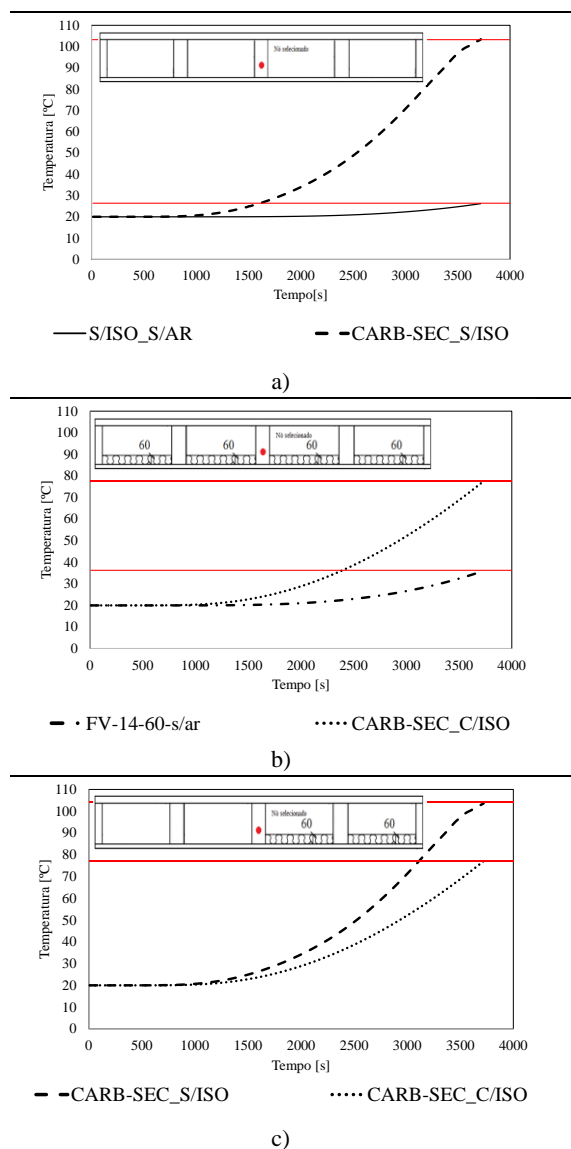


Tabela 33: Picos de temperatura - pós degradação.

Modelo	Pico de temperatura atingido [C]
S/ISO_S/AR	30
FV_14_60_s/ar	40
CARB-SEC_S/ISO	105
CARB-SEC_C/ISO	80

A figura *a* da tabela 31 apresenta a evolução da temperatura pelo tempo dos nós selecionados para posição representada. Os dois modelos considerados nessa figura foram S/ISO_S/AR e CARB-SEC_S/ISO. A temperatura dentro desses modelos permaneceu similar até 1500 [s]. Após esse intervalo de tempo, as temperaturas do modelo CARB-SEC_S/ISO começam a aumentar consideravelmente, atingindo picos maiores que 110 [°C], enquanto que, o modelo S/ISO_S/AR não atinge 30 [°C]. Através dessa imagem, é possível observar a significativa diferença ao se considerar os efeitos do fogo no interior das cavidades após a degradação da superfície inferior da madeira.

A figura *b* da tabela 31 compara a evolução da temperatura no tempo dos nós referentes aos modelos FV_14_60_s/ar e CARB-SEC_C/ISO. Picos de quase 80 [°C] são atingidos para o modelo que considera a carbonização secundária, enquanto que para o modelo FV_14_60_s/ar a temperatura máxima atingida nesta região foi de aproximadamente 40 [°C].

A figura *c* compara os modelos CARB-SEC_S/ISO e CARB-SEC_C/ISO. Essa comparação é interessante, pois analisa quais os efeitos que o material isolante impõe sobre a situação de incêndio mesmo após sua degradação completa. Pode observar-se que para as cavidades com material isolante, o maior pico de temperatura atingiu o valor máximo de 80 [°C] nesta região. Já o modelo sem material isolante atingiu valores de aproximadamente 105 [°C].

Capítulo 7

Considerações finais

7. Considerações finais

7.1. Conclusões gerais

A madeira é um material de crescente utilização na construção civil, devido às propriedades físicas e mecânicas que apresenta. Com base neste fato, muitos são os estudos numéricos e experimentais que vem se desenvolvendo.

O objetivo deste trabalho foi analisar numericamente o comportamento de lajes celulares de madeira expostas a situação de incêndio. A introdução de materiais isolantes e a avaliação de seus desempenhos foram efetuadas, assim como as considerações da existência de ar no interior das cavidades proporcionou a obtenção de resultados próximos da realidade. As simulações tiveram por base a introdução das propriedades térmicas não lineares e as condições de fronteira necessárias para a resolução das equações diferenciais que governam o problema físico. Utilizando o método dos elementos finitos no programa *Ansys*, a solução das equações diferenciais foi determinada possibilitando a análise térmica pretendida.

Com base nos resultados obtidos numericamente e no estudo das imagens da distribuição de temperaturas e gráficos da evolução de temperatura nos pontos nodais, pode concluir-se que o modelo que obteve o melhor desempenho foi o FV-14-145-s/ar (fibra de vidro, massa específica 14 [kg/m³], espessura de 145 [mm], sem considerações do ar), uma vez que apresentou os menores picos de temperatura. Como este material de isolamento possui temperatura de fusão de aproximadamente 700° [C], a sua utilização é viável. Estas conclusões foram recentemente publicadas pelo autor deste trabalho [46].

A inclusão de uma malha finita com as propriedades do ar nos modelos numéricos implica uma diminuição considerável da distribuição de temperaturas nos modelos avaliados, simulando uma situação mais próxima da realidade. Além disso, os efeitos do ar também alteram a curva do comportamento de materiais isolantes expostos ao fogo. Com a consideração do ar, o modelo que apresentou o melhor desempenho em situação de incêndio foi o LR-30-60-c/ar (lã de rocha, massa específica 30 [kg/m³], espessura de 60 [mm], com efeitos do ar). Este resultado mostra-se coerente, de acordo

com a difusividade térmica calculada para todos os materiais isolantes no capítulo 4. Os resultados da análise destas novas simulações também foram publicadas em congresso, pelo autor do trabalho [47].

No estudo da carbonização secundária, foi possível observar que para o modelo CARB-SEC_S/ISO os valores encontrados para a velocidade de carbonização nas vigas estão em conformidade com o EC5. Apenas os valores iniciais foram baixos devido à ausência da carbonização secundária. A comparação da velocidade de carbonização mostrou os efeitos adiabáticos presentes no modelo S/ISO_S/AR. Com a inclusão dos modelos que consideram efeitos do fogo dentro das cavidades após a degradação do material, observou-se um aumento significativo nos valores das velocidades de carbonização. O efeito do material isolante mostrou ser considerável, diminuindo a taxa de carbonização. Utilizando as imagens da distribuição de temperaturas e velocidade de carbonização, observou-se à iniciação da faixa carbonizada ao redor das cavidades em 1860 [s], sendo que em 3720 [s] grande parte da estrutura de madeira já estava degradada. A evolução da temperatura nos pontos nodais permitiu avaliar os picos de temperatura dentre os 4 modelos em análise nesta etapa, sendo visível o acréscimo de temperaturas para a consideração da carbonização secundária.

Por fim, a influência da massa específica, espessuras dos materiais, e considerações dos efeitos do fogo nas cavidades mostraram ser de grande importância, uma vez que algumas relações puderam ser estabelecidas entre esses fatores. Ficou evidente que para valores de massa específica maiores de um mesmo material isolante, menores serão as temperaturas atingidas durante o incêndio. Assim também, para maiores espessuras do isolante, menores serão as temperaturas encontradas. Os efeitos do ar e do fogo dentro das cavidades pode alterar significativamente os resultados da simulação numérica.

7.2. Trabalhos futuros

Este estudo permitiu retirar conclusões revelantes com relação ao comportamento de lajes celulares de madeira sob a situação de incêndio. No entanto, este tema proporciona uma infinidade de diferentes situações que podem ser analisadas.

Com o objetivo de gerar novos conhecimentos e dar continuidade à pesquisa científica, evidenciam-se algumas situações interessantes para trabalhos futuros:

- Considerações dinâmicas para o escoamento de fluídos no interior das cavidades, analisando numericamente os seus efeitos sob a madeira exposta ao fogo.
- Inserção de diferentes materiais isolantes, a fim de avaliar seu desempenho em situações de incêndio;
- Inserção de cargas mecânicas, em simultâneo com a ação do fogo, para investigação termomecânica dos modelos considerados neste trabalho;
- Utilização de diferentes geometrias de lajes, com o objetivo de avaliar a infinidade de estruturas que atualmente são utilizadas na indústria da construção.

Referências bibliográficas

- [1] Winandy J.E. (1994). Wood properties. Encyclopedia of agricultural science, 4, 549-561.
- [2] Pinto E. M., Calil C. (2004). Estudo da taxa de carbonização da madeira e sua relação com a resistência de peças estruturais. Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Mato Grosso. Brasil.
- [3] Cachim P. (2007). Construções em madeira - a madeira como material de construção. Porto: Publindustria.
- [4] RST building Information, Finland, Environmental. Reporting Building Materials, 1998-2001.
- [5] Janssens M.L. (2004). Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. Fire and materials, 28(2-4), 199-207.
- [6] Gay R.R., López V.L., Fernández M.G. (2011). Modelización por métodos numéricos de la degradación térmica de un elemento estructural de madera en situación de incendio. CIMAD - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra. Portugal
- [7] Pinto E.M., Júnior C.C. (2007). Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo. Revista Minerva, 3(2), 131-140.
- [8] Forest Products Laboratory (U.S.). (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material. Madison, Wis: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [9] König J. (1995). Die Bemessung von Holzbauten für den Brandfall nach ENV 1995-1-1. Informationsdienst Holz. Holzbauwerke nach Eurocode 5. STEP 3 Fachverlag Holz: Dusseldorf.
- [10] L. Poon, J.P. England. (2003). Literature review on the contribution of fire resistant timber construction to heat release rate. Timber Development Association, Warrington Fire Research Aust. Pty. Ltd., WFRP Project No.20633, version 2b.

- [11] Njankouo J.M., Dotreppe J.C., Franssen J.M. (2005). Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. *Construction and building materials*, 19(5), 376-386.
- [12] Haddad D. (2016). Numerical analysis of wooden slabs with perforations under fire conditions. Master Thesis, Instituto Politécnico de Bragança.
- [13] Janssens, M. L. (2004). Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and materials*, 28(2-4), 199-207.
- [14] Lie, T. T. (1977). A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4(2), 161-169.
- [15] Martin Z., Tingley D. A. (2000). Fire resistance of FRP reinforced glulam beams. In *World Conference on Timber Engineering*, Whistler Resort, British Columbia, Canada.
- [16] Thunman H., Leckner B. (2002). Thermal conductivity of wood—models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy*, 23(1), 47-54.
- [17] Hunt J. F., Gu H. (2004). Finite element analyses of two dimensional, anisotropic heat transfer in wood. In *2004 International ANSYS Conference* (pp. 1-4).
- [18] Frangi A., Fontana M. (2005). Fire performance of timber structures under natural fire conditions. *Fire Safety Science*, 8, 279-290.
- [19] Schabl S., Turk G. (2006). Coupled heat and moisture transfer in timber beams exposed to fire. In *Proceedings of the world conference on timber engineering*. Portland.
- [20] Horvat A., Sinai Y. (2008). Computational prediction of fire spread to a solid material with ANSYS CFX. In *European Built Environment CAE Conference*.
- [21] Frangi A., Erchinger C., Fontana M. (2008). Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities. *Fire Safety Journal*, 43(8), 551-564.
- [22] Frangi A., Knobloch M., Fontana M. (2009). Fire design of timber slabs made of hollow core elements. *Engineering Structures*, 31(1), 150-157.

- [23] Faustino J., Alves N., Piloto P., Ferreira D., Fonseca E., Silva E., Soares S., Pinto J. (2008). Resistencia ao fogo de blocos de betão leve a base de caroço de espiga de milho. 4ª Jornada de segurança aos incêndios urbanos. Instituto Politécnico de Bragança – IPB.
- [24] Dias L., Teixeira S., Fonseca E. (2008). Resistencia ao fogo de vigas em madeira e secções de perfis em aço. 4ª Jornada de segurança aos incêndios urbanos. Instituto Politécnico de Bragança – IPB.
- [25] Couto D. L., Fonseca E. M., Piloto P. A., Meireles J. M., Barreira L. M., Ferreira D. R. (2016). Perforated cellular wooden slabs under fire: Numerical and experimental approaches. *Journal of Building Engineering*, 8, 218-224.
- [26] Pinto E. M., Calil C. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo. *Revista Minerva*, 131-140.
- [27] EN1991-1-2. 2002. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire. Brussels, CEN, European Committee for Standardization.
- [28] Incropera F. (2008). Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ªed. Rio de Janeiro: LTC.
- [29] EN1995-1-2. 2003: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design. Brussels, CEN, European Committee for Standardization.
- [30] Barreira L. (2008). Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão.
- [31] Real P.V. (2003). Incêndio em Estruturas Metálicas. Amadora: Edições Orion
- [32] Bobkov V. P., Fokin L. R., Petrov E. E., Popov V. V., Rumiantsev V. N., Savvatimsky A. I. (2008). Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. IAEA, Vienna.
- [33] Richard E. Sonntag, Gordon John Van Wylen, Claus Borgnakke. Fundamentos da Termodinâmica. (2006). 7ed. Edgard Blücher.

- [34] Foelkel C. E. B., Brasil M. A. M., Barrichelo L. E. G. (1971). Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. IPEF, Piracicaba, 2(3), 65-74.
- [35] Frangi A., Fontana M., Knobloch M., Bochicchio G. (2008). Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. *Fire Safety Science*, 9, 1279-1290.
- [36] Ota W. N. (2004). Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional. Dissertação apresentada para o título de Pós-graduação em Engenharia na Universidade Federal do Paraná, PR.
- [37] Definição da Lã de Rocha, página utilizada, <http://www.ecocasa.pt>, página usada em 01/04/17.
- [38] Definição da Lã de Rocha, página utilizada, <http://www.rockwool.pt>, página usada em 01/04/17.
- [39] Propriedades térmicas fibras de vidro. Página: <http://www.isover.ch/de>, utilizada em 02/02/2017.
- [40] Propriedades térmicas lã de rocha. Página: <http://www.knaufinsulation.com/> utilizada em 02/02/2017.
- [41] Vila real P. M. M., (1993), Modelação por elementos finitos da solidificação e comportamento termomecânico de peças vazadas em moldações metálicas, Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em Engenharia Estrutural à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [42] Fonseca E. M. M., (2003), Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens sob a acção de Fortes Gradientes Térmicos. Dissertação para obtenção do grau de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Porto – FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [43] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., (1989), *The finite element method*, 4 ed, McGraw-Hill, U.K.
- [44] Fonseca E.M.M., (1998) Modelação numérica do comportamento termomecânico de perfis metálicos sujeitos a acção do fogo. Tese para obtenção do grau de

mestrado em engenharia mecânica, Porto FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[45] Imagens Laje de Madeira, página utilizada, <http://www.crisxavier.com.br>, página usada em 04/04/17.

[46] Costa G.N.S., Fonseca E.M.M., Junior L.J., (2017), Metodologia participativa sobre a avaliação do comportamento ao fogo de lajes em madeira como contributo na segurança, II Jornada Internacional Algarve-Brasil, Algarve, Portugal.

[47] Costa G.N.S., Fonseca E.M.M., Junior L. J., (2017), Numerical model to evaluate the protected and unprotected wooden slabs under fire, 2nd Doctoral Congress of Engineering, DCE17, Porto, Portugal.