

Dedico este trabalho aos meus pais, à Manuela e à Francisca.

Agradecimentos

O que sou, é seguramente resultado da educação transmitida pela família, do que aprendi ao longo da vida e das metas que atingi com a ajuda de todo um conjunto de pessoas que me rodeia. Sem elas, não atingiria mais esta difícil e enriquecedora etapa, por isso, quero manifestar-lhes aqui o meu mais sincero agradecimento.

Começo por dirigir uma palavra muito especial aos meus orientadores, Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto e Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca, por todo o tempo disponibilizado, ajuda, encorajamento e compreensão que tiveram para comigo ao longo deste trabalho, tendo sempre solução imediata para todas as minhas questões.

À minha família por todo o tempo que não lhe dediquei, ajuda, motivação, dedicação e carinho que me deram e continuam a dar incondicionalmente.

Aos colegas de trabalho, André Seca e Luísa Barreira por todo o apoio e ajuda, desde o primeiro momento.

À empresa Jular por todo apoio prestado na realização deste trabalho.

A todos aqueles que de uma forma ou de outra, contribuíram para este trabalho.

Comportamento ao fogo de lajes celulares em madeira com perfurações

Por:

Jorge Manuel Meireles

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

Ramo Engenharia Mecânica

Realização sobre a supervisão de:

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Resumo

As lajes celulares em madeira são elementos estruturais com aplicação crescente, em particular na reabilitação de estruturas, na requalificação de interiores e na construção de novas estruturas. As excelentes propriedades mecânicas, associadas às propriedades térmicas e acústicas fazem deste elemento estrutural uma solução ideal para pavimentos e coberturas. Mas quando submetida a uma ação accidental (fogo), carboniza, diminuindo a sua secção resistente, interferindo na estabilidade de estrutura.

Neste trabalho é apresentado um método experimental para determinação do perfil de temperaturas, camada carbonizada e velocidade de carbonização em lajes celulares com perfurações, construídas em madeira de ABETO SPRUCE, sujeitas a situações de incêndio normalizado. Apresenta-se também um método de simulação numérica em regime transiente não linear para realização dos mesmos parâmetros, e posterior comparação dos resultados obtidos.

Palavras-chave: lajes celulares; madeira; perfurações; fogo; carbonização.

Fire behaviour of cellular wood slabs with perforations

By:

Jorge Manuel Meireles

Thesis submitted to fulfill the requirements of Ms.C degree in:

Industrial Engineering

Branch Mechanical Engineering

Supervised by:

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Abstract

The cellular wood slabs are structural elements with increasing application, particularly in the rehabilitation of structures, rehabilitation of interior and new building structures construction. The excellent mechanical properties, associated with thermal and acoustic properties make this structural element an ideal solution for floors and roofs. But when subjected to an accidental action (fire), chars, decreasing its tough section, interfering with the stability of structure.

This work presents an experimental method to determine the temperature profile, charred layer and charring rate in cellular slabs with perforations, built in wood ABETO SPRUCE, subjected to standard fire conditions.

Also a numerical method for nonlinear transient and thermal analysis will be used to achieve the same parameters, and subsequent comparison of results.

Keywords: cellular slabs; wood; perforations; fire; charring

Índice

1	Introdução.....	2
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Apresentação sumária dos capítulos.....	3
2	Ação do Fogo.....	6
2.1	Transferência de calor	6
2.1.1	Condução.....	6
2.1.2	Convecção	8
2.1.3	Radiação	9
2.2	Incêndio natural	10
2.2.1	Curvas normalizadas de incêndio.....	11
2.2.2	Curva de incêndio padrão ISO 834	11
2.2.3	Curva de incêndio para elementos exteriores.....	11
2.2.4	Curva de incêndio de hidrocarbonetos	12
2.2.5	Curva de incêndio ASTM	12
2.3	Comportamento térmico da madeira	13
2.3.1	Pirólise.....	14
2.3.2	Ignição.....	15
2.3.3	Carbonização da madeira	15
2.3.4	Camada de carbonização efetiva	17
2.4	Propriedades térmicas da madeira	18
2.4.1	Condutividade térmica	18
2.4.2	Calor específico.....	19
2.4.3	Massa específica.....	20
3	Lajes celulares com perfurações	23
3.1	Critérios de desempenho	23
3.1.1	Capacidade de carga.....	24
3.1.2	Isolamento	24

3.1.3	Estanquidade	24
3.2	Condicionantes para a conceção da laje	25
3.3	Caracterização da laje	26
3.3.1	Caraterização das madeiras usadas na construção da laje.....	27
3.3.2	Vigas Kerto S	28
3.3.3	Painéis tricapa	28
3.4	Construção das lajes	29
3.4.1	Laje de teste.....	29
3.4.2	Lajes para os ensaios normalizados	30
4	Ensaaios experimentais de resistência ao fogo.	33
4.1	Instrumentação com termopares tipo K.....	34
4.2	Instrumentação com termopares de placa.....	35
4.3	Instrumentação com termopares de superfície, face não exposta.....	35
4.4	Aquisição de dados	37
4.5	Sistema de ensaio.....	37
4.6	Resultados experimentais	38
4.6.1	Comportamento térmico da laje 1	39
4.6.2	Velocidade de carbonização da laje 1	45
4.6.3	Comportamento térmico da Laje 2.....	50
4.6.4	Velocidade de carbonização, laje 2	56
5	Simulação numérica	62
5.1	Malha de elementos finitos.....	63
5.2	Condições de ensaio	63
5.3	Comportamento térmico da laje 1	65
5.4	Velocidade de carbonização da laje 1.....	69
5.5	Comportamento térmico da laje 2	73
5.6	Velocidade de carbonização da laje 2.....	77
6	Comparação dos resultados.....	82
6.1	Comportamento térmico da laje 1	82
6.2	Comportamento térmico da laje 2	84
6.3	Velocidade de carbonização	87
7	Conclusões.....	89

7.1	Perspetivas de trabalhos futuros	90
8	Bibliografia	91
9	Anexos	94
9.1	A 1- desenho de definição da laje.....	94
9.2	A 2- Parafusos e conetores metálicos	95
9.3	A 3- Localização e identificação dos termopares	96

Índice de Figuras

Figura 1: Condução, Convecção e Radiação, (Barreira 2008).....	6
Figura 2: Condução de calor através de um fluido ou sólido estacionário.	7
Figura 3: Transferência por convecção, de uma superfície quente para um fluido frio.....	8
Figura 4: Fases de um incêndio natural, (Real 2003).....	10
Figura 5: Curvas de incêndio normalizadas.	12
Figura 6: Zonas de degradação física numa secção de madeira, (Janssens 2004).	13
Figura 7: Libertação de vapores e gases.....	14
Figura 8: Identificação do tempo de ignição.	15
Figura 9: Arredondamento numa secção retangular exposta ao fogo, (Barreira 2008).	17
Figura 10: Secção transversal residual e secção transversal efetiva, (EN1995-1-2 2004).....	17
Figura 11: Condutividade térmica em função da temperatura.	19
Figura 12: Calor específico em função da temperatura.....	20
Figura 13: Massa específica da madeira em função da temperatura.....	21
Figura 14: Modelos de lajes celulares em madeira.	23
Figura 15: Soluções construtivas de lajes celulares.	23
Figura 16: Aplicação de carga (Association 2006).	25
Figura 17: Violação do critério de isolamento.	25
Figura 18: Verificação do critério de estanquidade.	25
Figura 19: Forno de alta resistência.	25
Figura 20: Forno, bastidor e laje.	25
Figura 21: Identificação das células.	26
Figura 22: Perspetiva do modelo de laje em estudo.....	27
Figura 23: Pormenor construtivo, vigas Kerto S de 37 e 39 [mm].	28
Figura 24: Pormenor construtivo.....	29
Figura 25: Laje de teste.	30
Figura 26: Placa de teto.	30
Figura 27: Maquinagem das perfurações.	31
Figura 28: Etapas de montagem e resultado final, Lajes 1 e 2.....	31
Figura 29: Localização dos termopares.....	33
Figura 30: Fio termopar tipo K.	34
Figura 31: Instalação, termopar tipo K.....	34

Figura 32: Termopar de placa.	35
Figura 33: Termopares de superfície, construção e aspeto final.	35
Figura 34: Localização dos termopares de superfície.	36
Figura 35: Diferentes fases da instrumentação, lajes 1 e 2.	36
Figura 36: Forno de resistência ao fogo e laje em posição de teste.	37
Figura 37: Ensaio da laje 1.	38
Figura 38: Ensaio da laje 2.	39
Figura 39: Temperatura prevista e real no interior do forno e real das células 1, 2 e 3.	40
Figura 40: Temperaturas nos conetores.	41
Figura 41: Temperaturas na face não exposta.	41
Figura 42: Aquisição do conjunto de temperaturas por termografia IR.	42
Figura 43: Temperaturas registadas através da captura termográfica.	43
Figura 44: Comparação das temperaturas, captura termográfica e face não exposta.	43
Figura 45: Temperaturas da Célula 1.	44
Figura 46: Temperaturas da Célula 2.	44
Figura 47: Temperaturas da Célula 3.	45
Figura 48: Temperaturas das vigas.	45
Figura 49: Localização dos cortes e pontos de medição, laje 1.	46
Figura 50: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.	47
Figura 51: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.	47
Figura 52: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.	48
Figura 53: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.	48
Figura 54: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.	49
Figura 55: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.	49
Figura 56: Velocidades de carbonização, laje 1.	50
Figura 57: Temperaturas das células, ISO 834 e interior do forno.	51
Figura 58: Temperaturas nos conetores.	51
Figura 59: Temperaturas na face não exposta.	52
Figura 60: Aquisição do conjunto de temperaturas por termografia IR.	53
Figura 61: Temperaturas registadas através da captura termográfica.	53
Figura 62: Comparação das temperaturas, captura termográfica e face não exposta.	54
Figura 63: Temperaturas da Célula 1.	54
Figura 64: Temperaturas da Célula 2.	55
Figura 65: Temperaturas da Célula 3.	55

Figura 66: Temperaturas das vigas.....	56
Figura 67: Localização dos cortes e pontos de medição, laje 2.	56
Figura 68: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.	57
Figura 69: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.	57
Figura 70: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.....	58
Figura 71: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.....	58
Figura 72: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.	59
Figura 73: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.	59
Figura 74: Velocidades de carbonização, laje 2.	60
Figura 75: Modelo tridimensional para as lajes 1 e 2.	62
Figura 76: Malha de elementos finitos, elementos sólidos de 8 nós.....	63
Figura 77: Secção residual (tempo=600 [s]), estudo preliminar.	64
Figura 78: Condições fronteira do modelo das lajes 1 e 2.	64
Figura 79: Curvas de temperatura utilizadas nas análises numéricas das lajes 1 e 2.....	65
Figura 80: Laje 1; Esquerda - Temperaturas máximas, Direita - espessura carbonizada.	65
Figura 81: Temperaturas na face não exposta.	66
Figura 82: Temperaturas Ansys e captura termográfica.	66
Figura 83: Temperaturas registadas na célula 1.	67
Figura 84: Temperaturas registadas na célula 3.	67
Figura 85: Temperaturas registadas na célula 2.	68
Figura 86: Temperaturas registadas nas vigas.....	68
Figura 87: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.	69
Figura 88: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.	70
Figura 89: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.....	70
Figura 90: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.....	71
Figura 91: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.	71
Figura 92: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.	72
Figura 93: Velocidade de carbonização, laje 1, resultados numéricos.....	73
Figura 94: Laje 2; Esquerda - Temperaturas máximas, Direita - espessura carbonizada.	73
Figura 95: Temperaturas na face não exposta.	74
Figura 96: Temperaturas IR Ansys e IR THERMO (câmara termográfica).	74
Figura 97: Temperaturas registadas na célula 1.	75
Figura 98: Temperaturas registadas na célula 3.	75
Figura 99: Temperaturas registadas na célula 2.	76

Figura 100: Temperaturas registadas nas vigas.....	76
Figura 101: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.	77
Figura 102: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.	78
Figura 103: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.....	78
Figura 104: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.....	79
Figura 105: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.	79
Figura 106: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.	80
Figura 107: Velocidade de carbonização, laje 2, resultados numéricos.....	80
Figura 108: Face não exposta, comparação das temperaturas obtidas.	82
Figura 109: Vigas, comparação das temperaturas obtidas.	83
Figura 110: Célula 1, comparação das temperaturas obtidas.	83
Figura 111: Célula 2, comparação das temperaturas obtidas.	84
Figura 112: Célula 3, comparação das temperaturas obtidas.	84
Figura 113: Face não exposta, comparação das temperaturas obtidas.	85
Figura 114: Vigas, comparação das temperaturas obtidas.	85
Figura 115: Célula 1, comparação das temperaturas obtidas.	86
Figura 116: Célula 2, comparação das temperaturas obtidas.	86
Figura 117: Célula 3, comparação das temperaturas obtidas.	87

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos na indústria da construção. É um material combustível e, quando aquecida, produz gases combustíveis que, expostos ao calor produzem chama. Os gases quentes e as chamas, por sua vez, aquecem a secção de madeira ainda não atingida pela chama e promovem a libertação de mais gases inflamáveis, gerando um processo em cadeia que alimenta a combustão. Porém quando se expõe ao fogo uma secção de madeira, esta forma uma camada superficial de carvão que atua como isolamento, impedindo a rápida propagação do calor para o interior da secção e a rápida saída dos gases inflamáveis (F. M. Andrea 2009). Assim, a sua degradação realiza-se de uma forma mais lenta, colocando a madeira em vantagem em relação à sua capacidade resistente quando comparada com outros materiais de construção. Atualmente é o único material de construção oriundo de uma fonte de regeneração contínua, floresta, desde que sejam adotadas regras para a sua utilização e reflorestação.

Vários investigadores têm apresentado modelos experimentais e numéricos para o cálculo da degradação física da madeira, na presença de altas temperaturas, (White e Dietsberger 1999), (Poon 2003), (Janssens 2004), (F. M. Andrea 2009) (Barreira 2008), (Coelho 2011), (Pinto e Calil Junior 2004), entre outros. Também a velocidade de carbonização da madeira macia ou estrutural quando exposta a condições de incêndio tem sido estudada por investigadores de diferentes países (Schaffer 1967), (White et al 1992), (Konig et al 1999), (Gardner et al 1991), (Pun et al 1997), (Fonseca, et al. 2013). Outros autores utilizaram e desenvolveram modelos empíricos para a determinação da velocidade de carbonização e evolução de temperaturas (Schaffer 1967), (White et al 1992).

Conforme proposto no Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), a temperatura de carbonização que está em contacto com o núcleo da secção é de aproximadamente 300 [°C], apesar de alguns autores considerarem outros valores de temperaturas. As propriedades térmicas da madeira relacionam-se com o teor de humidade, a orientação do grão, a composição química e a permeabilidade, sendo função da temperatura. Com base nestes conhecimentos, é possível avaliar a segurança de estruturas afetadas por um incêndio e prever com precisão, o tempo de resistência dos elementos estruturais de um edifício antes do seu colapso, (Barreira 2008).

Neste trabalho de investigação será efetuado um modelo de laje com cavidades celulares e diferentes perfurações em madeira, constituindo um modelo de lajes pré-fabricadas em madeira (Andrea, Fontana e Erchinger 2008); (Fonseca, et al. 2013) utilizadas em edifícios residenciais e comerciais. Serão construídas 3 amostras de lajes (duas iguais e uma de teste), ensaiadas ao fogo num forno de resistência e validadas numericamente. Os resultados permitirão avaliar a capacidade de resistência ao fogo e a influência do tipo de perfuração utilizada.

O trabalho realizado considera-se inovador e com relevância científica, uma vez que utiliza diferentes metodologias comparadas entre si, de forma a produzir valores de segurança em projeto neste tipo de estruturas vulneráveis quando submetidas à ação do fogo.

1.1 Objetivos

Este trabalho visa o estudo do comportamento ao fogo de lajes celulares em madeira com diferentes perfurações na face inferior (teto), tendo por base a norma europeia (EN1365-2 1999). Pretende-se avaliar a sua resistência ao fogo, através de dois ensaios experimentais, realizados num forno de resistência, com a prescrição da curva ISO 834, calculando o perfil de evolução de temperaturas em vários pontos da laje, a velocidade de carbonização, caracterizar a evolução da temperatura dentro das cavidades celulares e avaliar os critérios de desempenho relacionados com o isolamento (I) e a estanquidade (E). É também objetivo deste trabalho, validar este estudo com recurso ao programa de elementos finitos ANSYS, comparando os resultados obtidos, para a taxa de carbonização e para o perfil de temperaturas em vários pontos da laje. Pretende-se ainda verificar a influência que cada tipo de perfuração tem na propagação do incêndio.

1.2 Apresentação sumária dos capítulos

No **Capítulo 2** deste trabalho, descrevem-se os processos de transferência de calor por condução, convecção, e radiação, são apresentadas as curvas paramétricas definidas pelo Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004) e pela ASTM E119, (American Society for Testing and Materials), bem como a curva de incêndio natural que caracteriza a evolução da temperatura de

um incêndio em função do tempo de ocorrência. Explica-se o comportamento térmico da madeira, descrevem-se as propriedades térmicas dos materiais e da madeira em estudo, (massa específica, condutividade térmica e calor específico).

No **Capítulo 3** apresenta-se a laje em estudo, aspetos construtivos e exemplos de aplicação, descreve-se o processo de projeto e fabrico, caracteriza-se o forno de resistência usado para os ensaios, explicam-se as classes de resistência em condições de incêndio e caracterizam-se, morfologicamente as madeiras dos componentes utilizados na construção da laje, bem como a sua posição em relação ao incêndio.

No **Capítulo 4**, é descrita a metodologia experimental, desde a instrumentação, condições e local de ensaio. Descrevem-se os sistemas utilizados na aquisição dos valores dos sensores de temperatura nos diferentes pontos instrumentados e são apresentados os resultados da evolução da temperatura e velocidade de carbonização, das duas lajes ensaiadas. É também descrita neste capítulo a aquisição das curvas características da evolução da temperatura no interior de cada uma das três cavidades celulares das lajes.

No **Capítulo 5** apresenta-se um estudo numérico elaborado no programa de elementos finitos ANSYS, cujo objetivo é determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo, em duas lajes de madeira com diferentes perfurações, num cenário de exposição ao fogo usando as curvas obtidas no ensaio experimental (interior do forno e das cavidades celulares). São descritos, o tipo de elemento utilizado na construção da malha, a malha, as condições fronteira e os resultados obtidos, perfil de temperaturas, camada e velocidade de carbonização, para as duas lajes em estudo.

O **Capítulo 6** apresenta a comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos numericamente, para o perfil de temperaturas e velocidade de carbonização. São também comparadas as velocidades de carbonização das diferentes perfurações da laje, com o valor de referência do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004).

No **Capítulo 7**, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido e algumas sugestões para futuras investigações nesta área de desenvolvimento.

Capítulo 2

Ação do fogo

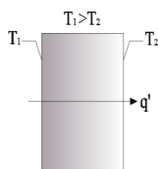
2 Ação do Fogo

2.1 Transferência de calor

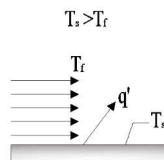
O comportamento térmico dos materiais, a determinação da distribuição de temperatura e o cálculo do fluxo de calor, são áreas das Ciências e da Engenharia importantes, por exemplo, para o dimensionamento de caldeiras, condensadores, reatores nucleares, entre outros equipamentos. Para o estudo do comportamento térmico distinguem-se três fenômenos de transferência de calor: *Condução*, *Convecção* e *Radiação*.

A transferência de calor é a energia térmica que flui de um local para o outro, utilizando como meio de transporte as partículas que os separa. Sempre que existirem diferenças de temperaturas num mesmo meio ou entre meios distintos, haverá necessariamente transferência de calor (Incropera, et al. 2008). O calor flui sempre do meio mais quente para o mais frio através dos fenômenos de condução, convecção e radiação, como exemplificado na Figura 1.

Condução num sólido ou fluido
estacionário



Convecção numa superfície e
fluido em movimento



Troca de calor por radiação entre
duas superfícies

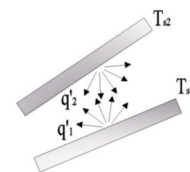


Figura 1: Condução, Convecção e Radiação, (Barreira 2008).

2.1.1 Condução

As temperaturas mais elevadas, estão normalmente associadas a energias moleculares mais elevadas. Quando as moléculas vizinhas colidem, o que acontece normalmente, ocorre a transferência energética entre partículas. Pode então dizer-se que na presença de um gradiente de temperatura, a transferência de energia por condução ocorrerá no sentido da diminuição de temperatura.

Os fenômenos de transferência de calor podem ser quantificados através de equações apropriadas, permitindo calcular a quantidade de energia transferida em função do tempo decorrido. No caso da condução, a equação da taxa de transferência de calor é normalmente conhecida pelo nome do físico e matemático Francês *Joseph Fourier (Lei de Fourier)*, sendo no entanto enunciada por *Biot*. Esta lei enuncia que a taxa de fluxo de calor por condução, numa determinada direção, é proporcional à área normal na direção do fluxo e ao gradiente de temperatura (Özisik 1990).

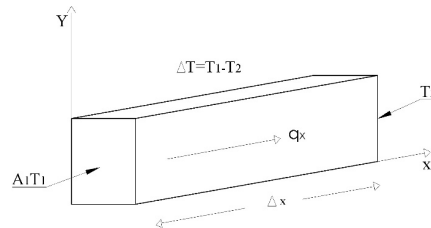


Figura 2: Condução de calor através de um fluido ou sólido estacionário.

Aplicando a Lei de Fourier ao exemplo da Figura 2, a taxa de fluxo de calor Q_x através da área no sentido positivo na direção normal x , é dada pela Equação (1), e o fluxo de calor q_x , no sentido positivo da direção normal x é obtido através da Equação 2. A constante positiva k , representa a condutividade térmica do material em $[W/m^{\circ}C]$ e o sinal negativo na equação é colocado para garantir que o fluxo de calor seja positivo no sentido decrescente da temperatura.

$$Q_x = -k A \frac{\Delta_t}{\Delta_x} \quad (1)$$

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{\Delta_t}{\Delta_x} \quad (2)$$

Como se verifica nas Equações 1 e 2, o fluxo de calor depende da variação da temperatura Δ_t em $[^{\circ}C]$, da área do elemento A em $[m^2]$ e da variação do comprimento Δ_x em $[m]$. No entanto, o tipo de material influencia particularmente o fluxo de calor, pois a condutividade térmica varia, entre materiais, de forma significativa.

A condutividade térmica também varia com o aumento da temperatura. Em alguns materiais, prata, alumínio e cobre, os valores podem aumentar 50 a 100 vezes, quando comparados com valores da temperatura ambiente. Por outro lado existem também materiais em que a variação é muito pequena e se pode desprezar, (Özisik 1990).

2.1.2 Convecção

Sempre que, sobre uma placa sólida ou no interior de um canal circular de um fluido ou gás, as temperaturas dos corpos forem diferentes da do fluido ou gás que os percorrem, existirá uma transferência de calor, identificando-se este fenómeno como convecção. Se o movimento do fluido for introduzido artificialmente, por uma bomba ou ventilador, a transferência de calor processa-se por convecção forçada, caso contrário, se o movimento do fluido resultar dos efeitos da ascensão causada pela diferença de temperatura no fluido, a convecção é livre ou natural (Özisik 1990). Na maioria das situações práticas o cálculo da distribuição da temperatura e do fluxo de calor no processo de convecção torna-se complicado, pois o campo de temperaturas no fluido é diretamente influenciado pelo seu movimento. Para calcular o valor da transferência de calor que ocorre entre uma superfície mais quente que o fluido que a percorre, Figura 3, utiliza-se a Equação 3.

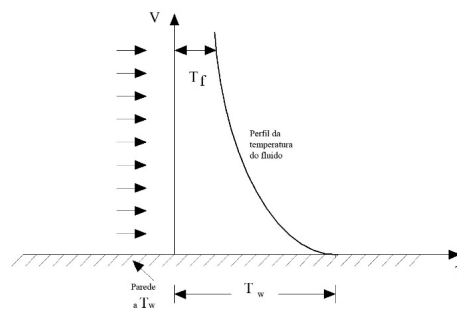


Figura 3: Transferência por convecção, de uma superfície quente para um fluido frio.

Se a temperatura do fluido for mais elevada, o valor da transferência de calor é dada pela Equação 4, onde q representa o fluxo de calor do fluido para a superfície ou da superfície para o fluido em $[W/m^2]$, T_w a temperatura da superfície também em $[°C]$, T_f a temperatura do fluido, em $[°C]$ e h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção em $[W/m^2 °K]$, (Holman 1997).

$$q = h \times (T_w - T_f) \quad (3)$$

$$q = h \times (T_f - T_w) \quad (4)$$

2.1.3 Radiação

Todos os corpos emitem continuamente energia designada por radiação térmica. Essa energia é transmitida no espaço em forma de ondas eletromagnéticas, de acordo com a teoria clássica eletromagnética de Maxwell, ou na forma de fótons diretos conforme a teoria de Planck (Özisik 1990).

2.1.3.1 Emissão de Radiação

Quando a radiação é originada no interior dos corpos e toda ela emitida através da superfície, é designada por emissão de radiação. Segundo a lei de Stefan-Boltzmann o fluxo máximo de radiação emitida por um corpo ideal a uma temperatura T (absoluta) em graus Kelvins, calcula-se utilizando a Equação 5, onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann com valor igual a 5.6697×10^{-8} [W/m²k⁴] e E_b a irradiância do corpo ideal. No caso de um corpo real, o fluxo máximo de radiação emitida é sempre menor ao do corpo ideal, Equação 6, sendo ε a emissividade, variando entre zero e um.

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

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

2.1.3.2 Absorção de Radiação

O fluxo de radiação q_{inc} que incide num corpo negro é completamente absorvido pelo mesmo, mas se esse fluxo de radiação q_{inc} incide sobre um corpo real, a energia absorvida q_{abs} , não é total e calcula-se através da expressão seguinte:

$$q_{abs} = \alpha \times q_{inc} \quad (7)$$

onde α representa o poder de absorção de um corpo, normalmente diferente da sua emissividade ε , com valores compreendidos entre zero e um, (Özisik 1990).

2.2 Incêndio natural

Para que ocorra um incêndio é necessário que existam em simultâneo uma fonte de calor, o combustível e o comburente (oxigênio). O início do incêndio dá-se quando a mistura combustível e oxigênio está suficientemente quente para que ocorra uma combustão (Coelho 2011). Um incêndio natural é definido por quatro fases distintas, representadas na Figura 4.

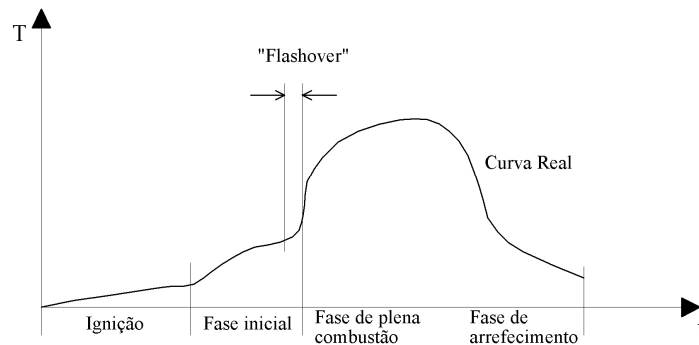


Figura 4: Fases de um incêndio natural, (Real 2003).

A primeira fase, fase inicial ou de ignição, não tem nenhuma influência no comportamento estrutural dos edifícios uma vez que as temperaturas permanecem baixas. Por outro lado é durante a fase inicial que são produzidos os gases tóxicos prejudiciais para o ser humano. A propagação é a segunda fase de um incêndio, após atingir um nível suficiente de radiação. Todos os materiais combustíveis entram rapidamente em ignição envolvendo todo o compartimento e configurando desta forma, o ponto mais crítico do incêndio, a inflamação generalizada ou “flashover”, que se caracteriza pela transição entre a fase de aquecimento e de queima (Barreira 2008). Durante esta fase a temperatura sobe rapidamente, devido à grande produção de chamas e quantidade de oxigênio existente no ar. No caso da madeira, a velocidade de propagação depende de vários fatores, nomeadamente das características do material, da forma das peças e das condições envolventes. (Coelho 2011). A terceira fase de um incêndio é a fase do desenvolvimento pleno, durante a qual ocorre a queima de todos os materiais combustíveis e a temperatura se mantém parcialmente constante. Na quarta e última fase, extinção ou arrefecimento, verifica-se uma diminuição das temperaturas pela diminuição de combustível ou do oxigênio, mas também devido à intervenção humana (Real 2003). É durante esta fase do incêndio que os materiais têm de desempenhar a função para a qual foram projetados.

2.2.1 Curvas normalizadas de incêndio

Na caracterização do comportamento de materiais e elementos em condições de incêndio, a evolução da temperatura do compartimento ou localizada em função do tempo é muito importante, e pode ser representada graficamente por curvas paramétricas normalizadas, definidas em regulamentos, EC1 (EN1991-1-2, 2002) e ASTM E119 (American Society for Testing and Materials).

2.2.2 Curva de incêndio padrão ISO 834

A curva padrão ISO 834 demonstrada no Eurocódigo 1 (EN1991-1-2, 2002) é descrita através da equação 8:

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

onde T é a temperatura dos gases do compartimento de incêndio em [°C], t o instante de tempo da ocorrência em [min] e T_0 representa a temperatura inicial do compartimento, que geralmente se considera 20 [°C].

2.2.3 Curva de incêndio para elementos exteriores

A curva para elementos exteriores conforme regulamento (EN1991-1-2 2002), utilizada só para elementos estruturais externos, permanece a 680 [°C] após 30 [min] de exposição ao fogo sendo definida pela seguinte equação:

$$T = 660 \times [1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}] + T_0 \quad (9)$$

nesta equação T_0 é a temperatura inicial do compartimento em [°C] e t em [min] o tempo decorrido desde o início do incêndio.

2.2.4 Curva de incêndio de hidrocarbonetos

A curva de hidrocarbonetos é definida pela equação 10, conforme o regulamento (EN1991-1-2 2002). Após 30 [min] de ensaio mantém uma temperatura constante de 1100 [°C], sendo esta curva, caracterizada como a mais energética de todas, onde T_0 é a temperatura inicial do compartimento em [°C] e t o tempo decorrido de ensaio em [min].

$$T = 1080 \times [1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}] + T_0 \quad (10)$$

2.2.5 Curva de incêndio ASTM

Com base na norma ASTM E119 (American Society for Testing and Materials), a equação 11 caracteriza a curva de incêndio ASTM, que é utilizada na avaliação ao fogo de elementos estruturais. A letra t representa o tempo decorrido desde o início do ensaio em [horas] e T_0 a temperatura inicial do compartimento em [°C].

$$T = 750 \times [1 - e^{-3.79553\sqrt{t}}] + 170.41 \times \sqrt{t} + T_0 \quad (11)$$

Na Figura 5 estão representadas as diferentes curvas, de acordo com a evolução da temperatura e em função do tempo decorrido.

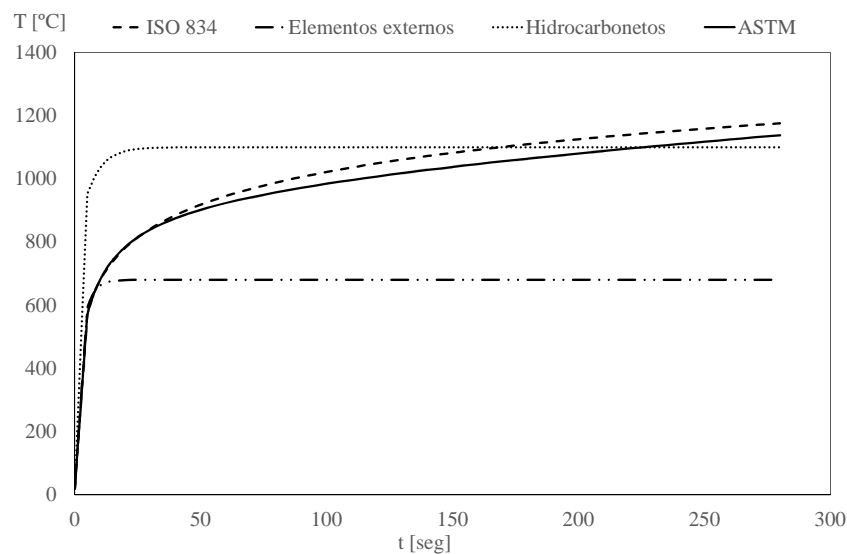


Figura 5: Curvas de incêndio normalizadas.

A curva de incêndio padrão ISO 834 é utilizada em ensaios experimentais para determinação da resistência ao fogo em elementos estruturais. Embora com pouca realidade física, ela permite padronizar os ensaios experimentais possibilitando a comparação dos resultados da resistência ao fogo obtidos em diferentes laboratórios, no mesmo país ou em países diferentes (Barreira, 2010).

2.3 Comportamento térmico da madeira

O fogo é um dos grandes inimigos dos materiais de construção, os quais apresentam reações diferentes à sua ação. Alguns materiais reduzem a secção gradualmente (madeira), outros perdem a rigidez e a resistência (aço), outros ainda, fragmentam-se quando expostos a elevadas temperaturas (betão armado), sendo prejudicados pela exposição ao fogo.

No caso da madeira e quando exposta ao fogo, podem distinguir-se três camadas distintas ao longo da secção, Figura 6. A primeira camada é a mais superficial caracterizada pela carbonização. Esta camada funciona como uma espécie de isolante devido à sua baixa condutibilidade térmica, impedindo a rápida saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção, contribuindo para que o aquecimento e a degradação do material sejam mais lentos.

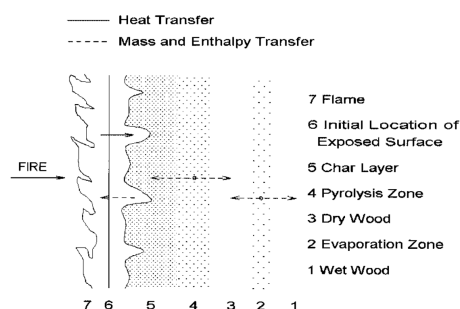


Figura 6: Zonas de degradação física numa secção de madeira, (Janssens 2004).

Entre a camada carbonizada e o interior da madeira existe uma zona de menor espessura, designada por zona de pirólise, onde as propriedades da madeira estão alteradas, mas não completamente decompostas. A zona mais interior, designada por madeira intacta mantém-se a temperaturas mais baixas conservando as propriedades mecânicas da madeira, influenciando diretamente a resistência estrutural. A madeira quando sujeita ao fogo tem um comportamento

térmico característico, que se pode descrever através dos processos de pirólise, ignição e formação da camada de carbonização.

2.3.1 Pirólise

A degradação térmica da madeira, bem como de outros materiais celulósicos, ocorre por fases, que se descrevem recorrendo a intervalos de temperaturas, (Pinto e Calil Junior 2004). À medida que a madeira é aquecida num ambiente controlado, até aos 100 [°C], ocorrem poucas reações químicas. Quando atinge os 100 [°C], a maior parte da humidade existente evapora e com o aumento da temperatura e até aos 200 [°C] a camada mais superficial da madeira fica desidratada, perdendo a restante humidade. A Figura 7 representa o processo de desidratação superficial da madeira, que leva ao enfraquecimento das fronteiras químicas provocando o início da degradação térmica. Segundo (Pinto e Calil Junior 2004) este processo é denominado por pirólise. No intervalo entre 200 [°C] e 280 [°C], a degradação da camada superficial começa a deslocar-se para o núcleo da madeira, sendo esta zona sucedida por uma camada na qual o processo de pirólise ocorre lentamente.



Figura 7: Libertação de vapores e gases.

Entre 240 [°C] e 350 [°C] há uma formação lenta de carvão. No intervalo compreendido entre os 280 [°C] e 500 [°C] ocorrem as reações chamadas exotérmicas, libertando gases combustíveis e alcatrão sob a forma de fumo, originando o carvão. Para temperaturas iguais ou superiores a 500 [°C] a chama desaparece dando lugar à queima luminosa do carvão, do monóxido de carbono e hidrogénio, chamada combustão incandescente. Por último, quando a superfície da madeira atinge aproximadamente os 1000 [°C] o carbono é rapidamente consumido, completando-se desta forma a carbonização (Pinto e Calil Junior 2004).

2.3.2 Ignição

A temperatura à qual as reações se tornam exotérmicas é considerada por muitos investigadores como o ponto de ignição da madeira e é conhecida como pirólise rápida, (Pinto e Calil Junior 2004). A ignição dá-se quando a madeira está sujeita a uma temperatura suficientemente alta e na presença de atmosferas ricas em oxigénio. Esta pode ser de dois tipos, provocada ou espontânea. A espontânea ocorre na ausência de qualquer fonte de ignição, sendo que a superfície da madeira entra em ignição através de um fluxo de energia, calor de um incêndio ou de qualquer objeto quente, por convecção ou radiação. A ignição provocada dá-se sempre que a superfície da madeira entra em contacto com qualquer fonte de ignição, chama ou faísca. Na Figura 8 pode observar-se o início da ignição de um teste efetuado numa amostra de material tricapa sujeita a um fluxo de calor de 25 [kW/m²].

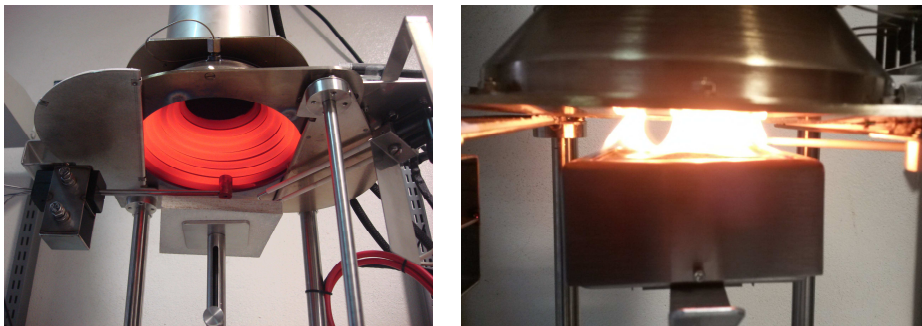


Figura 8: Identificação do tempo de ignição.

Neste ensaio foi determinada a taxa de libertação de calor, o valor de perda de massa entre outros parâmetros, (tempo de ignição= 138 [s] e tempo de extinção de chama= 2890 [s]).

2.3.3 Carbonização da madeira

Segundo (Pinto e Calil Junior 2004), a taxa ou velocidade à qual a madeira se converte em carvão, é determinante na avaliação da resistência ao fogo das estruturas em madeira, pois o colapso dos elementos estruturais de madeira e dos seus derivados, acontece principalmente por causa da redução da área resistente devido à formação de carvão. A determinação da taxa ou velocidade de carbonização pode ser baseada em modelos empíricos formulados a partir de dados experimentais ou teóricos, baseados em princípios físicos e químicos. A velocidade é

expressa pela perda de massa em [g/s] ou pelo avanço da carbonização em [mm/s], sendo o avanço da carbonização mais divulgado por conduzir diretamente à análise da secção residual, (Barreira 2008). Para as superfícies de elementos não protegidas e expostas a um fogo normalizado, de acordo o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004) a determinação da evolução da camada de carbonização, $d_{char,0}$ em [mm], é baseada na equação 12, onde t é o tempo de exposição ao fogo em [min] e β_0 a taxa de carbonização em [mm/min]. O Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), define valores para a taxa de carbonização, em função da massa específica e da tipologia da madeira, ver Tabela 1.

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (12)$$

Tabela 1: Valores de β_0 β_n segundo o EC5, para o cálculo da taxa de carbonização da madeira.

Tipologia	Material	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
Softwood (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
Hardwood (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 profundidade de carbonização calculada através da Equação 12, não contabiliza o arredondamento dos cantos e a fissuração da madeira. Para que este efeito seja considerado, é necessário calcular a evolução da camada de carbonização através da equação 13, conforme descrito no Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004).

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (13)$$

A queima da secção de um elemento estrutural retangular sujeita ao fogo em 3 direções, processa-se mais rapidamente nos cantos, o que provoca o arredondamento dos mesmos, conforme ilustrado na figura 9. Esse arredondamento será igual à espessura da camada carbonizada, Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004).

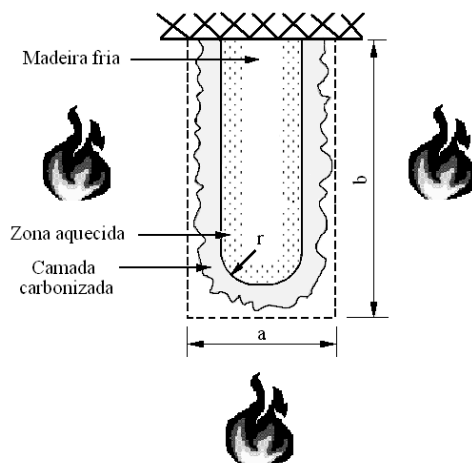


Figura 9: Arredondamento numa secção retangular exposta ao fogo, (Barreira 2008).

2.3.4 Camada de carbonização efetiva

De acordo com o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004) o cálculo da camada de carbonização efetiva, ver Figura 10, contabiliza a espessura que resulta da pirólise, definida na equação 14, onde k_0 é uma constante obtida com base na Tabela 2 e $d_{char,n}$ é calculado recorrendo à equação (13).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (14)$$

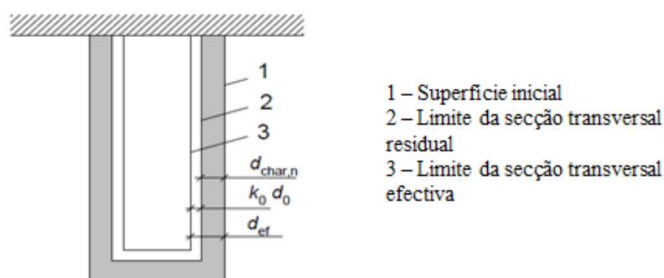


Figura 10: Secção transversal residual e secção transversal efetiva, (EN1995-1-2 2004).

Tabela 2: Valores de K_0 , para superfícies não protegidas.

Tempo	k_0
$t < 20$ min	$t/20$
$t \geq 20$ min	1

2.4 Propriedades térmicas da madeira

As propriedades térmicas da madeira (calor específico, massa específica e condutividade térmica) estão definidas no anexo B do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), considerando uma exposição ao fogo normalizada, humidade inicial 12% e temperatura ambiente de 20 [°C].

2.4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor através de materiais submetidos a um gradiente de temperatura. A condutividade térmica em peças estruturais de madeira apresenta valores muito baixos comparativamente a outros materiais, como é o exemplo dos materiais metálicos, o que as coloca numa posição de destaque (Barreira 2008). A tabela seguinte transcreve os valores constantes no Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004) para a condutividade térmica da madeira.

Tabela 3: Condutividade térmica da madeira, EC5.

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

A Figura 11 representa a evolução da condutividade térmica da madeira com a temperatura.

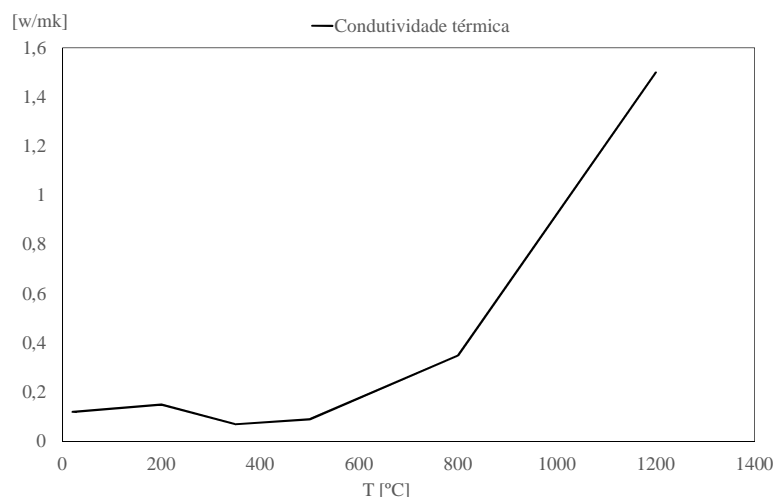


Figura 11: Condutividade térmica em função da temperatura.

2.4.2 Calor específico

O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber calor. O calor específico, é a quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura em um grau. Os valores que o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), estão definidos na tabela 4.

Tabela 4: Calor específico da madeira, EC5 (EN1995-1-2 2004).

Temperatura [°C]	Calor Específico [kJ/kgk]
20	1,53
99	1,77
99	13,6
120	13,5
120	2,12
200	2
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1
600	1,4
800	1,65
1200	1,65

A evolução do calor específico da madeira em função da temperatura está representada na Figura 12. Analisando os valores entre os 99 °[C] e os 120 ° [C] verifica-se um valor máximo no calor específico, relacionado com a evaporação da humidade existente na madeira.

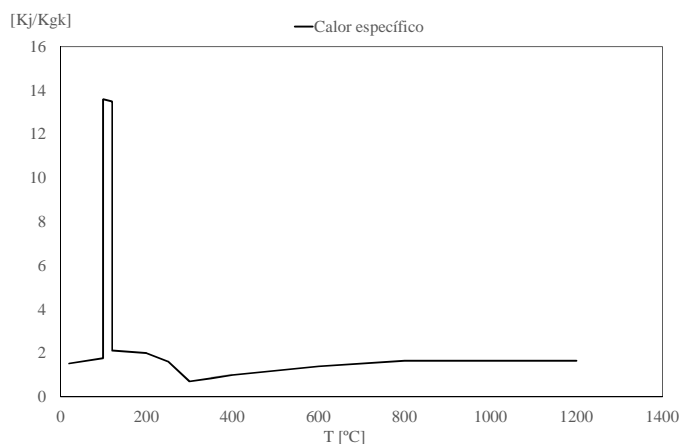


Figura 12: Calor específico em função da temperatura.

2.4.3 Massa específica

A presença de água na madeira faz variar tanto a sua massa como o seu volume, afetando a massa específica. Assim, os valores da massa específica são função de um determinado teor de humidade da madeira. Quanto maior o teor de humidade (w), maior será o valor da massa específica. A taxa de densidade é função da Tabela 5, considerando um teor de humidade (w) inicial de 12%.

Tabela 5: Coeficiente da massa específica em função da temperatura, EC5 (EN1995-1-2 2004).

Temperatura (°C)	Coeficiente de densidade
0	1+w
99	1+w
99	1+w
120	1,00
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

No modelo construtivo apresentado neste trabalho, utilizou-se madeira de abeto (abies), considerando-se dois valores de massa específica diferentes, 450 kg/m³ para as placas de teto e pavimento e de 480 kg/m³ para vigas e respetiva armadura. Na Figura 13 está representada a evolução da massa específica com o aumento de temperatura, para estas duas espécies.

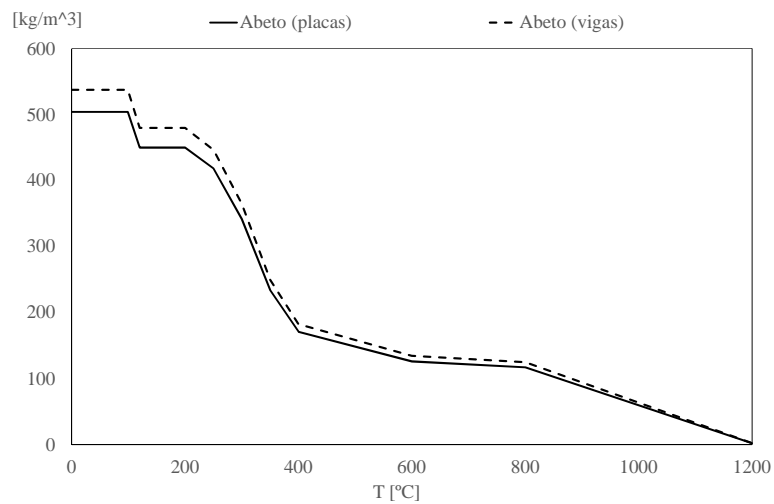


Figura 13: Massa específica da madeira em função da temperatura.

Capítulo 3

Lajes celulares com perfurações

3 Lajes celulares com perfurações

O sistema construtivo apresentado no presente estudo, baseia-se numa combinação de uma estrutura para pavimento e teto com perfurações, separada por vigas que serão responsáveis pela formação de células individuais. A combinação de materiais de qualidade aliada a técnicas de construção eficientes, permitem obter soluções construtivas inovadoras, com estética agradável, leveza e segurança para utilização. As lajes celulares em madeira, com ou sem perfurações, são estruturas leves, de fácil montagem, com excelentes características arquitetônicas, térmicas e acústicas, conforme exemplos da Figura 14.



Figura 14: Modelos de lajes celulares em madeira.

A aplicação deste tipo de lajes é variada, podendo-se encontrar em tetos, pavimentos, paredes, coberturas, divisórias de vários locais, tais como, teatros, centros comerciais, igrejas, habitações familiares, conforme se pode verificar na Figura 15.



Figura 15: Soluções construtivas de lajes celulares.

3.1 Critérios de desempenho

Segundo a norma europeia de ensaios de resistência ao fogo (EN1363-1 1999), durante um ensaio normalizado, podem ser avaliados três critérios de resistência em condições de incêndio, capacidade de carga (R), isolamento (I) e estanquidade (E). Neste trabalho, como não

foram consideradas cargas aplicadas, apenas serão verificados os critérios de isolamento e estanquidade.

3.1.1 Capacidade de carga

O critério de capacidade de carga está exemplificado na Figura 16, sendo caracterizado pelo tempo em minutos completos para o qual a amostra, mantém a capacidade de suportar a carga definida para o ensaio sem entrar em colapso. Segundo a norma (EN1363-1 1999), o colapso é definido quando se verificam em simultâneos dois critérios importantes (deslocamento máximo e taxa de deslocamento).

3.1.2 Isolamento

Este critério traduz-se no tempo em minutos durante o qual a amostra mantém a sua capacidade de isolamento, garantindo que a temperatura na face não exposta seja limitada a um determinado valor, Figura 17. A verificação do isolamento é feita tendo em conta um dos seguintes critérios, (EN1363-1 1999): **a)** O incremento médio de temperatura em relação à temperatura média inicial não deverá ser superior a 140°C. Sendo que a temperatura média inicial, é igual à temperatura da face não exposta da amostra, no início do ensaio; **b)** O incremento máximo de temperatura em qualquer ponto da face não exposta, incluindo os termopares móveis, não supere a temperatura inicial em 180°C.

3.1.3 Estanquidade

A estanquidade define-se como sendo o tempo em minutos completos para os quais a amostra consegue manter essa função. Para verificar este critério, é utilizada uma bola, novelo ou semelhante em algodão, embebida num produto inflamável, como é o caso do álcool etílico, Figura 18. Nestas condições, a amostra em estudo manterá a sua função de separação até que se verifique um dos seguintes critérios, (EN1363-1 1999): **a)** Ignição do algodão; **b)** Penetração de um calibre; **c)** Aparecimento de chama.



Figura 16: Aplicação de carga (Association 2006).

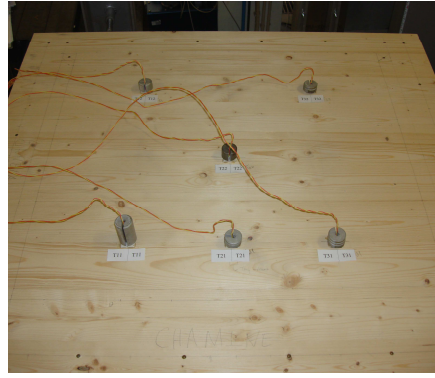


Figura 17: Violação do critério de isolamento.



Figura 18: Verificação do critério de estanquidade.

3.2 Condicionantes para a concepção da laje

As lajes em estudo foram ensaiadas num forno de resistência ao fogo apresentado na Figura 19, existente no Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança. Este forno está dotado de 4 queimadores a gás natural com uma potência total de 360 [kW] e um volume útil de 1 [m³], preparado para trabalhar com qualquer curva de incêndio normalizada tais como, ISO834, Hidrocarbonetos, etc.

A laje será acoplada ao topo do forno, conforme se representa na Figura 20, pelo que as suas dimensões deverão respeitar a geometria e respetivas características. O desenho do bastidor representado na Figura 20, é um anel em construção mista de aço com betão refratário.



Figura 19: Forno de alta resistência.

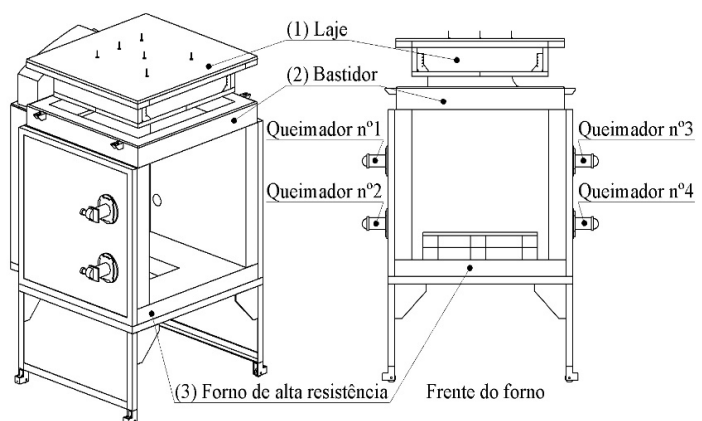


Figura 20: Forno, bastidor e laje.

As soluções construtivas para as lajes em madeira onde se podem encontrar as lajes em estudo são muito variadas. A face visível da superfície do teto, pode apresentar diferentes

formas, que vão ao encontro da estética e da utilidade das mesmas, mediante o local em que estão inseridas. Encontram-se com frequência perfurações de vários tamanhos e geometrias, circulares, ovais, retangulares, quadrangulares, etc, que para além das características arquitetónicas e acústicas, desempenham outras funcionalidades nas infraestruturas. Numa situação de incêndio, estas soluções construtivas, tem diferentes desempenhos. Para o caso das lajes em estudo, optou-se por analisar três diferentes soluções construtivas, conforme exemplificado na Figura 21. A Célula 1 apresenta várias perfurações em forma de retângulos pequenos, a Célula 2 não apresenta qualquer tipo de perfuração e a Célula 3 apresenta perfurações retangulares de tamanho superior às da célula 1. Desta forma pode-se comparar o efeito que o incêndio provoca nestas diferentes soluções construtivas.

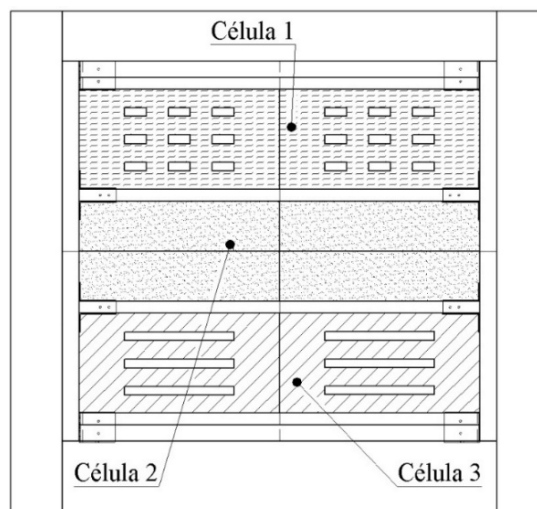


Figura 21: Identificação das células.

3.3 Caracterização da laje

Com base nos critérios adotados para a conceção da laje, características do forno, geometria das perfurações a executar na superfície da placa do teto (superfície exposta ao fogo), características da madeira, tipo e dimensões, foi definido o modelo apresentado na Figura 22, que é descrito mais pormenorizadamente no anexo A 1. Todo o material utilizado na conceção das lajes, foi fornecido pela empresa JULAR.

Conforme se verifica na Figura 22, o modelo de laje construído é formado por uma placa superior em painel tricapa, com dimensões 1150x1232x19[mm], designada por placa de pavimento, e simultaneamente por uma placa inferior, 870x996.80x32[mm] ou (placa de teto)

em painel tricapa, onde serão efetuados as diferentes perfurações. O interior da laje possui 4 vigas em painel tricapa de 918.8x200x27 [mm], que permitem a criação de três células independentes. A laje é ainda composta por uma armadura exterior, constituída por duas vigas Kerto S 918.8x200x37 [mm] e duas vigas Kerto S 870x200x39 [mm]. Para fazer o acoplamento entre todos estes componentes, foram utilizados elementos de ligação SIMPSON com asas exteriores para vigas tipo 300 (A=27, B=133, C=84), elementos de ligação SIMPSON com asas interiores, para ligação da armadura tipo 300 (A=64, B=133, C=76) e parafusos de fixação de diâmetros 4 e 5 [mm], comprimentos de 45 e 70 [mm] respetivamente, conforme apresentado no anexo A 2. A madeira utilizada para a construção é o abeto, cuja densidade é igual a 450 kg/m³ no caso do material utilizado nas placas de teto e pavimento, e de 480 kg/m³ para as vigas e armadura exterior.

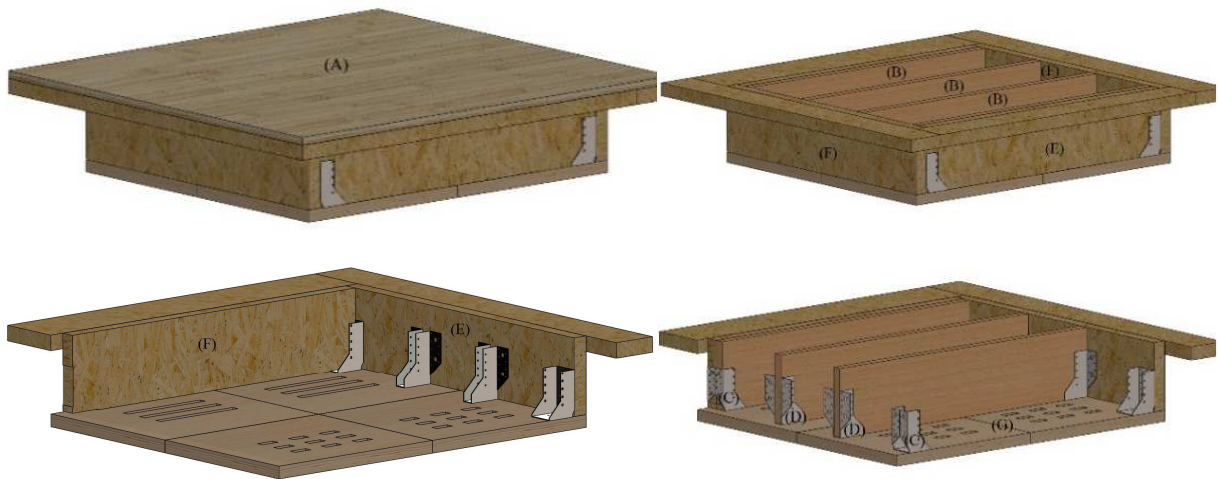


Figura 22: Perspetiva do modelo de laje em estudo.

(A)- Placa de pavimento, (B)- Vigas em painel tricapa de 918.8x200x27 [mm], (C) e (D)- Conectores, (E)- Vigas Kerto S 918.8x200x37 [mm], (F)- Vigas Kerto S 870x200x39 [mm], (G)- Placa de teto.

3.3.1 Caracterização das madeiras usadas na construção da laje

Apesar do tipo de madeira (abeto) ser comum aos elementos que constituem a laje, estruturalmente a madeira utilizada é diferente nas vigas e nas placas, devido aos processos de fabrico e processamento.

3.3.2 Vigas Kerto S

As vigas Kerto S são micro-laminadas, constituídas por lâminas de abeto com aproximadamente 3 milímetros de espessura, coladas a quente com diferentes orientações, obtendo painéis de diferentes espessuras, a partir dos quais se obtêm componentes e peças (vigas) para o fabrico de estruturas. É um elemento de estrutura moderno e inovador que permite a realização de uma ampla gama de estruturas em madeira. Para a situação em estudo, as vigas Kerto S utilizadas tem espessuras de 37 e 39 mm, sendo que na Figura 23 está representado o pormenor construtivo, bem como a posição relativa sob a ação do fogo.

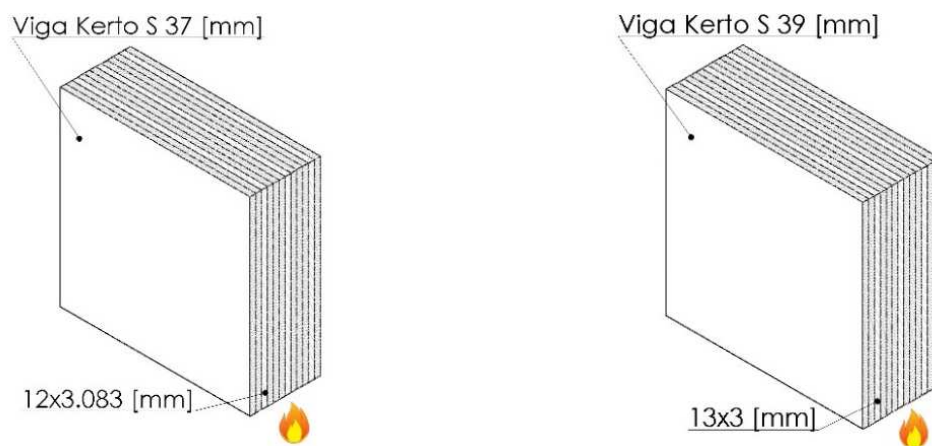


Figura 23: Pormenor construtivo, vigas Kerto S de 37 e 39 [mm].

3.3.3 Painéis tricapa

Este tipo de painéis é composto por três camadas de madeira, coladas entre si, com diferentes orientações e espessuras, originando painéis com várias dimensões. São utilizados no fabrico de paredes interiores, pavimentos, tetos, revestimento interior, revestimento de fachadas, fabrico de mobiliário, portas, embalagens, carroçarias, *placards* publicitários, etc. Este material foi utilizado na construção da laje, com três finalidades distintas. Foram utilizadas placas tricapa para a definição da superfície de pavimento (A), da superfície do teto (B) e das vigas (C), com espessuras de 20, 32 e 27 [mm] respetivamente. A Figura 24 representa o pormenor construtivo destes componentes, bem como a posição relativa à ação do fogo.

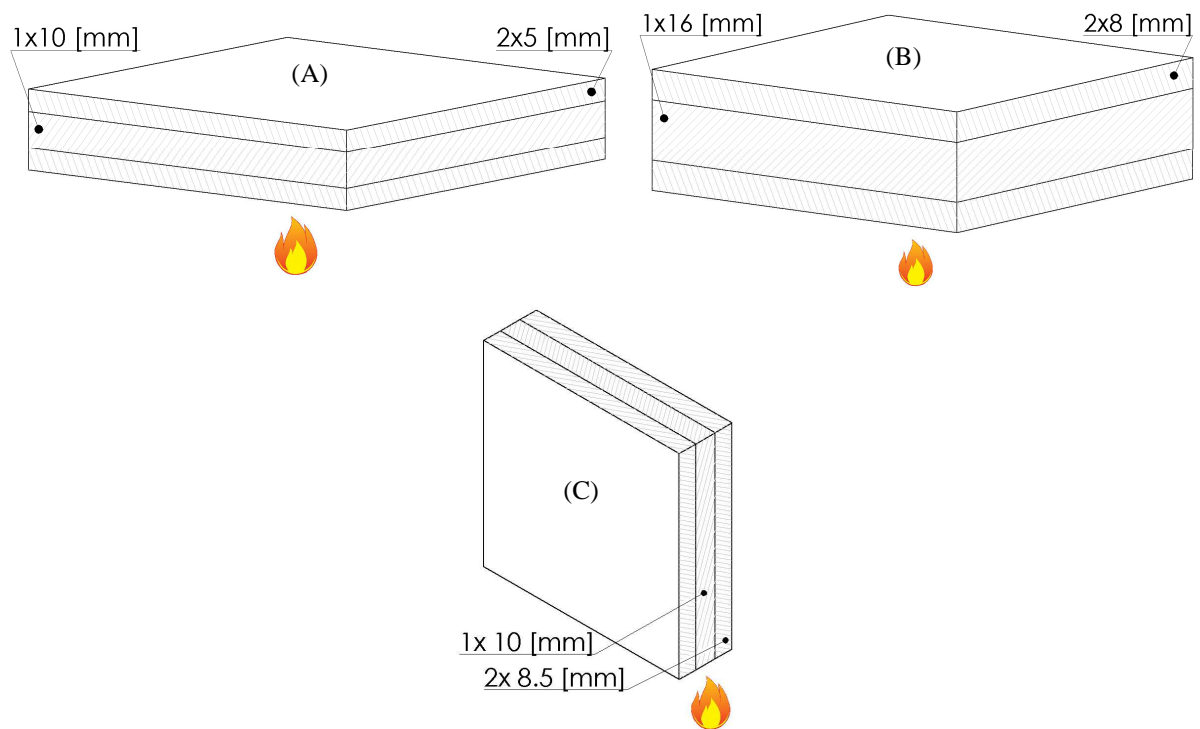


Figura 24: Pormenor construtivo.

(A)- Placa de pavimento de 20 [mm], (B)- Placa teto de 32 [mm], (C)- Vigas em painel tricapa de 27 [mm].

3.4 Construção das lajes

Foram contruídas 3 lajes, duas para aquisição de resultados em ensaios normalizados e uma de teste. A sua construção foi feita no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Instituto Politécnico de Bragança.

3.4.1 Laje de teste

Esta laje, apresentada na Figura 25, é de dimensões e estrutura semelhantes às apresentadas na Figura 28. A sua construção tem como objetivo testar todos os procedimentos de ensaio, regulação do forno e sistemas de aquisição de dados, de forma a garantir que os ensaios seguintes se efetuem de acordo com o mesmos procedimentos.



Figura 25: Laje de teste.

3.4.2 Lajes para os ensaios normalizados

A construção das lajes iniciou-se, preparando a placa de teto, cortando-a em quatro painéis de iguais dimensões, para que a maquinagem das perfurações pudesse ser feita com recurso ao centro de maquinagem CNC. As Figuras 26 e 27 representam os elementos de placas de teto e a respetiva maquinagem.

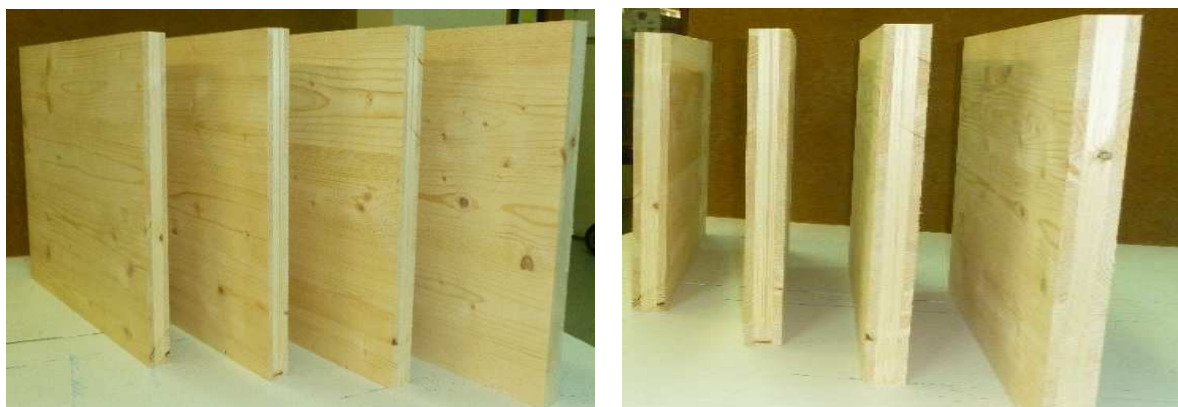


Figura 26: Placa de teto.

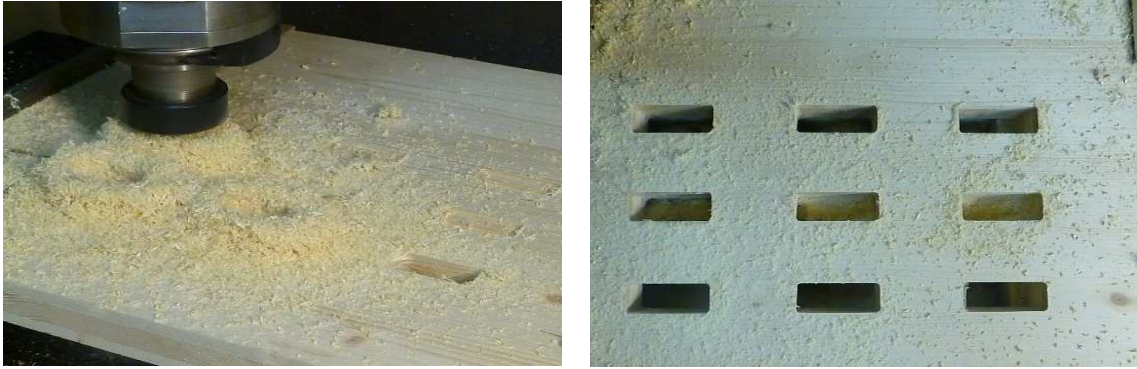


Figura 27: Maquinagem das perfurações.

Após a preparação da placa de teto ver Figura 27, corte de todas as vigas e da placa de pavimento, procedeu-se à montagem, do qual resultaram duas lajes identificadas (Laje 1 e Laje 2), ver Figura 28.



Figura 28: Etapas de montagem e resultado final, Lajes 1 e 2.

Capítulo 4

Ensaio experimentais de resistência ao fogo

4 Ensaios experimentais de resistência ao fogo.

A instrumentação das lajes é um processo muito importante, pois é com recurso aos dados adquiridos dos sensores que os equipamentos e componentes permitem avaliar o comportamento térmico das lajes, nas suas diferentes zonas, quando estas são sujeitas a uma situação de incêndio normalizado.

A instalação dos termopares para a medição de temperaturas, é baseada nas especificações das normas (EN1363-1 1999), (EN1365-2 1999) e vai de encontro ao objetivo do estudo no presente trabalho. Neste caso, como se pretende verificar o comportamento da laje devido à influência das diferentes perfurações, a maior concentração de termopares é na parte superior da face exposta diretamente ao fogo (placa de teto), para caracterizar o desempenho térmico das diferentes células. A distribuição dos termopares segue um critério de simetria geométrica, de forma a comparar a evolução da temperatura em pontos com características e localizações semelhantes. Os restantes termopares estão distribuídos pela placa de pavimento, superfície não exposta à ação do fogo, para verificação da temperatura média e máxima (critério I), nos elementos de ligação metálicos (conectores) e no interior de cada célula para medição da evolução da temperatura de cada célula.

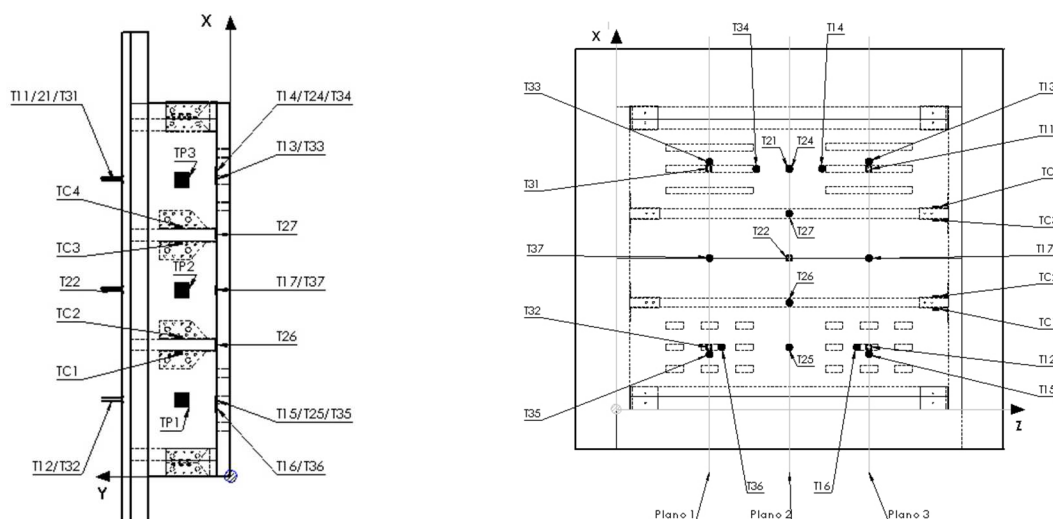


Figura 29: Localização dos termopares.

A Figura 29 representa um esquema com a distribuição dos termopares na laje. No total, em cada laje existem 27 pontos de registo de temperaturas, distribuídos conforme Tabela 35, anexo A3.

4.1 Instrumentação com termopares tipo K

No caso da placa de teto e dos conectores metálicos foi utilizado fio termopar tipo K, Figura 30, constituído por dois fios, cada um com diâmetro igual a 0.711 [mm], protegidos por isolamento resistente a altas temperaturas.



Figura 30: Fio termopar tipo K.

A Figura 31 representa a instalação de termopares tipo K, em diferentes posições da laje. Para uma melhor qualidade nas leituras, garantindo que o valor lido é no ponto em questão e não no ambiente que o rodeia, os termopares instalados na placa de teto e conectores metálicos foram protegidos com massa térmica, o fio termopar envolvido em papel de alumínio e fixo à estrutura, o que permite uma maior proteção contra o incêndio Figura 31.

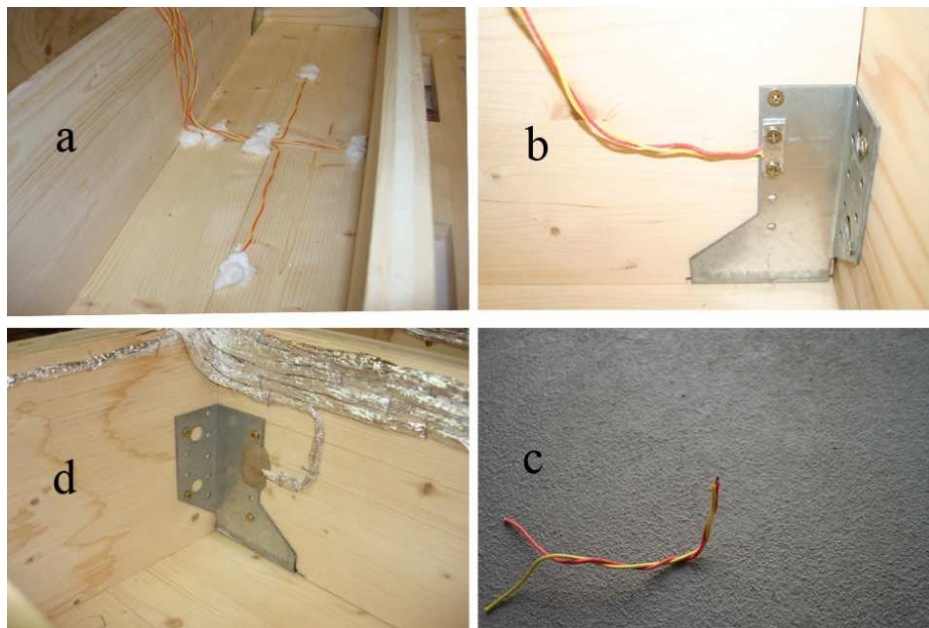


Figura 31: Instalação, termopar tipo K.

- a) Placa de pavimento; b) ligação ao conector metálico, d) Proteção com massa térmica e papel de alumínio; c) pormenor da união dos filamentos do fio termopar.

4.2 Instrumentação com termopares de placa

A medição da temperatura no interior das células foi feita utilizando termopares de placa (Figura 32), com a designação TP1, TP2 e TP3, correspondendo às células 1, 2 e 3 respetivamente. Foram instalados a meio da altura e do comprimento e construídos de acordo com a norma (EN1363-1 1999). A sua escolha, prende-se com o facto de se obter uma curva média da evolução de temperaturas, sem oscilações significativas, devido à inercia da placa metálica que o constitui. O objetivo é caracterizar o perfil de evolução das temperaturas no interior de cada célula, em função da evolução do incêndio na face externa da laje. As três curvas de temperaturas, obtidas em cada célula durante o ensaio, serão posteriormente utilizadas no modelo numérico para melhor validar todo o comportamento térmico das lajes.



Figura 32: Termopar de placa.

4.3 Instrumentação com termopares de superfície, face não exposta

Como referido anteriormente, um dos critérios de desempenho que se pretende verificar neste trabalho é o critério de isolamento. A sua verificação é efetuada através da medição da temperatura média e máxima da face não exposta ao fogo. Para tal, são utilizados termopares de superfície específicos, construídos com placas circulares de cobre com 12 [mm] de diâmetro e 0.2 [mm] de espessura, soldadas a fio termopar tipo K e protegidos com placas de isolamento quadrangulares (gesso cartonado) de acordo com a norma (EN1363-1 1999), Figura 33.

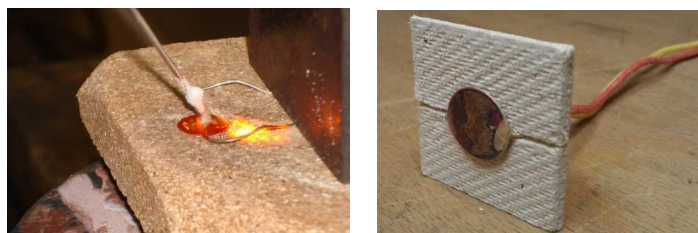


Figura 33: Termopares de superfície, construção e aspeto final.

A distribuição dos termopares de superfície na face não exposta (placa de pavimento), é feita de acordo com a norma (EN1634-1 2000). Teve em consideração a limitação do número dos canais de leitura do equipamento de aquisição, geometria das células e perfurações. Foram utilizados seis termopares, cinco deles para medição da temperatura média (T11, T12, T22, T32 e T31) e um para a medição da temperatura máxima (T21), Figura 34. Como se pode verificar nesta figura, os termopares para medição da temperatura média, estão distribuídos em forma de cruz, abrangendo uniformemente toda a área da placa de teto nas zonas das células. O termopar T21 é o responsável pela leitura prevista da temperatura máxima e está colocado na zona da célula 3, onde as perfurações são maiores, e onde a temperatura deverá atingir maiores valores.

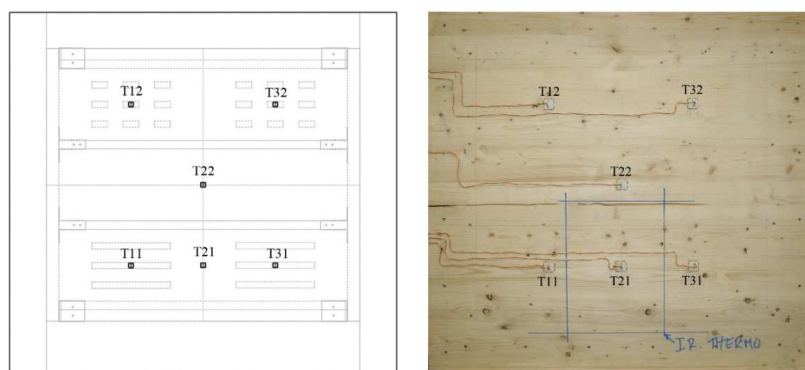


Figura 34: Localização dos termopares de superfície.

Após preparação dos diferentes tipos de termopares e de acordo com o apresentado anteriormente, efetuou-se a sua colocação nos locais definidos de cada laje. Nas imagens da Figura 35 verifica-se a evolução das diferentes fases de instrumentação das lajes em estudo, até à instalação final.



Figura 35: Diferentes fases da instrumentação, lajes 1 e 2.

4.4 Aquisição de dados

O número total de pontos de medição distribuídos pela laje não deve ultrapassar o limite imposto pelos sistemas de aquisição multicanal MGC Plus e Spider 8 da HBM disponíveis no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais. Foram utilizados 27 pontos de medição, correspondendo ao valor permitido nestes sistemas. Para além destes dois sistemas, foi utilizada uma câmara termográfica dotada de um detetor de infra vermelhos (infrared detector - FLIR-Picture-in-Picture) para registo da evolução das temperaturas da face não exposta.

4.5 Sistema de ensaio

Os ensaios experimentais das lajes construídas foram realizados no forno de resistência ao fogo existente no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, e o acoplamento das lajes ao forno é feito pela parte superior, como exemplificado na figura que se segue.

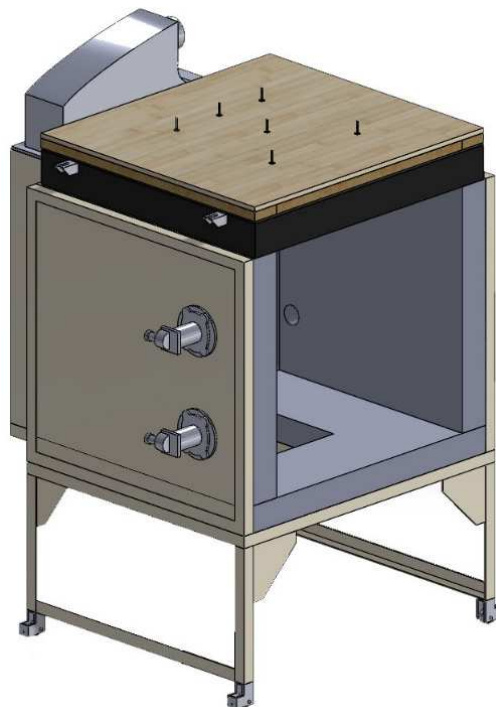


Figura 36: Forno de resistência ao fogo e laje em posição de teste.

4.6 Resultados experimentais

Os ensaios experimentais resultam da imposição da curva de incêndio ISO 834. No instante inicial, as lajes estão à temperatura ambiente do laboratório, cerca de 16 [°C]. A placa de teto é o único componente da estrutura que vai estar sujeito à ação direta do fogo, propagando-se para a restante laje com o decorrer do ensaio. Após reunidas todas as condições de ensaio e de segurança, realizaram-se os ensaios às duas lajes instrumentadas, Laje 1 e Laje 2. Como a madeira é um produto combustível, verifica-se a libertação de calor neste processo. Este calor contribui para a elevação da temperatura dentro do forno. O forno trabalhou na sua potência máxima, razão pela qual, a curva do aquecimento é superior a curva ISO 834. Nas figuras 37 e 38, estão representadas algumas imagens dos ensaios das lajes 1 e 2 respetivamente.

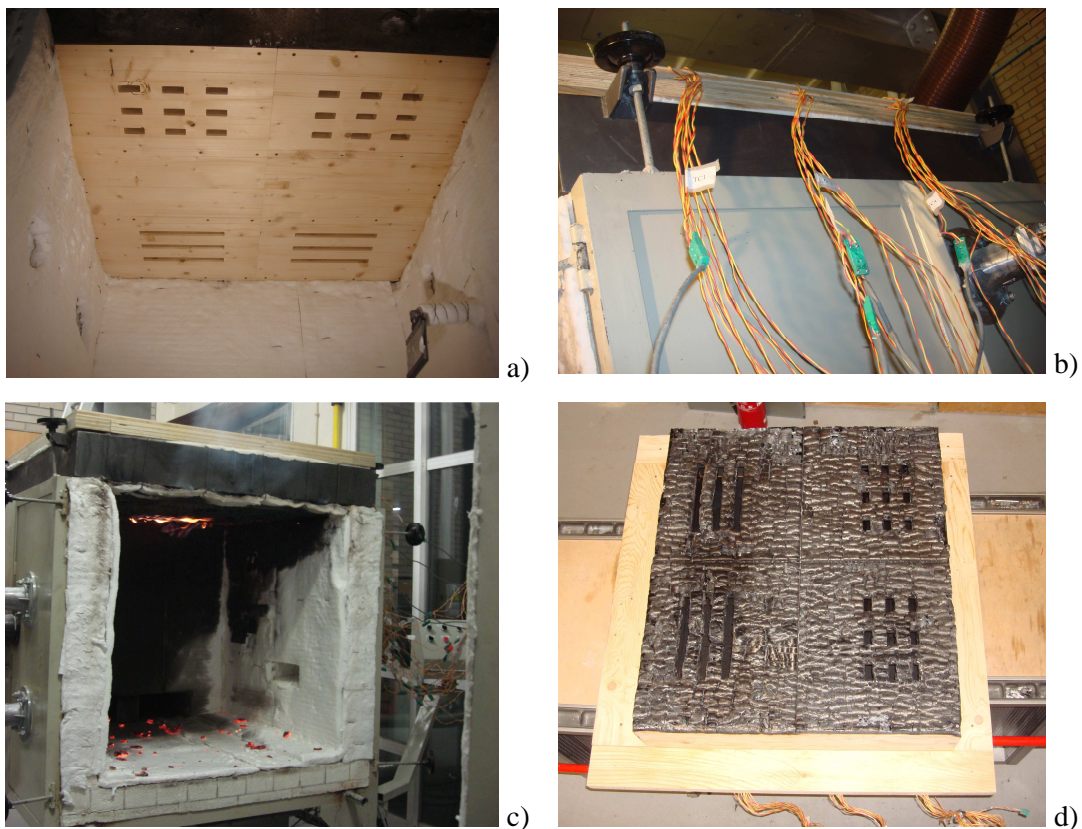


Figura 37: Ensaio da laje 1.

a)- Laje em posição de teste (interior do Forno), **b)-** Ligações para aquisição de dados, **c)-** Instante de abertura da porta do forno, **d)-** Aspeto final da laje (placa de teto).

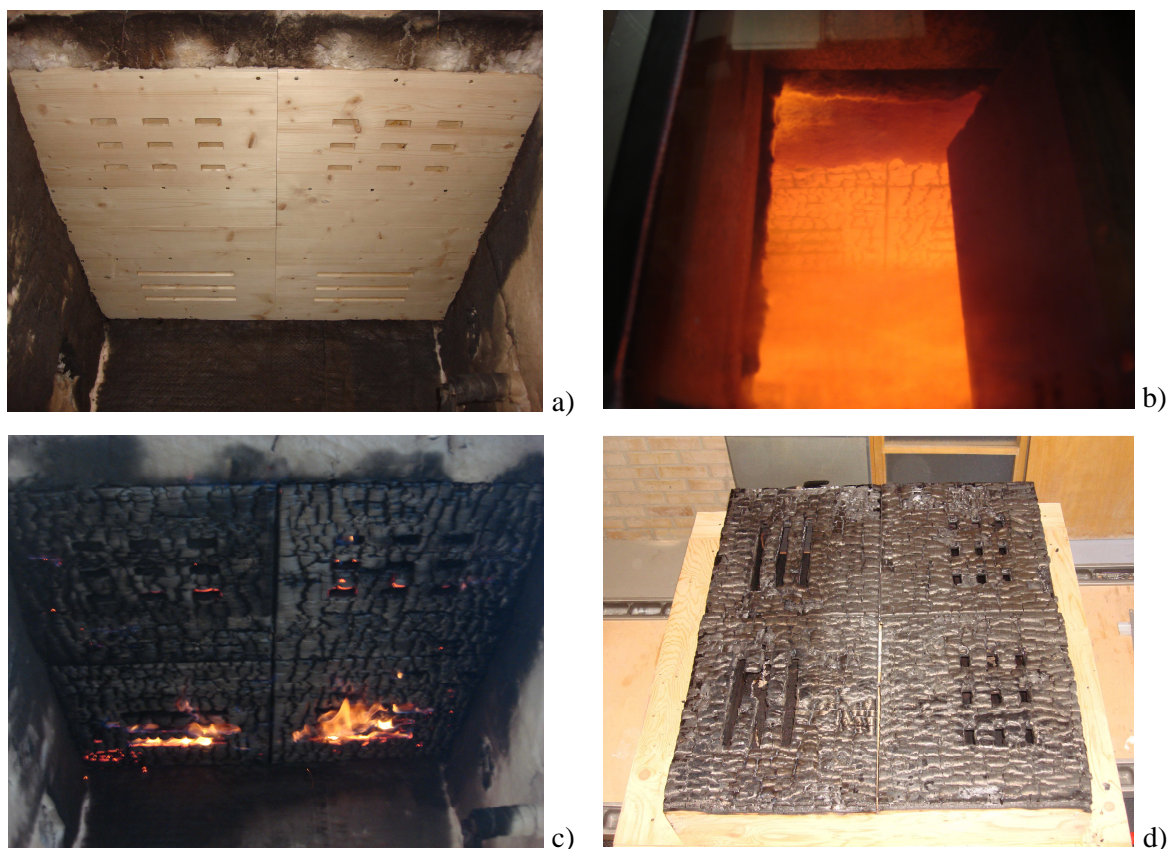


Figura 38: Ensaio da laje 2.

a)- Laje em posição de teste (interior do Forno), **b)**- aspeto da placa de teto durante o ensaio, **c)**- Instante de abertura da porta do forno, **d)**- Aspeto final da laje (placa de teto).

4.6.1 Comportamento térmico da laje 1

Os resultados recolhidos pelos equipamentos de aquisição são tratados, para que seja possível uma análise detalhada dos resultados do ensaio. Com o registo obtido através de cada termopar, elaboraram-se gráficos que permitem identificar o comportamento térmico da laje e dos seus componentes, bem como verificar os critérios de desempenho, estanquidade e isolamento. O primeiro ensaio teve uma duração de 1500 [s] e uma temperatura real máxima no interior do forno de 1066 [°C] aos 944 [s]. No gráfico da Figura 39, verifica-se a curva de aquecimento atingida no interior do forno. Esta curva teve um comportamento não regular, devido a problemas de funcionamento dos queimadores do forno. No instante de 500 [s] os dois queimadores iniciais desligaram-se na totalidade, sendo posteriormente colocado em funcionamento, apenas um único queimador.

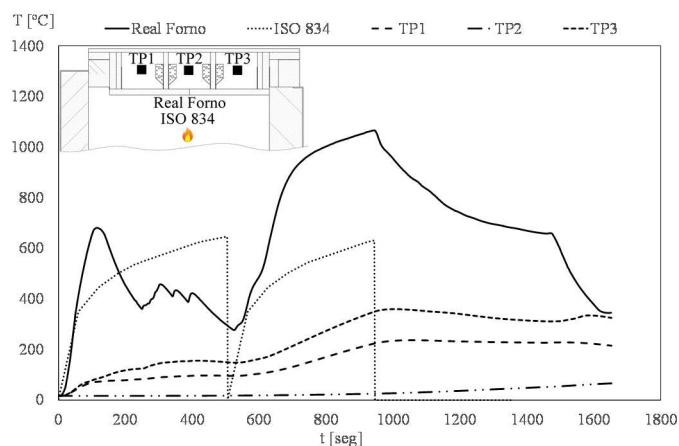


Figura 39: Temperatura prevista e real no interior do forno e real das células 1, 2 e 3.

O forno funcionou com um queimador garantindo a evolução da curva de ensaio, com se verifica na Figura 39. Foi desligado aos 944 [s], e a partir deste instante a temperatura do forno baixa consideravelmente. As duas curvas de arrefecimento estão relacionadas com a paragem de funcionamento do queimador (primeira curva) e posteriormente com a abertura da porta (segunda curva). As temperaturas registadas no interior de cada célula seguem proporcionalmente o aquecimento no interior do forno, verificando-se as temperaturas mais elevadas na célula 3 (TP3), seguida da célula 1 (TP1) e por último, as temperaturas mais baixas, na célula 2 (TP2), que não ultrapassa os 70 [°C]. Também nestas curvas, se verifica a influência da paragem dos queimadores.

A evolução da temperatura nos conetores, acessórios responsáveis pelo acoplamento dos vários componentes, está representada no gráfico da Figura 40. Pode concluir-se que os conetores contíguos com as células 1 e 3, TC1 e TC4 respetivamente, são os que estiveram sujeitos a temperaturas mais elevadas, pois são estas células que contem as perfurações. Consequentemente, os conetores que se situam na célula sem perfurações, TC2 e TC3 registam temperaturas significativamente mais baixas, quando comparadas com o conetor situado na célula 3, independente do fluxo de calor por condução.

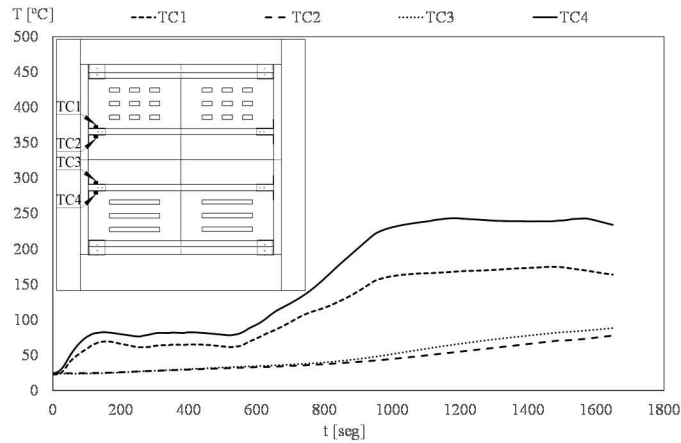


Figura 40: Temperaturas nos conetores.

As temperaturas registadas nos conetores permitem demonstrar muito bem o efeito das perfurações neste tipo de estruturas, quando sujeitas a um incêndio. No entanto, e de acordo com a norma (EN1993-1-2 2005), as temperaturas registadas, podem afetar ligeiramente as propriedades mecânicas de resistência ao fogo, em particular o módulo de elasticidade do aço. Analisando as temperaturas registadas na face não exposta ao fogo, apresentadas no gráfico da Figura 41, verifica-se que qualquer um dos seis termopares, T11, T31, T21, T32, T22 e T21 instalados nesta superfície, não ultrapassam o incremento máximo de 180 [°C] em relação à temperatura inicial de ensaio, pelo que se verifica a resistência da laje quanto ao critério de isolamento. (EN1363-1 1999).

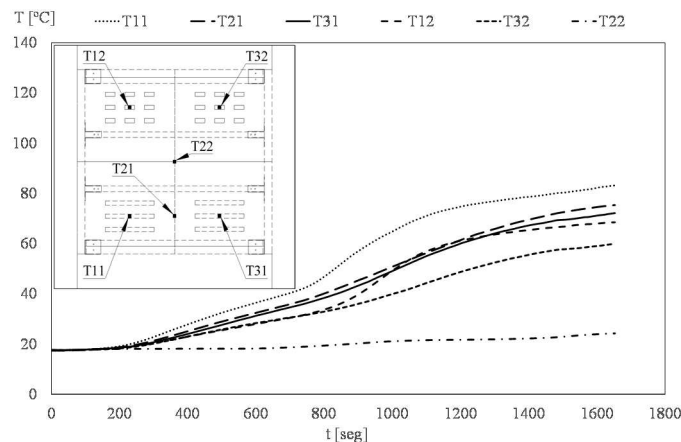


Figura 41: Temperaturas na face não exposta.

Devido à simetria geométrica da laje, entre os lados esquerdo e direito, também as temperaturas registadas deveriam de apresentar resultados simétricos. Tal não acontece, como se pode verificar quando comparadas as curvas de aquecimento do termopar T32 com o T12 e

do T31 com o termopar T11. Em ambas as situações, as temperaturas dos termopares do lado esquerdo, T11 e T12 são mais elevadas, fenómeno que está relacionado com o facto de estarem do lado oposto ao único queimador, em funcionamento (nº4). Como já referido na análise dos gráficos anteriores, também nesta situação se verifica a influência das perfurações, apresentando temperaturas mais elevadas na zona da célula 3, (zona de influência das perfurações com maiores dimensões) e as temperaturas mais baixas na zona da célula 2 sem perfurações. Como já referido anteriormente um dos métodos de aquisição de dados, foi através do registo termográfico, numa parcela de área pertencente à face não exposta, situada no centro da zona de influência da célula 3, ver Figura 42

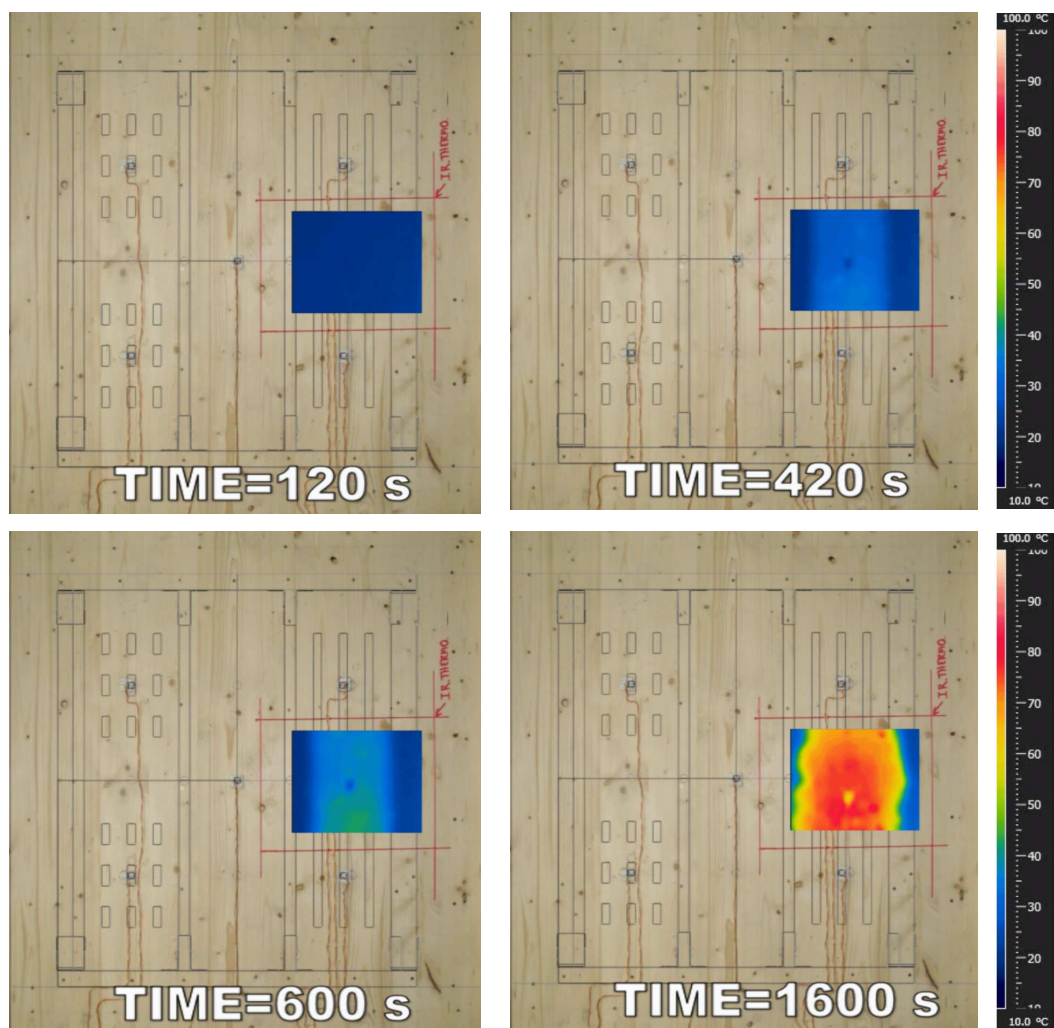


Figura 42: Aquisição do conjunto de temperaturas por termografia IR.

Analisando o gráfico da Figura 43 referente à evolução da temperatura, máxima, média e mínima registadas na referida área, comprovou-se que o critério de isolamento não é ultrapassado.

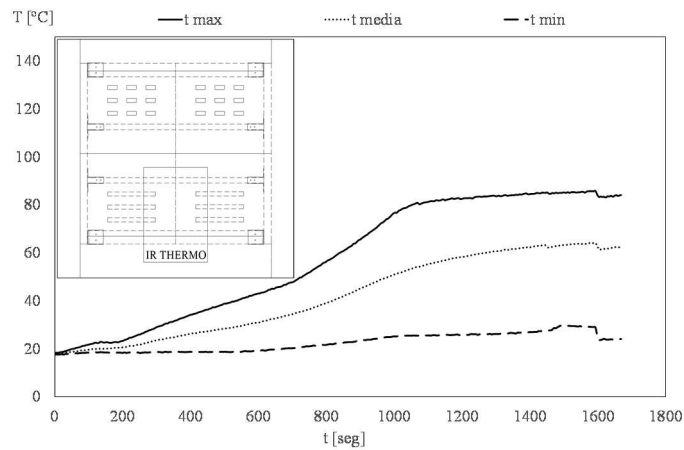


Figura 43: Temperaturas registadas através da captura termográfica.

Com base nos dados registados pelos termopares instalados na placa de pavimento, (face não exposta), obtêm-se curvas de temperatura máxima, média e mínima da referida superfície, que por sua vez se podem comparar com as curvas de temperaturas registadas através da câmara termográfica, conforme gráfico da Figura 44. Pode verificar-se que todas as curvas seguem evolução semelhante, mas que as registadas na parcela da área referente à aquisição termográfica são superiores, situação relacionada com o facto de as temperaturas máximas, médias e mínimas obtidas através dos termopares da face não exposta, terem a influência das várias perfurações e as obtidas através da câmara termográfica, só apresentarem a influência das perfurações da célula 3 (perfurações de maior dimensão).

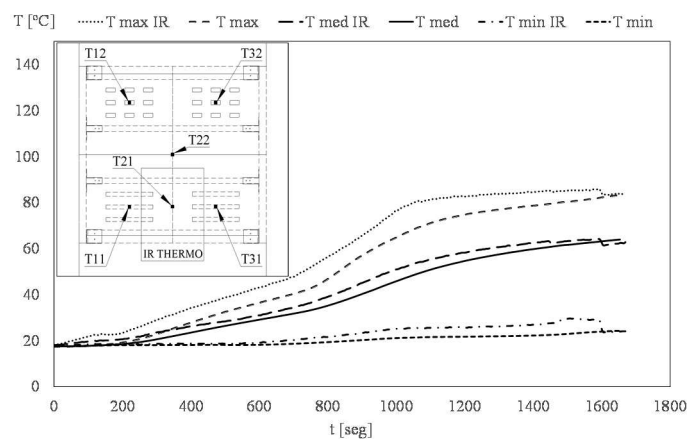


Figura 44: Comparação das temperaturas, captura termográfica e face não exposta.

Os gráficos da Figura 45, Figura 46 e Figura 47 são referentes às temperaturas registadas nas zonas das células 1, 2 e 3 respetivamente. Verifica-se que as temperaturas mais elevadas

correspondem às medições efetuadas célula 3, seguida das temperaturas na célula 1 e por fim da célula 2.

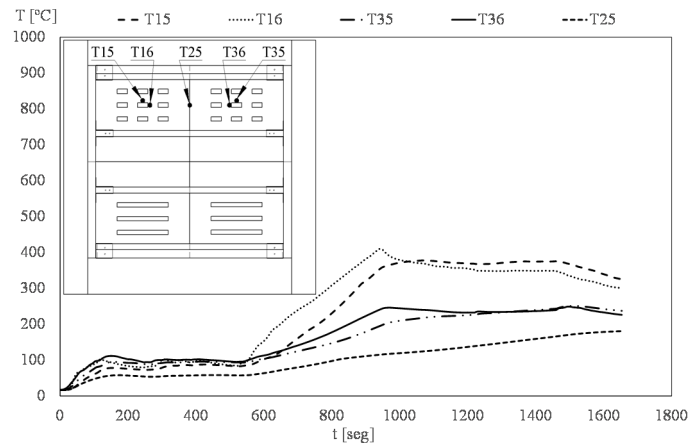


Figura 45: Temperaturas da Célula 1.

Em qualquer dos gráficos verifica-se a influência da irregularidade na curva de aquecimento, sendo mais visível nas células 1 e 3. Analisando as curvas de temperaturas dos termopares T25 e T24, Figura 45 e Figura 47 respetivamente, verifica-se em ambos os casos o registo de temperaturas mais baixas, por se encontrarem afastados das zonas das perfurações. Em qualquer um dos gráficos se verifica que as evoluções das temperaturas dos termopares do lado esquerdo são superiores às temperaturas registadas pelos termopares do lado direito, situação já explicada.

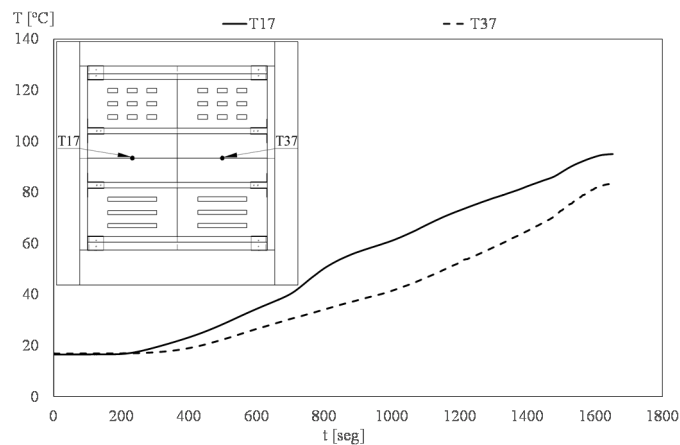


Figura 46: Temperaturas da Célula 2.

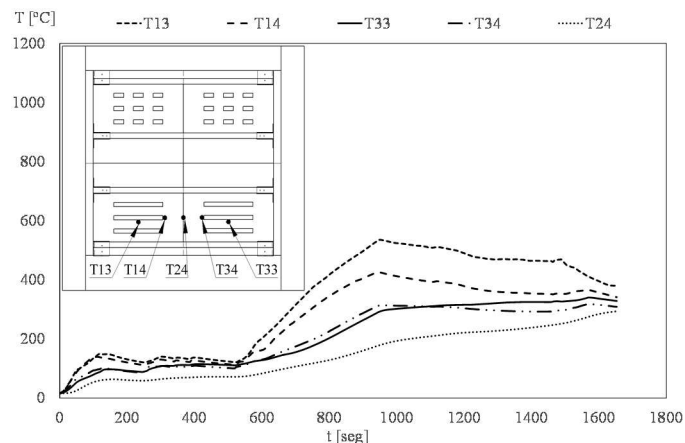


Figura 47: Temperaturas da Célula 3.

A evolução das temperaturas dos termopares T26 e T27, localizados na interface das vigas com a placa de teto, encontram-se representadas na Figura 48. Verifica-se a influência da perfuração de maior dimensão da célula 3, em comparação com a perfuração da célula 1.

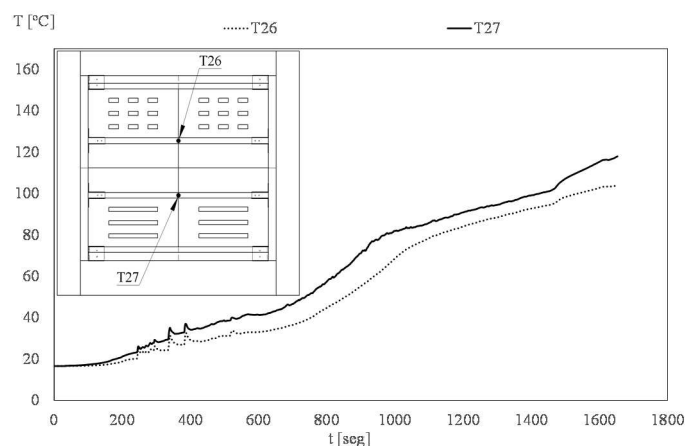


Figura 48: Temperaturas das vigas.

4.6.2 Velocidade de carbonização da laje 1

A redução da secção resistente da laje deve-se à formação da camada carbonizada, função da velocidade de carbonização. A determinação da velocidade do avanço da carbonização é um parâmetro importante que permite verificar a resistência ao fogo das estruturas de madeira. Nas lajes em estudo, existem zonas da face exposta ao fogo com diferentes perfurações (células 1, 2 e 3), que originam velocidades de carbonização diferentes.

Para avaliar a influência do tipo de perfuração, adotou-se um processo de medição através de vários cortes realizados na placa de teto, coincidentes com as perfurações, nos quais foram efetuadas medições da espessura de carbonização em pontos específicos, como exemplificado na Figura 49. Em cada corte foram considerados 11 pontos para medição, identificados com as letras de **a** até **k**.

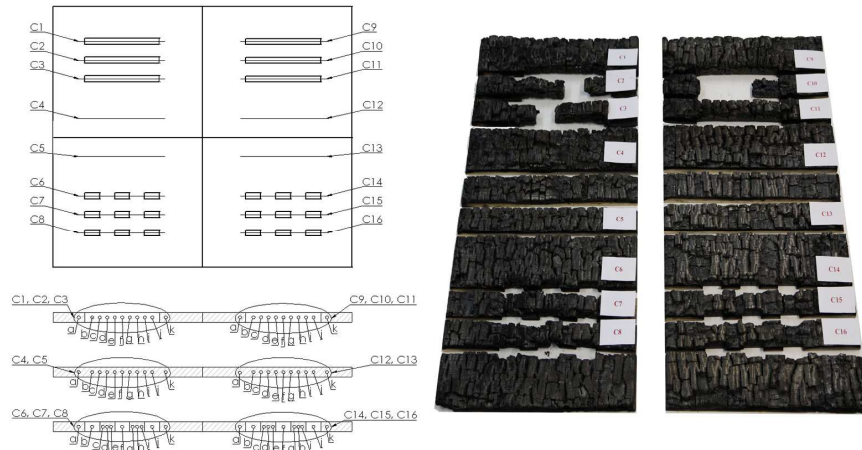


Figura 49: Localização dos cortes e pontos de medição, laje 1.

O registro dos valores da espessura carbonizada foi efetuado sempre com o mesmo método de leitura, de forma a garantir a consistência dos resultados. Através do uso de uma régua milimétrica colocada junto ao corte da madeira, são efetuados sempre dois registros fotográficos, o primeiro com a camada carbonizada e madeira residual, e o segundo apenas com a madeira residual. Este processo é repetido para cada um dos dezasseis cortes executados na placa de teto. Os resultados relativos à espessura da madeira carbonizada, da zona de influência das perfurações com maior dimensão, célula 3, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de medição dos cortes C1, C2, e C3, exemplificados na Figura 50 e apresentados na Tabela 6, em conjunto com os cortes C9, C10 e C11, Figura 51, e apresentados na Tabela 7.

Tabela 6: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1, C2 e C3

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1		28	22	22	22	22	22	22	22	22	22	32
C2		28	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
C3		29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Média		28,3	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	32,0
D. Padrão		0,6	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,0

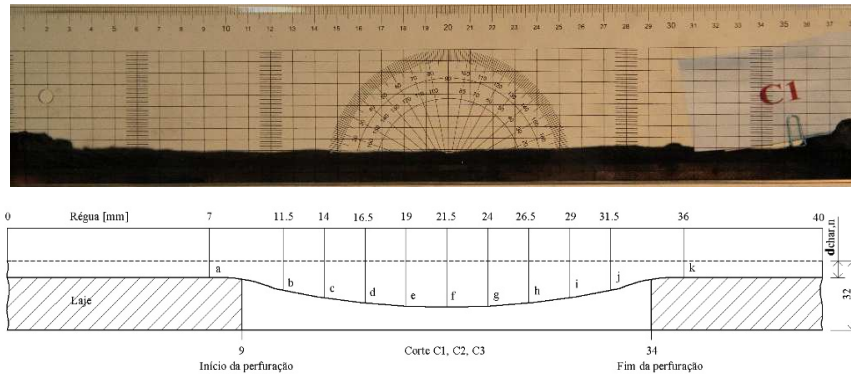


Figura 50: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.

Tabela 7: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9, C10 e C11

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9		32	25	25	25	25	25	25	25	25	25	23
C10		32	32	32	32	32	32	32	32	31	31	26
C11		27	32	32	32	32	32	32	32	32	30	26
Média		30,3	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,3	28,7	25,0
D. Padrão		2,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,8	3,2	1,7

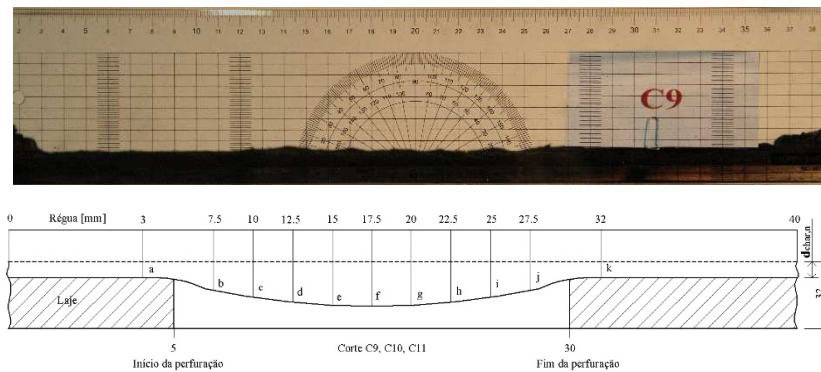


Figura 51: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.

Na célula 2, zona da placa sem perfurações, os resultados referentes à espessura da madeira carbonizada, são obtidos através da medição nos cortes C4 e C5, Figura 52, apresentados na Tabela 8, e dos cortes C12 e C13 Figura 53, apresentados na Tabela 9.

Tabela 8: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C4 e C5

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C4	18	18	20	21	21	17	17	17	17	17	18	18
C5	16	19	19	18	17	17	17	17	19	17	19	20
Média	17,0	18,5	19,5	19,5	19,0	17,0	17,0	17,0	18,0	17,0	18,5	19,0
D. Padrão	1,4	0,7	0,7	2,1	2,8	0,0	0,0	1,4	0,0	0,7	1,4	1,4

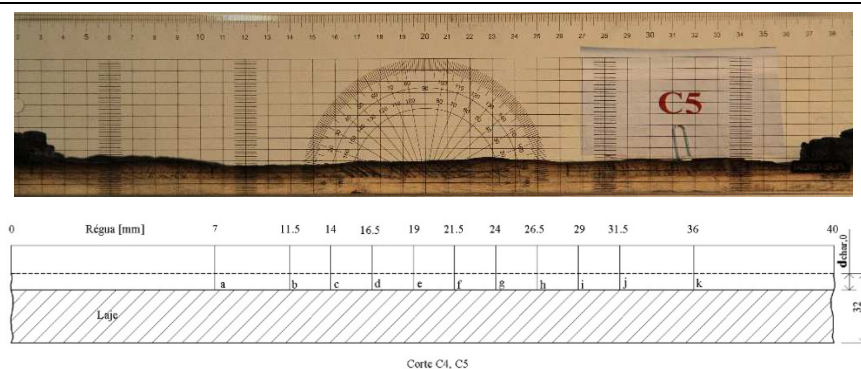


Figura 52: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.

Tabela 9: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C12 e C13

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C12	16	16	16	16	16	17	18	16	16	16	15	17
C13	16	15	16	18	17	15	16	15	16	16	16	16
Média	16,0	15,5	16,0	17,0	16,5	16,0	17,0	15,5	16,0	16,0	15,5	16,5
D. Padrão	0,0	0,7	0,0	1,4	0,7	1,4	1,4	0,7	0,0	0,7	0,7	0,7

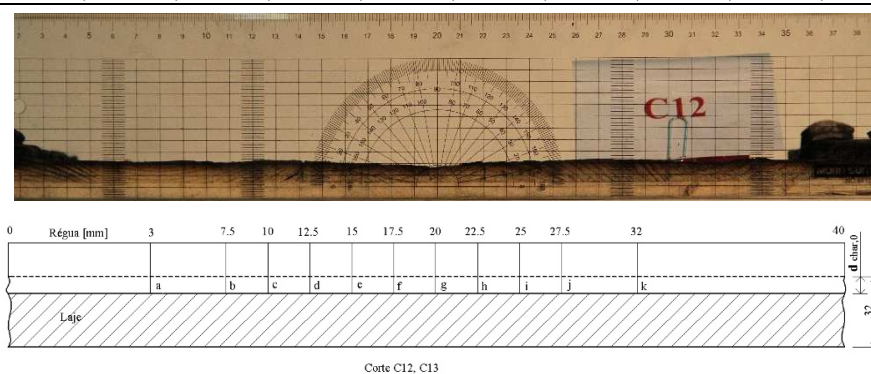


Figura 53: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.

Os resultados da espessura da madeira carbonizada, na zona de influência das perfurações de menor dimensão, célula 1, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de medição dos cortes C6, C7, e C8 Figura 54, apresentados na Tabela 10, e dos cortes C14, C15 e C16 Figura 55, apresentados na Tabela 11.

Tabela 10: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C6, C7 e C8

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C6	21	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	24
C7	21	32	32	32	32	32	32	28	26	25	29	26
C8	22	29	32	32	32	32	32	29	28	29	30	26
Média	21,3	28,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	27,3	26,3	26,3	28,0	25,3
D. Padrão	0,6	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	2,1	1,5	2,3	2,6	1,2

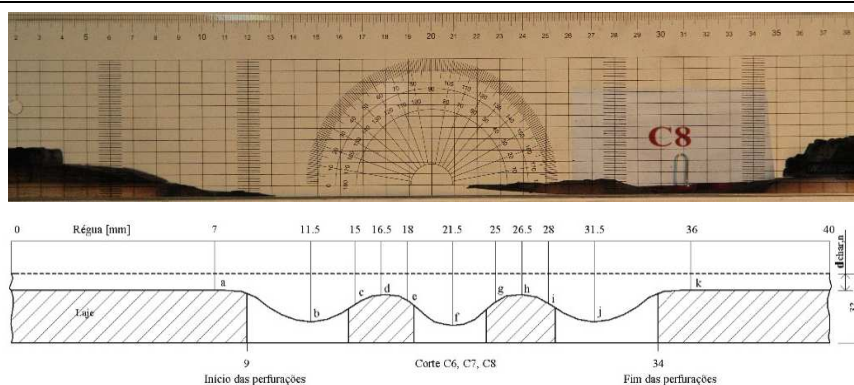


Figura 54: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.

Tabela 11: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C14, C15 e C16

Corte	Madeira carbonizada [mm]										
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
C14	17	25	24	22	25	25	22	18	19	24	20
C15	18	27	25	25	25	27	25	22	24	26	18
C16	17	26	25	25	25	26	25	25	25	27	20
Média	17,3	26,0	24,7	24,0	25,0	26,0	24,0	21,7	22,7	25,7	19,3
D. Padrão	0,6	1,0	0,6	1,7	0,0	1,0	1,7	3,5	3,2	1,5	1,2

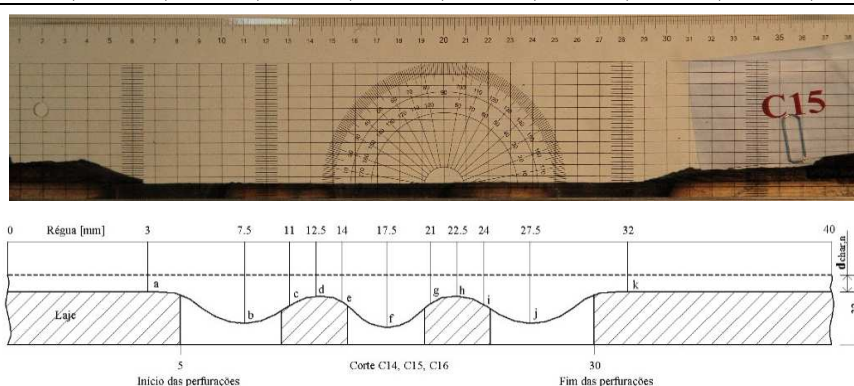


Figura 55: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.

A velocidade de carbonização calculada para as três células da laje1 é de 1,2 [mm/min], 0.65 [mm/min] e 1 [mm/min] respectivamente para a célula 3, 2 e 1. O cálculo foi feito com base na equação 13 apresentada no capítulo 2, considerando 25 [min] de tempo total de ensaio, que engloba a fase de aquecimento e arrefecimento. Os valores apresentados são a média da

velocidade de carbonização do conjunto de cortes de cada uma das três zonas da laje, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Velocidades de carbonização da laje 1

Células Identificação	Cortes Identificação	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	C1, C2 e C3	1.2	1.2
	C9, C10 e C11	1.2	
2	C4 e C5	0.7	0.65
	C12 e C13	0.6	
1	C6, C7 e C8	1.1	1
	C14, C15 e C16	0.9	

O gráfico da Figura 56, compara os valores obtidos, verificando-se que a velocidade de carbonização é maior na célula 3, seguida da célula 1 e por fim na célula 2. Estas diferenças podem ser explicadas pelo tamanho das perfurações.

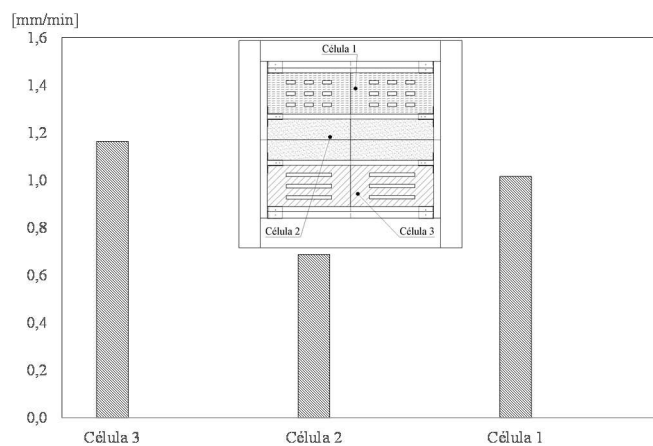


Figura 56: Velocidades de carbonização, laje 1.

4.6.3 Comportamento térmico da Laje 2

De seguida são apresentados os resultados experimentais relativos à laje 2. O registo desses resultados é feito em função da leitura de cada termopar, bem como dos critérios de desempenho, estanquidade e isolamento para a validação deste trabalho. Este ensaio teve uma duração ligeiramente inferior ao da laje 1, tendo sido utilizado um único queimador do forno, garantindo as mesmas condições de ensaio. Analisando o gráfico da Figura 57, verifica-se que

o ensaio decorreu durante 950 [s], tendo atingido 980 [°C] como temperatura máxima no interior do forno. O queimador desligou-se aos 442 [s].

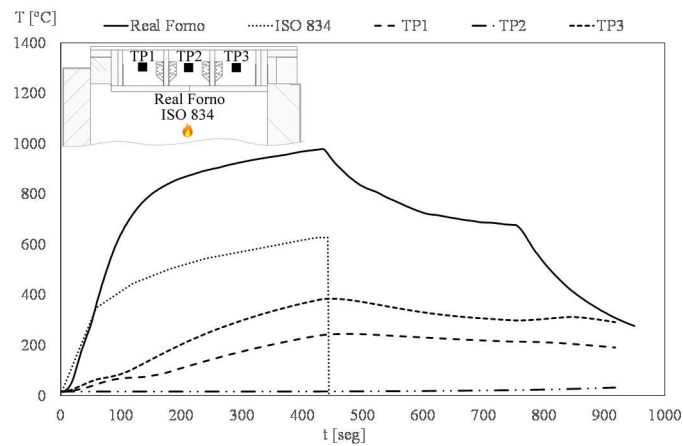


Figura 57: Temperaturas das células, ISO 834 e interior do forno.

Tal como na aconteceu na laje 1, a opção de desligar o forno mais cedo, permite verificar a camada carbonizada e quantificar a velocidade de carbonização. A partir do instante em que o ensaio termina, a temperatura do forno baixa consideravelmente. As temperaturas registadas no interior de cada célula seguem proporcionalmente o aquecimento no interior do forno, verificando-se que as temperaturas mais elevadas são registadas na célula 3 (TP3), onde se encontram as perfurações com maiores dimensões, seguida da célula 1 (TP1) e por último, com as temperaturas mais baixas, a célula 2 (TP2), sem qualquer tipo de perfurações. O gráfico da Figura 58 representa a evolução da temperatura nos conetores, acessórios responsáveis pelo acoplamento dos vários componentes.

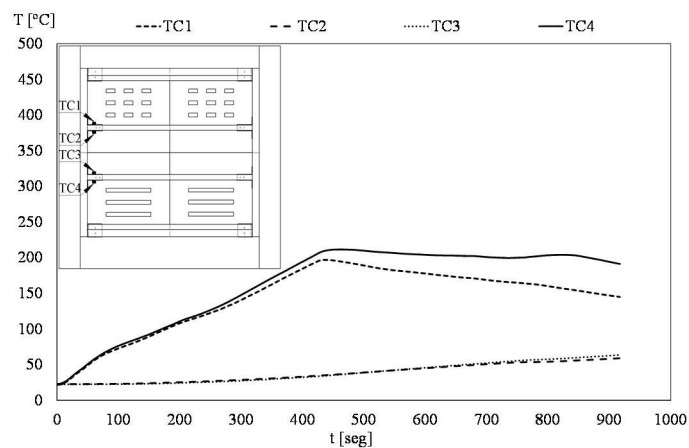


Figura 58: Temperaturas nos conetores.

Os conetores da laje nas células 1 e 3, TC1 e TC4 respetivamente, são os que estiveram sujeitos a temperaturas mais elevadas, pelo facto destas células conterem as perfurações. Consequentemente, os conetores TC2 e TC3 que se situam na célula 2, sem perfurações, registaram temperaturas significativamente mais baixas, quando comparadas com o conetor situado na célula 3. Esta situação representa o efeito das perfurações neste tipo de estruturas, mas, de acordo com a norma (EN1993-1-2 2005), as temperaturas registadas, podem afetar ligeiramente as propriedades mecânicas de resistência ao fogo, em particular o módulo de elasticidade do aço. Analisando as temperaturas registadas na face não exposta ao fogo, apresentadas no gráfico da Figura 59, verifica-se que qualquer dos seis termopares, T11, T31, T21, T32, T22 e T21 aí instalados, de acordo com a norma (EN1634-1 2000), para cálculo das temperaturas máximas, médias e mínimas, não ultrapassam o incremento máximo de 180 [°C] em relação à temperatura inicial de ensaio, pelo que se verifica a resistência da laje quanto ao critério de isolamento. (EN1363-1 1999).

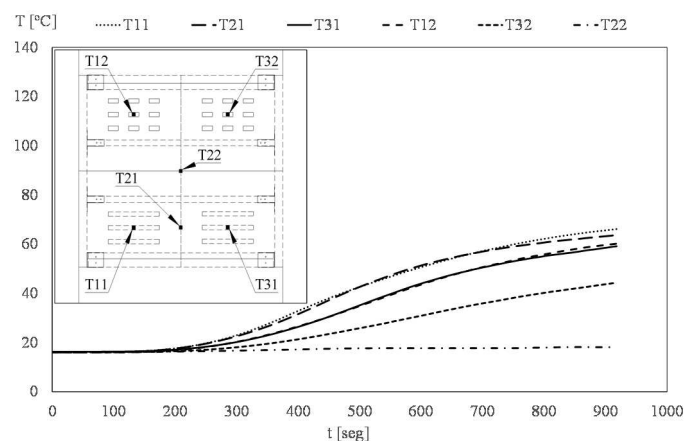


Figura 59: Temperaturas na face não exposta.

As temperaturas registadas na laje, deveriam ter um comportamento de simetria. Tal não acontece, quando se comparam as curvas de temperaturas do termopar T32 com o T12 e do T31 com o T11, em ambas as situações, as temperaturas dos termopares que estão do lado esquerdo, T11 e T12 são mais elevadas, fenómeno que está relacionado com o facto de se encontrar em funcionamento um único queimador, (nº4). Como já foi referido na análise dos gráficos anteriores, também aqui está bem evidente a influência das perfurações, verificando-se as temperaturas mais elevadas na zona da célula 3, (perfurações de maiores dimensões) e as temperaturas mais baixas na zona da célula 2, sem perfurações. Como aconteceu na laje 1,

também neste ensaio se fez o registo termográfico, de uma parcela de área pertencente à face não exposta, situada no centro da zona de influência da célula 3, ver Figura 60.

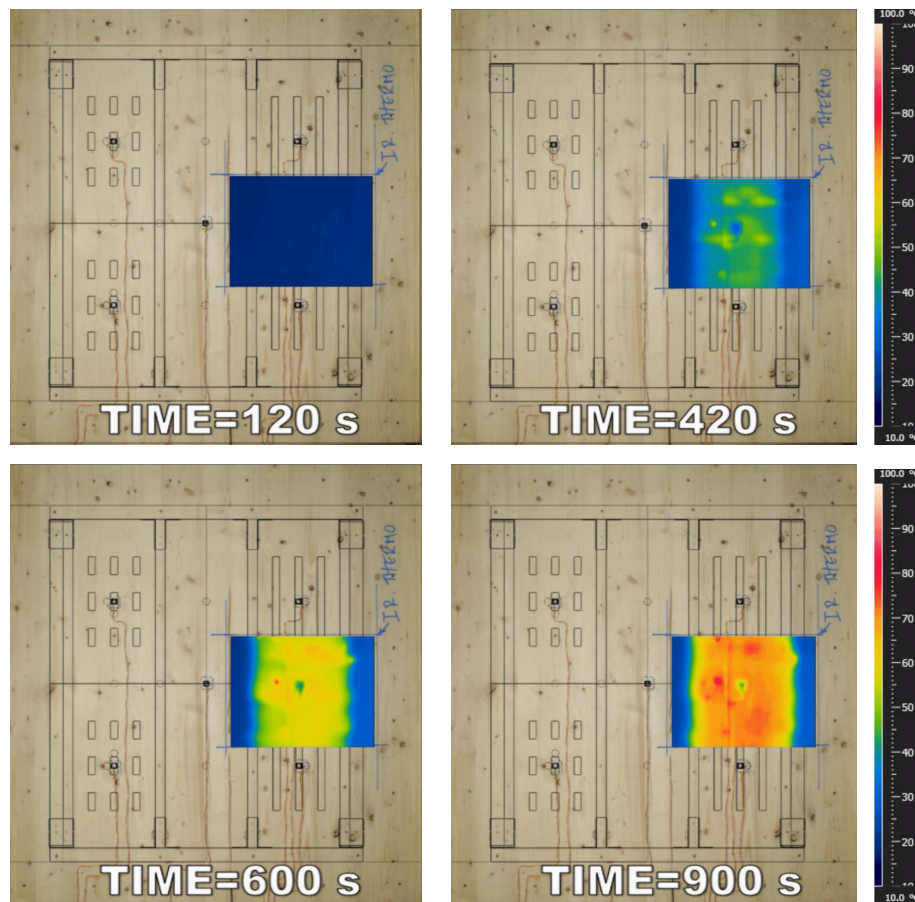


Figura 60: Aquisição do conjunto de temperaturas por termografia IR.

Analisando o gráfico da Figura 61, referente à evolução das temperaturas, máxima, média e mínima, registadas na referida área, verifica a resistência da laje quanto ao critério de isolamento. (EN1363-1 1999).

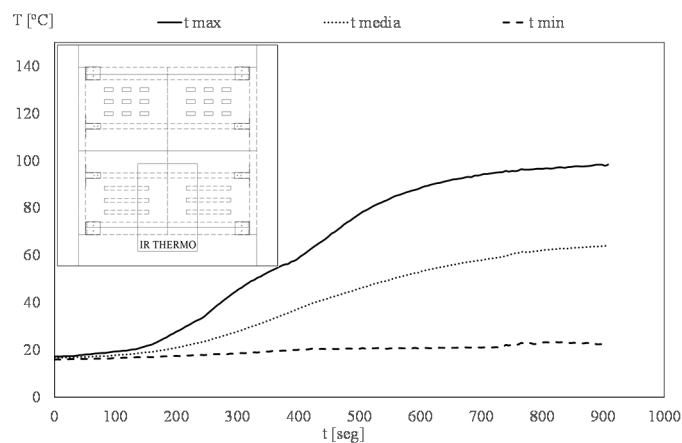


Figura 61: Temperaturas registadas através da captura termográfica.

Seguindo o mesmo método de análise de resultados, adotado na laje 1, foram determinadas as curvas de temperatura máxima, média e mínima, com base nos termopares instalados na placa de pavimento, e comparadas com as curvas de temperaturas registadas através da câmara termográfica, ver Figura 62. Verificar-se que todas as curvas têm o mesmo comportamento. No entanto, as registadas na área relativa à aquisição termográfica são ligeiramente superiores, situação relacionada com o facto de que as temperaturas máximas, médias e mínimas obtidas através dos termopares da face não exposta, terem a influência das várias perfurações e as obtidas através da câmara termográfica, só terem a influência das perfurações da célula 3 com perfurações de maiores dimensões.

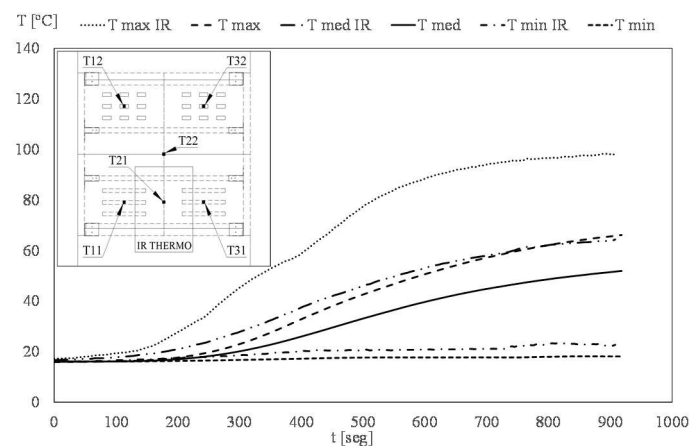


Figura 62: Comparação das temperaturas, captura termográfica e face não exposta.

As Figura 63, Figura 64 e Figura 65, representam as temperaturas registadas nas zonas das células 1, 2 e 3 respetivamente. Verifica-se que as temperaturas mais elevadas correspondem à célula 3, seguida da célula 1 e por fim da célula 2.

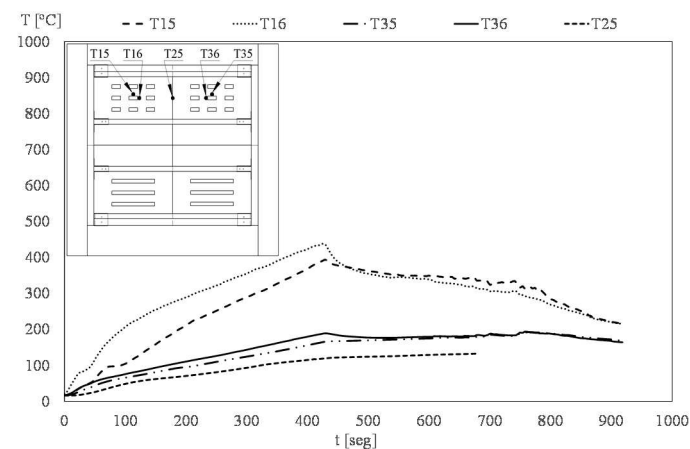


Figura 63: Temperaturas da Célula 1.

Analisando as curvas de temperaturas dos termopares T25 e T24, Figura 63 e Figura 65, das células 1 e 3 respectivamente, registam as menores temperaturas, devido à distância a que se encontram das perfurações.

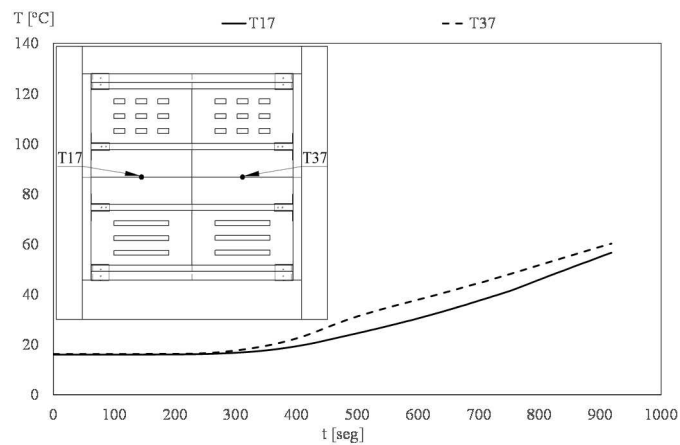


Figura 64: Temperaturas da Célula 2.

Atendendo à localização do queimador em funcionamento (nº 4), como acontece no ensaio da laje 1 e pela mesma razão, em qualquer dos gráficos das Figura 63, Figura 64 e Figura 65, células 1, 2 e 3 respectivamente, verifica-se que as temperaturas não são simétricas.

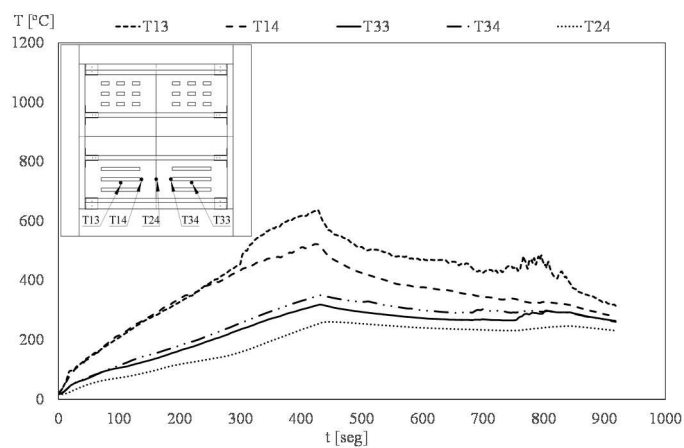


Figura 65: Temperaturas da Célula 3.

O gráfico da Figura 66 representa a evolução das temperaturas dos termopares localizados na interface das vigas com a placa de teto, T26 e T27. Como acontece na laje 1, as perfurações da célula 3 não oferecem tanta resistência à propagação do incêndio quando

comparadas com a célula 1, uma vez que o termopar T27 é o que regista maiores temperaturas, devido à proximidade com a célula 3.

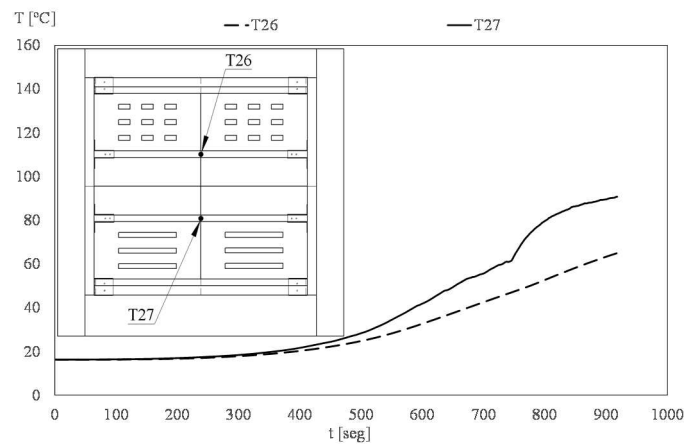


Figura 66: Temperaturas das vigas.

4.6.4 Velocidade de carbonização, laje 2

O método para a medição da espessura carbonizada da laje 2, é o mesmo que foi adotado para a laje 1. Na Figura 67 estão representados os cortes e pontos de medição utilizados.

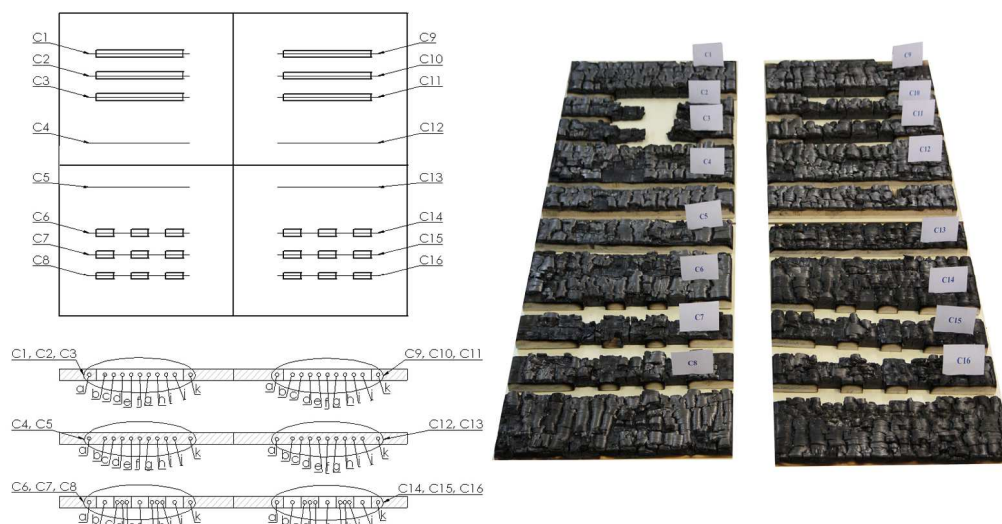


Figura 67: Localização dos cortes e pontos de medição, laje 2.

Os resultados da espessura da madeira carbonizada, na zona de influência das perfurações de maior dimensão célula 3, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de

medição dos cortes C1, C2, e C3, exemplificados na Figura 68 e apresentados na Tabela 13, em conjunto com os cortes C9, C10 e C11 Figura 69, apresentados na Tabela 14.

Tabela 13: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1, C2 e C3

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1	14	17	17	17	17	17	16	17	17	17	18	14
C2	14	29	29	29	32	32	32	32	32	32	32	14
C3	14	27	29	32	32	32	32	32	32	32	32	14
Média	14,0	24,3	25,0	26,0	27,0	27,0	26,7	27,0	27,0	27,0	27,3	14,0
D. Padrão	0,0	6,4	6,9	7,9	8,7	8,7	9,2	8,7	8,7	8,7	8,1	0,0

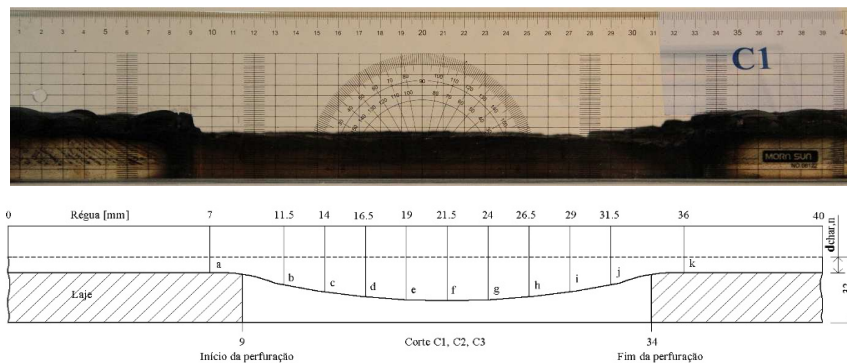


Figura 68: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.

Tabela 14: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9, C10 e C11

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9	13	16	19	22	20	20	19	18	17	18	18	13
C10	10	26	27	26	26	26	25	19	19	18	20	11
C11	12	26	26	26	26	26	26	19	19	20	20	11
Média	11,7	22,7	24,0	24,7	24,0	23,7	19,0	18,7	18,7	18,3	19,3	11,7
D. Padrão	1,5	5,8	4,4	2,3	3,5	3,2	0,0	0,6	1,5	1,2	1,2	1,2

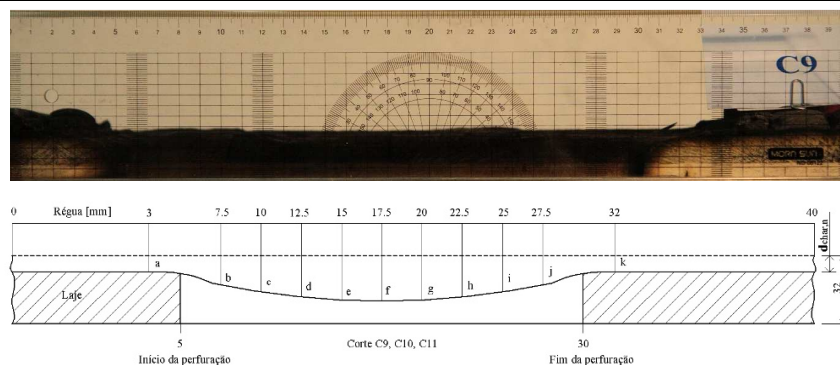


Figura 69: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.

Na célula 2, zona da laje sem perfurações, os resultados da espessura carbonizada, são obtidos através dos pontos de medição nos cortes C4 e C5 Figura 70 e Tabela 15, em conjunto com os cortes C12 e C13 Figura 71 e apresentados na Tabela 16.

Tabela 15: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C4 e C5

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C4	10	10	9	14	12	12	12	10	12	10	9
C5	11	13	15	12	13	14	16	17	14	12	9
Média	10,5	11,5	12,0	13,0	12,5	13,0	14,0	13,5	13,0	11,0	9,0
D. Padrão	0,7	2,1	4,2	1,4	0,7	1,4	2,8	4,9	1,4	1,4	0,0

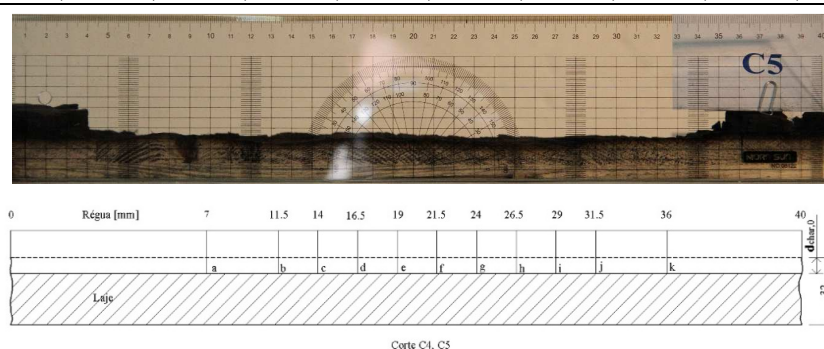


Figura 70: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.

Tabela 16: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C12 e C13

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C12	10	12	14	13	12	12	12	10	10	9	12
C13	13	14	15	16	13	13	14	14	13	13	13
Média	11,5	13,0	14,5	14,5	12,5	12,5	13,0	12,0	11,5	11,0	12,5
D. Padrão	2,1	1,4	0,7	2,1	0,7	0,7	1,4	2,8	2,1	2,8	0,7

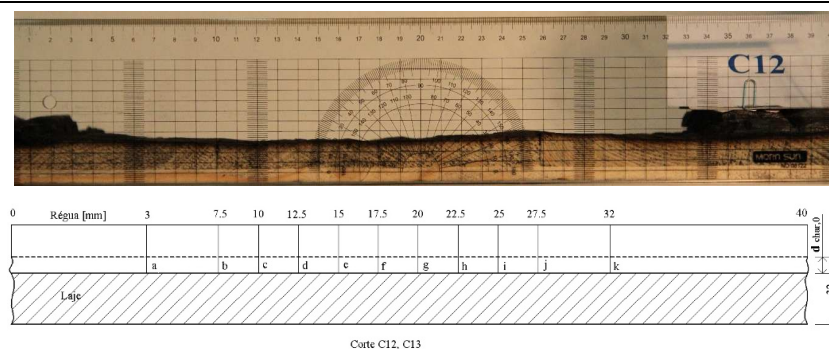


Figura 71: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.

Por último, os resultados da espessura carbonizada na zona de influência das perfurações de menor dimensão, célula 1, são obtidos através dos pontos de medição nos cortes C6, C7, e

C8 Figura 72, apresentados na Tabela 17, em conjunto com os cortes C14, C15 e C16 Figura 73, Tabela 18.

Tabela 17: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C6, C7 e C8

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C6	14	19	17	14	16	18	18	15	16	17	10	
C7	14	24	15	24	24	24	18	15	18	18	10	
C8	14	24	19	15	17	24	18	12	14	19	10	
Média	14,0	22,3	17,0	17,7	19,0	22,0	18,0	14,0	16,0	18,0	10,0	
D. Padrão	0,0	2,9	2,0	5,5	4,4	3,5	0,0	1,7	2,0	1,0	0,0	

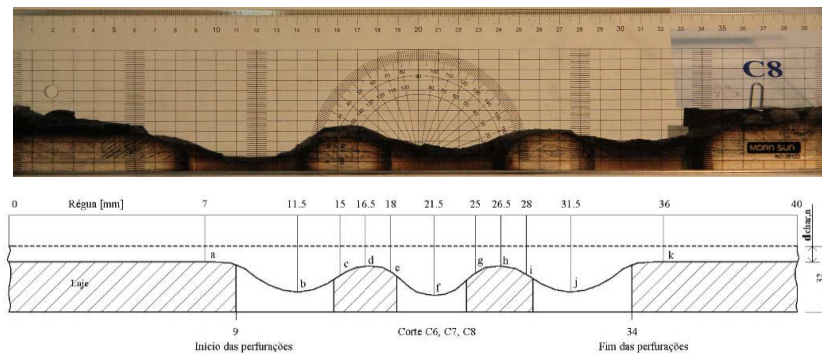


Figura 72: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.

Tabela 18: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C14, C15 e C16

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C14	12	19	14	13	14	17	15	12	14	17	15	
C15	12	19	9	8	14	19	15	12	13	22	15	
C16	12	22	12	13	13	22	14	12	13	21	14	
Média	12,0	20,0	11,7	11,3	13,7	19,3	14,7	12,0	13,3	20,0	14,7	
D. Padrão	0,0	1,7	2,5	2,9	0,6	2,5	0,6	0,0	0,6	2,6	0,6	

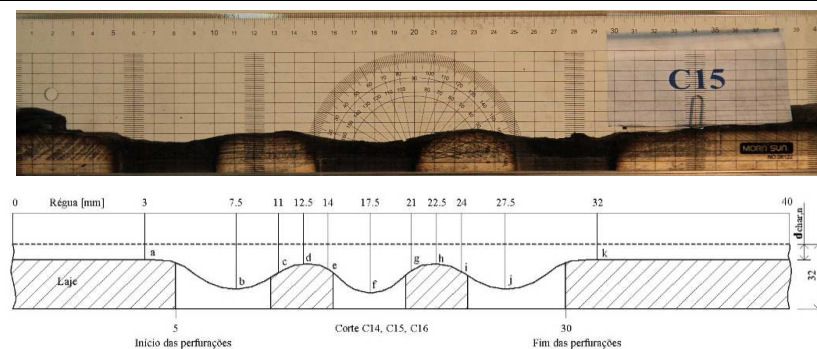


Figura 73: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.

A velocidade de carbonização calculada para as três zonas da laje 2, é de 1,4 [mm/min], 0,8 [mm/min] e 1 [mm/min] respectivamente para a célula 3, 2 e 1. O cálculo foi feito com base na equação 13 apresentada, considerando 16 minutos no tempo total de ensaio, que engloba a fase de aquecimento e arrefecimento. Os valores apresentados são a média da velocidade de carbonização do conjunto de cortes de cada uma das três zonas da laje, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Velocidades de carbonização da laje 2

Células Identificação	Cortes Identificação	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	C1, C2 e C3	1.5	1.4
	C9, C10 e C11	1.3	
2	C4 e C5	0.8	0.8
	C12 e C13	0.8	
1	C6, C7 e C8	1.1	1
	C14, C15 e C16	0.9	

Analisando a gráfico da Figura 74, que compara os valores obtidos, verifica-se que a velocidade de carbonização é maior na célula 3, seguida na célula 1 e por fim na célula 2. Estas diferenças podem ser explicadas pelo tamanho das perfurações, situação idêntica à laje 1.

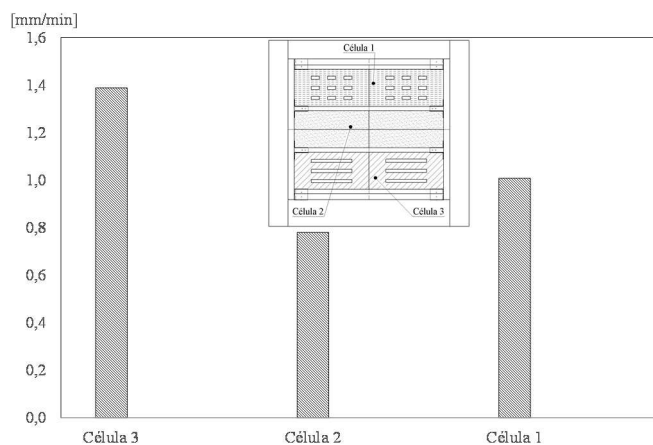


Figura 74: Velocidades de carbonização, laje 2.

Capítulo 5

Simulação numérica

5 Simulação numérica

O método dos elementos finitos é um método numérico muito utilizado para a solução de problemas da mecânica dos meios contínuos e na resolução de problemas térmicos, entre outras áreas de aplicação. Um dos objetivos da análise térmica é a resolução de problemas para a determinação de campos de temperatura. Em vários domínios da Engenharia é necessária a análise do comportamento térmico de materiais ou componentes, de forma a garantir a segurança e estabilidade estrutural. Neste capítulo será utilizado o método dos elementos finitos, com recurso a um programa de cálculo numérico avançado, Ansys, que permitirá a análise da resistência ao fogo das lajes em estudo. Este tipo de análise implica, para além da caracterização da ação térmica, o conhecimento da variação das propriedades térmicas do material com a temperatura, bem como a resolução de um problema de transferência de calor, num domínio com condições fronteira bem conhecidas. No presente trabalho, e para a análise numérica em estudo, foi construído um modelo tridimensional com dimensões e geometria idênticas aos modelos de laje experimentais. Na Figura 75, representa-se o modelo geométrico com a localização das três células.

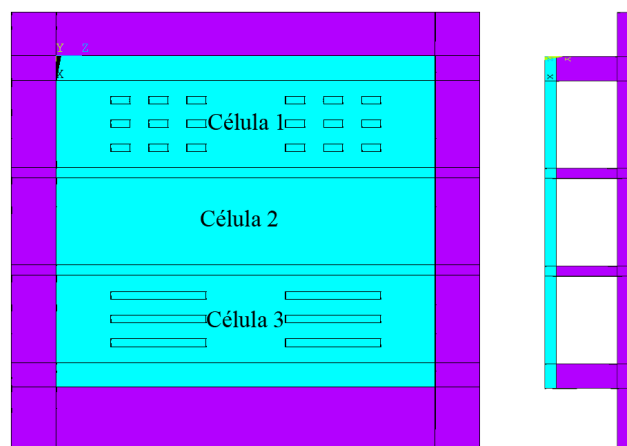


Figura 75: Modelo tridimensional para as lajes 1 e 2.

A análise do comportamento térmico da laje foi feito com base na evolução das temperaturas obtidas em vinte e três pontos para cada um dos modelos em análise, os mesmos que foram utilizados nos ensaios experimentais, com a exceção dos localizados nos conetores (TC1, TC2, TC3 e TC4), apesar de serem analisados experimentalmente, não fazem parte do modelo numérico. A designação dos pontos é igual à usada nos ensaios experimentais de forma a facilitar a comparação dos resultados.

5.1 Malha de elementos finitos

O modelo numérico utiliza elementos hexaédricos do tipo SOLID70 de 8 nós, cada nó possui um grau de liberdade. A malha é regular, tendo sido efetuados diferentes testes de convergência para determinar o tamanho adequado. Na Figura 76 está representado o modelo de elementos finitos da laje, sem representação de duas das vigas da armadura exterior. A malha apresentada é constituída por 127696 elementos finitos e 160917 nós, e será utilizada nas simulações relativas às duas lajes em estudo.

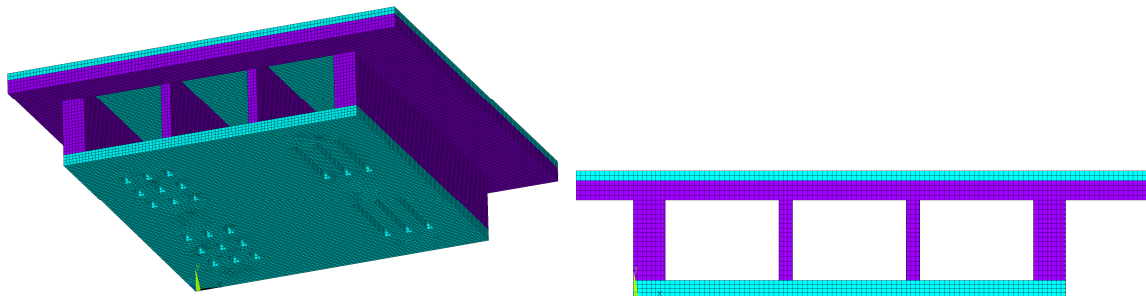


Figura 76: Malha de elementos finitos, elementos sólidos de 8 nós.

5.2 Condições de ensaio

Para cada modelo numérico é calculado o perfil de temperaturas e a espessura de carbonização, para comparação com os resultados obtidos experimentalmente. O método de solução numérico, é transiente e não linear, função das propriedades do material em estudo. Inicialmente foi elaborado um estudo numérico preliminar das lajes, submetendo a face inferior à ação do fogo. De acordo com o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), a evolução da temperatura de um incêndio ao longo do tempo pode ser definida por curvas de incêndio normalizado, sendo esta condição, aplicada inicialmente na referida superfície. Posteriormente, e de acordo com o atraso da carbonização da placa de teto, na zona de cada célula (critério da temperatura crítica de 280-300°C), foram aplicadas três curvas diferentes de incêndio, (TP1, TP2 e TP3), que seguem parcialmente a curva ISO834, com um relativo atraso. Este estudo preliminar permitiu aferir o tempo de resistência ao fogo na face inferior da laje, sendo útil na fase experimental para determinar o tempo de ensaio. Nas condições enunciadas, e para se manter uma secção residual da placa de teto, o tempo de ensaio deverá ser inferior a 600 [s], conforme se verifica na Figura 77.

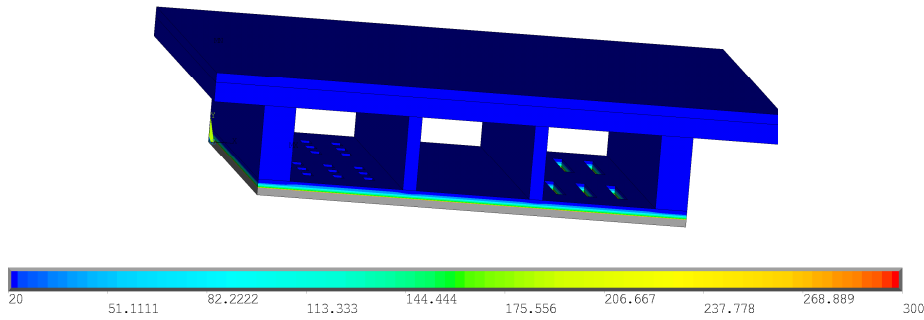


Figura 77: Secção residual (tempo=600 [s]), estudo preliminar.

Na análise das lajes 1 e 2, a duração da simulação foi de 1500s e 950s respetivamente, conforme o tempo de ensaio em laboratório. Este tempo, contempla a fase de aquecimento e a de arrefecimento do forno. Nestas análises foram adotadas as curvas de aquecimento determinadas nos ensaios experimentais, tendo sido consideradas condições fronteira de convecção e radiação, na face da laje exposta ao fogo. No instante inicial, o modelo foi considerado à temperatura ambiente de 16°C, e utilizado um coeficiente de convecção igual a 25W/m²K na superfície exposta ao fogo, 4W/m²K na superfície não exposta ao fogo e 25W/m²K nas paredes internas das células, ver Figura 78 e nas perfurações. Foi ainda considerado um fator de emissividade de 1 para a ação do fogo e um fator de emissividade de 0,8 para a madeira, conforme Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004).

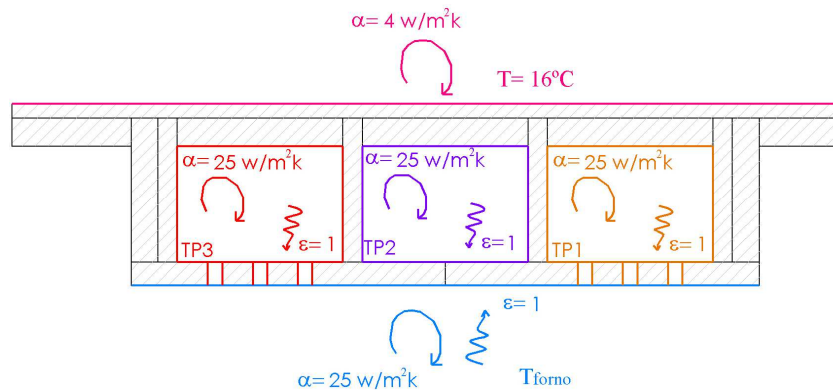


Figura 78: Condições fronteira do modelo das lajes 1 e 2.

Na Figura 79, estão representadas as curvas prescritas para a evolução da temperatura ambiente no interior das cavidades celulares, que foram as determinadas experimentalmente através da leitura de termopares de placa em cada célula (TP1, TP2 e TP3), durante os ensaios das lajes. Nas faces laterais das perfurações, quadrangulares e retangulares foram impostas estas mesmas curvas.

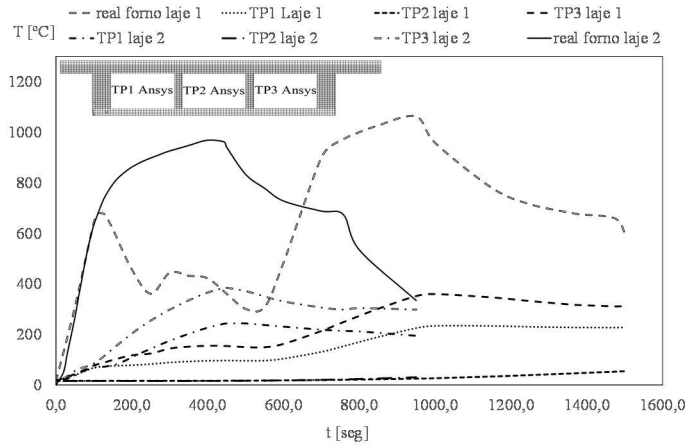


Figura 79: Curvas de temperatura utilizadas nas análises numéricas das lajes 1 e 2.

5.3 Comportamento térmico da laje 1

A análise numérica foi efetuada à laje 1 com uma duração de 1500 [s]. O método de solução é transiente não linear, tendo sido utilizado incrementos de tempo igual a 10 segundos. A solução foi obtida ao final 5,30 horas, com recurso a um CPU Intel Core 2Duo a 2,8GHz 6 GB de RAM. Na Figura 80, está representado o campo de temperaturas na laje 1 no último instante de tempo 1500 [s]. Pode verificar-se que a zona exposta ao fogo atinge temperaturas máximas e a célula com maiores perfurações aquece mais rapidamente. Na superfície não exposta da laje também se verificam temperaturas diferentes que dependem da dimensão das perfurações.

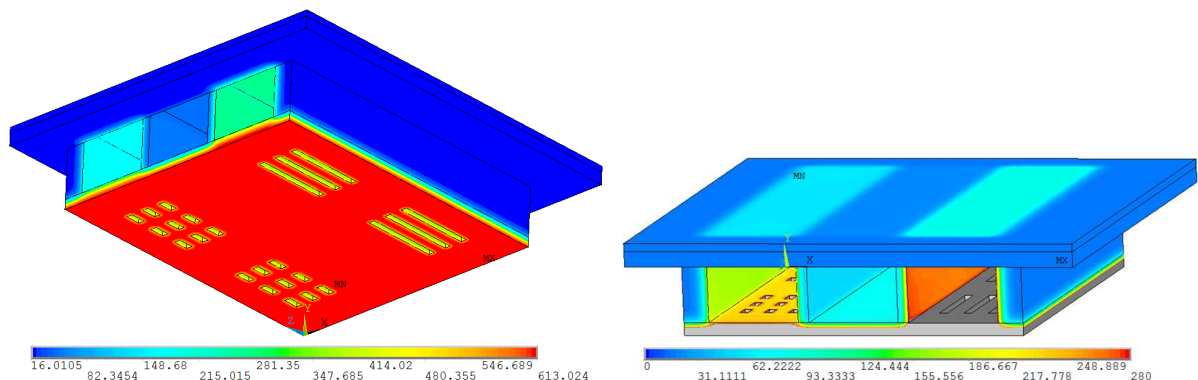


Figura 80: Laje 1; Esquerda - Temperaturas máximas, Direita - espessura carbonizada.

Os resultados dos campos de temperaturas numéricos, foram obtidos em regime transiente nas posições nodais idênticas às posições dos registos experimentais. No gráfico da Figura 81, está representada a evolução das curvas de temperatura, na face não exposta ao fogo (placa de pavimento). Verifica-se a influência de cada tipo de perfuração na evolução do incêndio. É na célula 3 que as temperaturas são mais elevadas, termopares T11, T21 e T31, sendo a temperatura intermédia registada na célula 1, com perfurações de menor dimensão e a temperatura mais baixa na célula 2 onde não existe qualquer perfuração. Verifica-se ainda uma simetria dos resultados entre o lado esquerdo e o lado direito.

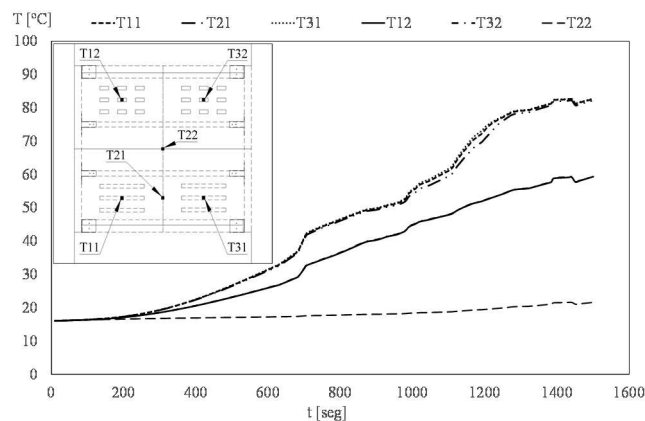


Figura 81: Temperaturas na face não exposta.

O gráfico da Figura 82 compara as temperaturas, máxima, média e mínima para numa parcela de área da placa de teto, com as registadas pela câmara termográfica no ensaio experimental. A área delimitada no modelo numérico tem as mesmas dimensões e localização do registo com a câmara termográfica, laje 1. As temperaturas apesar de não serem muito semelhantes para a fase intermédia do ensaio, seguem a mesma tendência e aproximam-se na fase final.

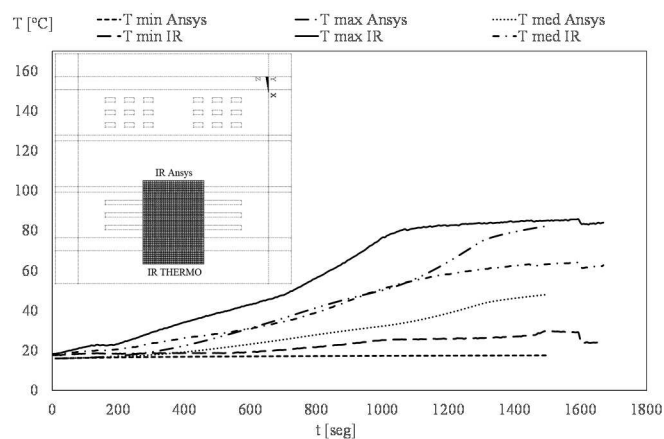


Figura 82: Temperaturas Ansys e captura termográfica.

Analisando a Figura 83, baseado no registo das temperaturas da célula 1, verifica-se que existe simetria nas temperaturas dos termopares T15 e T35, T16 e T36 e que o termopar T25, regista uma temperatura consideravelmente mais baixa, devido à distância a que se encontra das perfurações. O fenómeno da evaporação da humidade na madeira verifica-se através da inflexão apresentada pelas curvas, por volta dos 100 [°C].

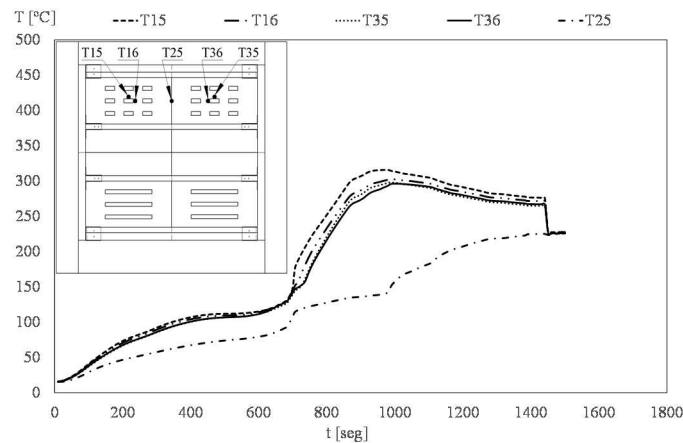


Figura 83: Temperaturas registadas na célula 1.

A Figura 84 representa as temperaturas na célula 3. Tal como acontece na célula 1, verifica-se que existe simetria entre os resultados T13 e T33, T14 e T34 e o ponto correspondente a T24 regista a temperatura mais baixa devido à distância a que se encontra das perfurações. Na fase final do ensaio, todas as curvas estão sobrepostas, pelo que indica que nesta zona a placa de teto poderá estar completamente carbonizada.

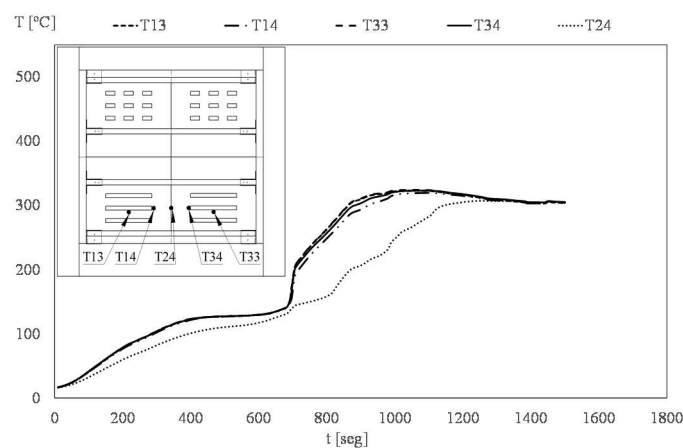


Figura 84: Temperaturas registadas na célula 3.

De acordo com a Figura 85, as temperaturas registadas na célula 2, são as mais baixas quando comparadas com as restantes. Verifica-se também uma simetria entre as temperaturas registadas por T17 e T37. Quando se comparam as curvas de temperaturas apresentadas nas Figura 83, 81 e 82 pode verificar-se facilmente que a dimensão das perfurações tem grande influência na evolução do incêndio.

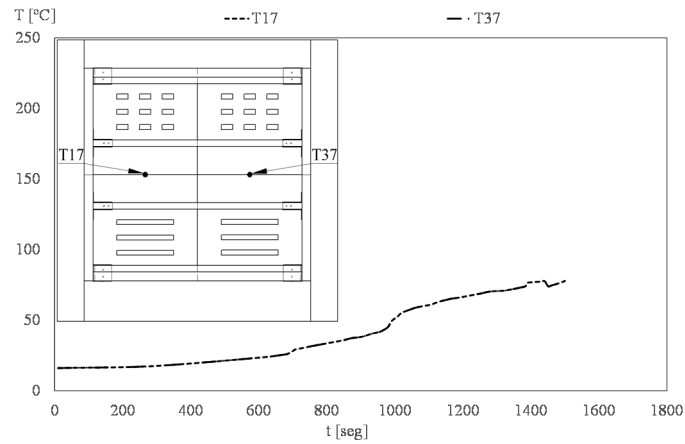


Figura 85: Temperaturas registadas na célula 2.

A Figura 86, representa a evolução da temperatura na face inferior das vigas. Verifica-se que as temperaturas são mais elevadas na viga junto à célula com maiores perfurações (T27).

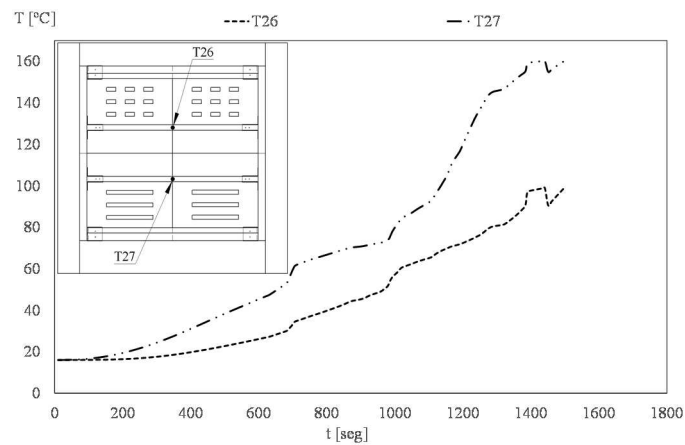


Figura 86: Temperaturas registadas nas vigas.

5.4 Velocidade de carbonização da laje 1

O cálculo da velocidade de carbonização, através do método numérico, seguiu os critérios adotados nos ensaios experimentais. Foram efetuadas medições nas mesmas zonas da laje experimental para leitura da espessura carbonizada.

A madeira é composta por uma mistura de celulose, hemicelulose e lignina, ligados numa rede complexa e quando é aquecida acima dos 280 [°C] provoca a sua decomposição ou pirólise (EWPA 2013). Assim sendo, foi imposto um critério para a determinação do limite de carbonização aos 280 [°C]. A madeira que se encontra a temperaturas superiores a este valor está totalmente carbonizada e a que se encontra a valores inferiores encontra-se intacta. As espessuras de carbonização foram obtidas no instante final de ensaio, 1500 [s], obtendo-se os seguintes resultados.

Os resultados referentes à espessura carbonizada, na zona de influência das perfurações de maior dimensão, célula 3, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de medição dos cortes C1, C2, e C3, exemplificados na Figura 87, apresentados na Tabela 20, em conjunto com os cortes C9, C10 e C11, Figura 88, Tabela 21.

Tabela 20: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1, C2 e C3

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1		16					32					16
C2		16					32					16
C3		16					32					16
Média		16,0					32,0					16,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0

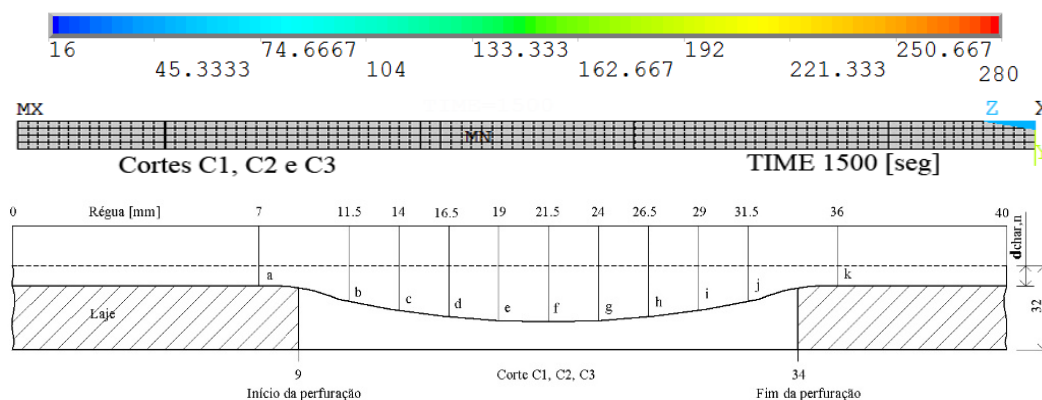


Figura 87: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.

Tabela 21: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9, C10 e C11

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9		16					32					16
C10		16					32					16
C11		16					32					16
Média		16,0					32,0					16,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0

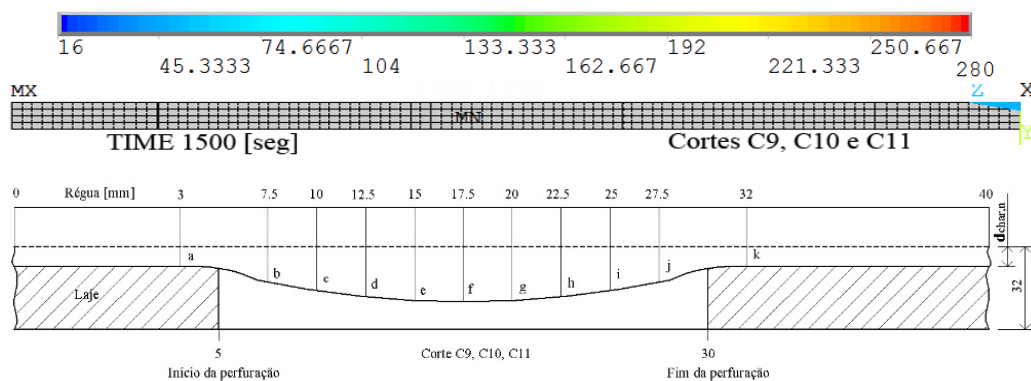


Figura 88: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.

No caso da célula 2, zona sem perfurações, os resultados referentes à espessura carbonizada, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de medição dos cortes C4 e C5, exemplificados na Figura 89 e apresentados na Tabela 22, em conjunto com os cortes C12 e C13, Figura 90, Tabela 23.

Tabela 22: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C4 e C5

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C4		16					16					16
C5		16					16					16
Média		16,0					16,0					16,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0

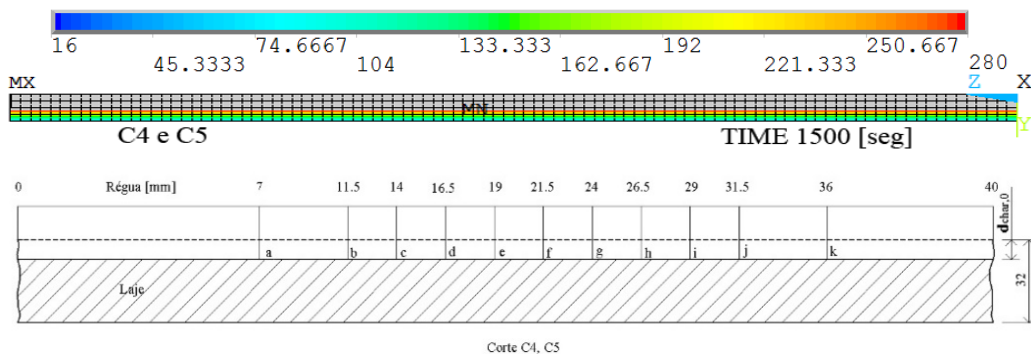


Figura 89: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.

Tabela 23: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C12 e C13

Corte	Madeira carbonizada [mm]										
Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C12	16					16					16
C13	16					16					16
Média	16,0					16,0					16,0
D. Padrão	0,0					0,0					0,0

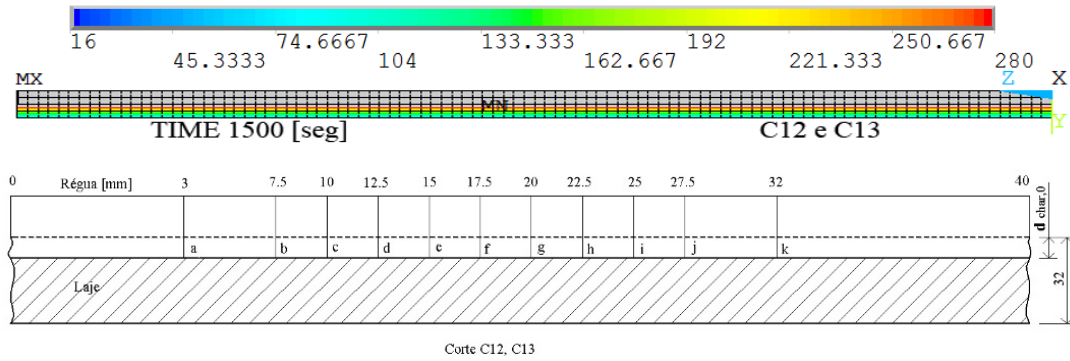


Figura 90: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.

Por último, são apresentados os resultados da espessura carbonizada relativos à zona de influência das perfurações de menor dimensão, célula 1. Os valores são obtidos através dos pontos de medição dos cortes C6, C7, e C8, exemplificados na Figura 91 e apresentados na Tabela 24, em conjunto com os cortes C14, C15 e C16, Figura 92, Tabela 25.

Tabela 24: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C6, C7 e C8

Corte	Madeira carbonizada [mm]										
Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C6	16	32		16		32		16		32	16
C7	16	32		16		32		16		31	16
C8	16	31		16		31		16		31	16
Média	16,0	31,7		16,0		31,7		16,0		31,3	16,0
D. Padrão	0,0	0,6		0,0		0,6		0,0		0,6	0,0

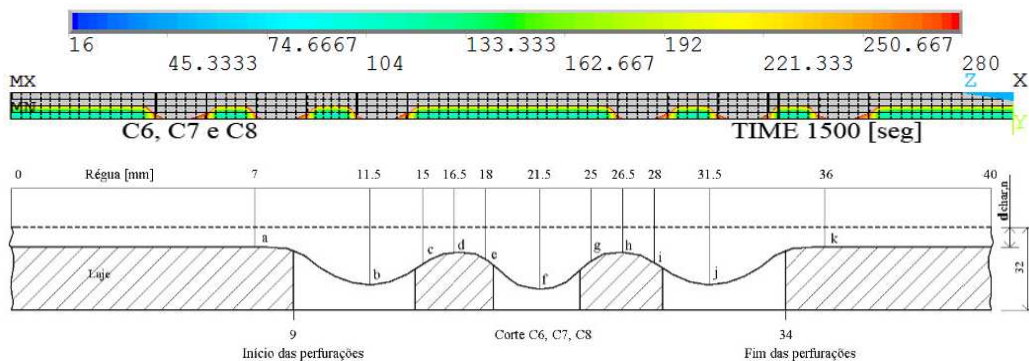


Figura 91: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.

Tabela 25: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C14, C115 e C16

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C14	16	32		16		32		16		32		16
C15	16	31		16		32		16		31		16
C16	16	31		16		32		16		31		16
Média	16,0	31,3		16,0		32,0		16,0		31,3		16,0
D. Padrão	0,0	0,6		0,0		0,0		0,0		0,6		0,0

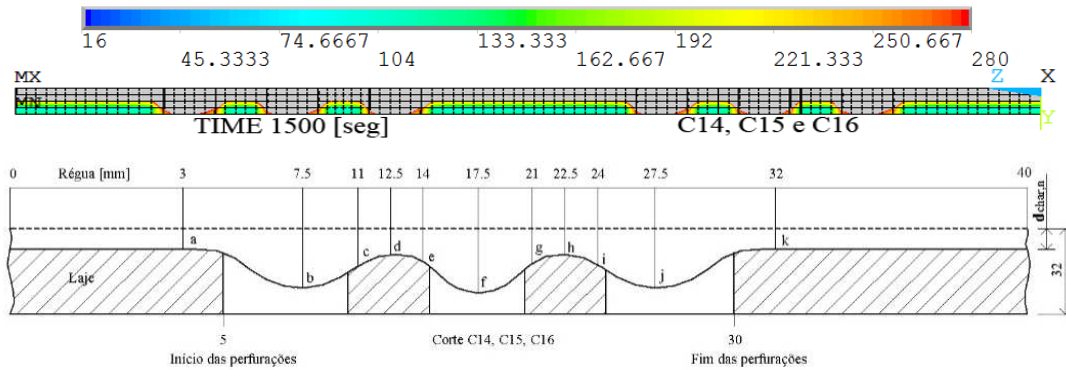


Figura 92: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.

A velocidade de carbonização calculada para as três zonas do modelo, célula 3, célula 2 e célula 1 são de 1,4 [mm/min], 1.0 [mm/min] e 1.3 [mm/min] respetivamente. O cálculo foi feito com base na equação 13 apresentada no capítulo 2 deste trabalho, considerando 1500 [s] de tempo total de ensaio, que engloba a fase de aquecimento e arrefecimento. Os valores apresentados são a média da velocidade de carbonização do conjunto de medições nas três zonas do modelo numérico, conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26: Velocidades de carbonização da laje 1, modelo numérico.

Células	Cortes	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	C1, C2 e C3	1.3	1.3
	C9, C10 e C11	1.3	
2	C4 e C5	1.0	1.0
	C12 e C13	1.0	
1	C6, C7 e C8	1.4	1.4
	C14, C15 e C16	1.4	

Comparando os valores obtidos para a velocidade de carbonização Figura 93, verifica-se que o maior valor acontece na célula 3, seguida na célula 1 e por fim na célula 2. Este facto está relacionado com o tamanho das perfurações.

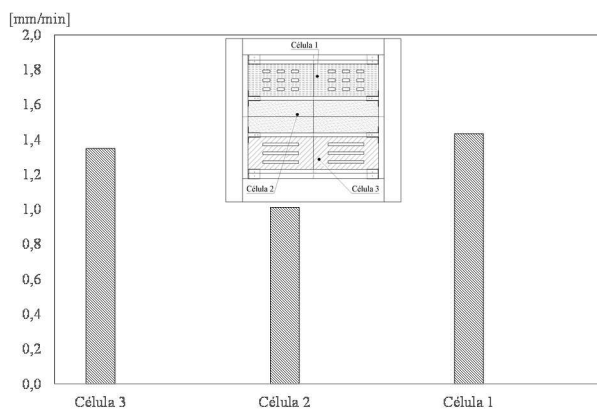


Figura 93: Velocidade de carbonização, laje 1, resultados numéricos.

5.5 Comportamento térmico da laje 2

A análise numérica efetuada à laje 2 teve uma duração de 950 [s], tendo sido utilizados incrementos de tempo de 10 [s]. O método de solução é transiente não linear, obtida ao final 4,15 horas, com recurso a um CPU Intel Core 2Duo a 2,8GHz 6 GB de RAM. A Figura 94 representa o campo de temperaturas para o último instante de tempo da análise. Aplicando o critério do limite de temperatura para a verificação da camada carbonizada na laje 2, verifica-se que a zona exposta ao fogo atinge o limite de resistência na célula com maiores perfurações. A célula não perfurada apresenta ainda resistência ao fogo nas suas paredes internas.

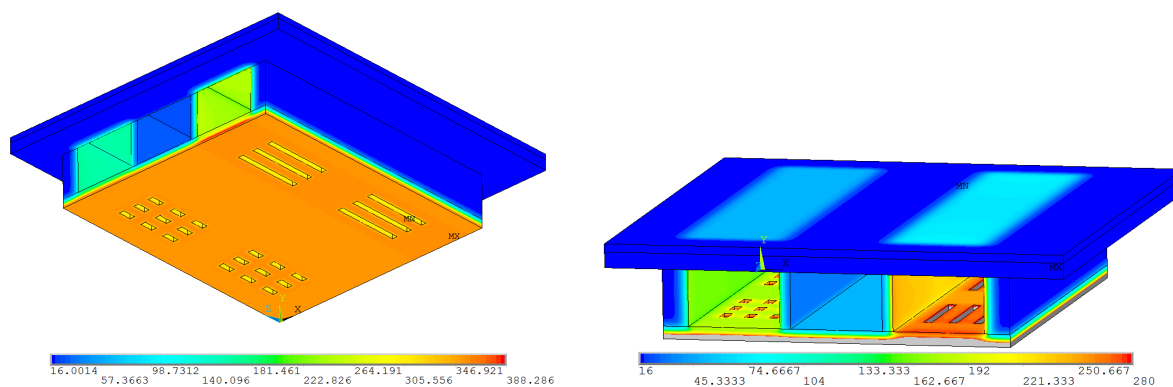


Figura 94: Laje 2; Esquerda - Temperaturas máximas, Direita - espessura carbonizada.

As curvas de temperaturas obtidas nesta análise, correspondem aos mesmos pontos de medição do modelo da laje 1. Na Figura 95, está representada a evolução da temperatura na face não exposta ao fogo (placa de pavimento). Tal como acontece para a laje 1, é na célula 3, onde as perfurações são maiores, que as temperaturas são mais elevadas, T11, T21 e T31. A

temperatura intermédia é registada na zona da célula 1, com perfurações de menor dimensão e a temperatura mais baixa é determinada na célula 2, onde não existe qualquer perfuração. Apesar das temperaturas registadas não serem muito altas, ainda assim verifica-se a influência das diferentes perfurações na evolução do incêndio.

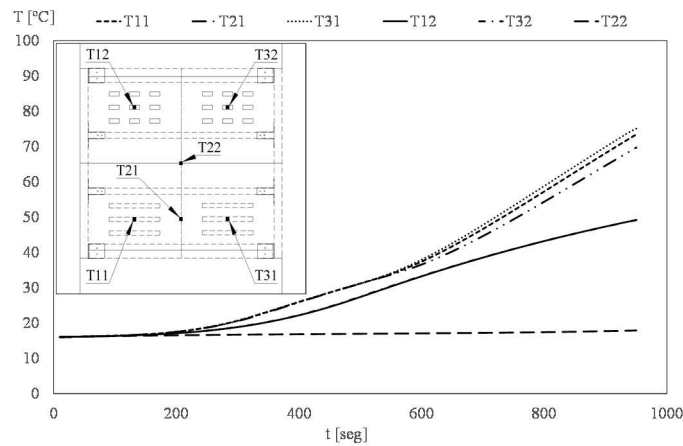


Figura 95: Temperaturas na face não exposta.

Tal como na laje 1, a Figura 96 compara as temperaturas, máxima, média e mínima, recolhidas numa parcela de área da placa de teto, com as temperaturas registadas pela câmara termográfica no ensaio experimental. Verifica-se que existe uma ligeira diferença, sendo que as curvas obtidas pela câmara termográfica apresentam valores superiores.

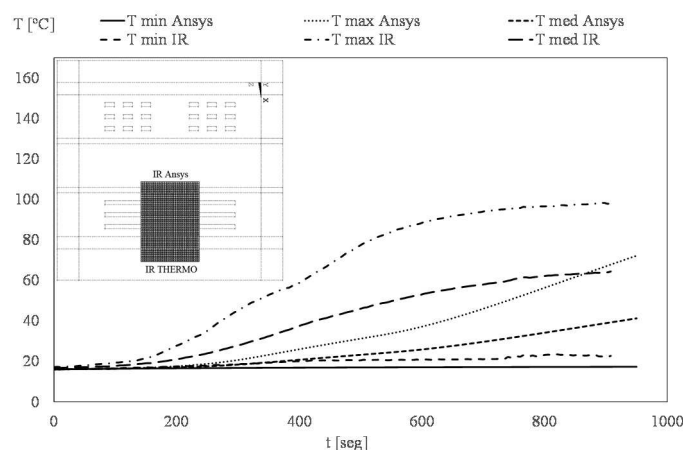


Figura 96: Temperaturas IR Ansys e IR THERMO (câmara termográfica).

Analisando o gráfico da Figura 97 referente às temperaturas registadas na célula 1, verifica-se que existe simetria nas temperaturas T15 e T35, T16 e T36. O termopar T25, regista uma temperatura consideravelmente mais baixa, devido à distância a que se encontra das

perfurações, existindo uma aproximação na fase final do ensaio, instante em que a placa de teto está praticamente carbonizada pelo fogo, tal como se verifica na Figura 94. Neste caso, ao contrário do verificado no modelo numérico da laje 1, o fenómeno da perda total da humidade na madeira, não é tão pronunciado, também justificado pela diferença na curva de aquecimento prevista.

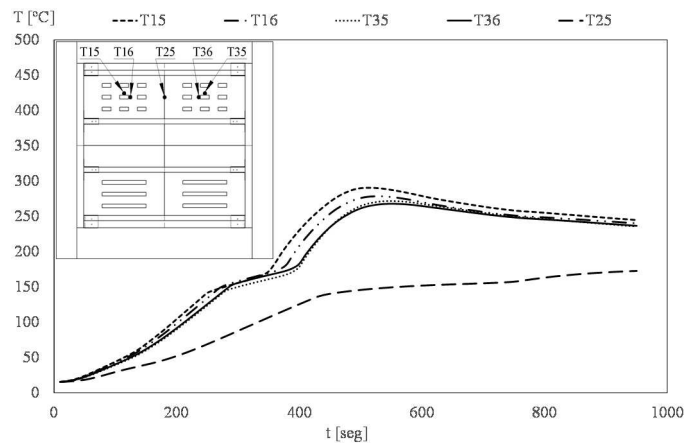


Figura 97: Temperaturas registradas na célula 1.

O gráfico da Figura 98 representa as temperaturas registradas na célula 3. Tal como acontece na célula 1, verifica-se que existe simetria entre T13 e T33, T14 e T34. A temperatura T24, tal como T25, regista uma temperatura mais baixa, devido à distância a que se encontra das perfurações. Na fase final do ensaio, as curvas estão mais próximas que na célula 1, o que indica que a placa de teto nesta zona, pelo facto das perfurações serem de maior dimensão, apresenta mais camada carbonizada, como se verifica na Figura 94.

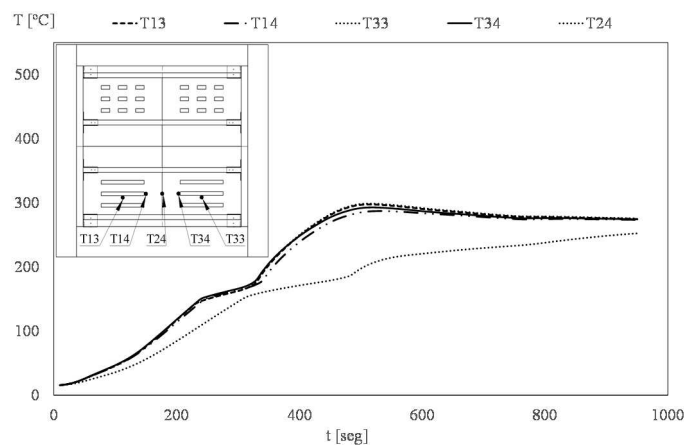


Figura 98: Temperaturas registradas na célula 3.

De acordo com o gráfico da Figura 99, as temperaturas registadas na célula 2, tal como acontece no modelo numérico da laje 1, são as mais baixas quando comparadas com as da célula 1 e 3, pois nesta célula não existem perfurações. Verifica-se também simetria entre as temperaturas registadas em T17 e T37, devido à sua localização. Quando se comparam as curvas de temperaturas apresentadas nas Figura 97, 98 e 99, pode verifica-se facilmente que a dimensão das perfurações tem grande influência na evolução do incêndio.

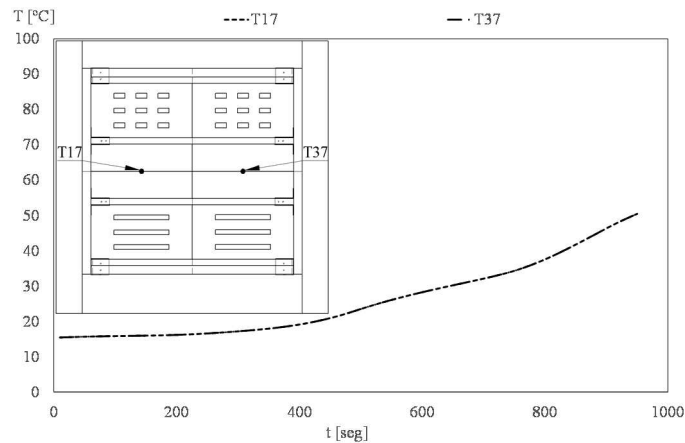


Figura 99: Temperaturas registadas na célula 2.

A Figura 100 representa a temperatura na interface das vigas com a placa de teto. Verifica-se que a tendência na evolução das temperaturas é idêntica à da laje 1. Da mesma forma, T27 está posicionada na viga próxima da célula com maiores aberturas, pelo que evolução da temperatura é superior a T26.

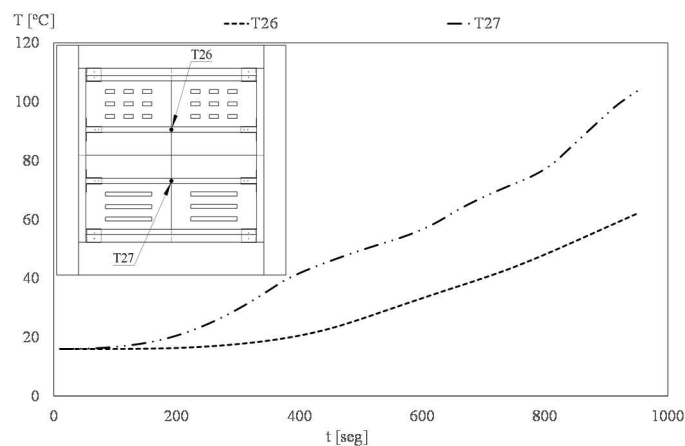


Figura 100: Temperaturas registadas nas vigas.

5.6 Velocidade de carbonização da laje 2

Para este ensaio, as espessuras de carbonização foram obtidas no instante final de ensaio, 950 [s] e utilizando os mesmos procedimentos da laje 1, foi imposto o critério de limite de carbonização para 280 [°C]. Os resultados da espessura carbonizada, na zona de influência das perfurações de maior dimensão, célula 3, são obtidos através dos valores lidos nos pontos de medição dos cortes C1, C2, e C3, Figura 101, apresentados na Tabela 27, em conjunto com os cortes C9, C10 e C11, Figura 102, Tabela 28.

Tabela 27: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1, C2 e C3

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1		17					28					16
C2		17					28					16
C3		17					28					16
Média		17,0					28,0					16,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0

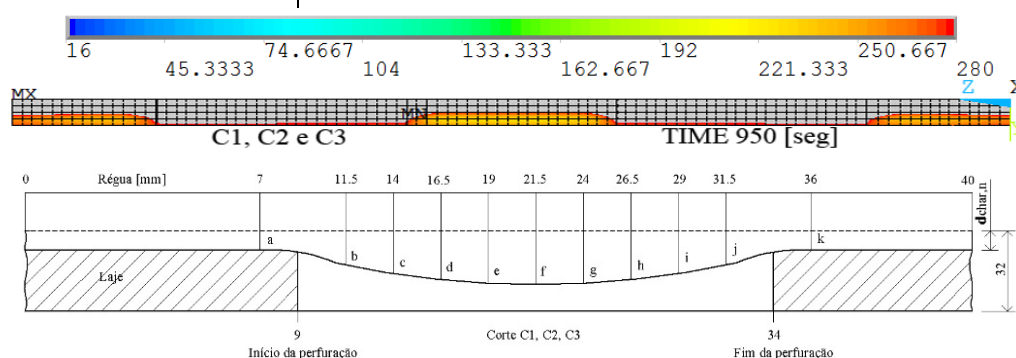
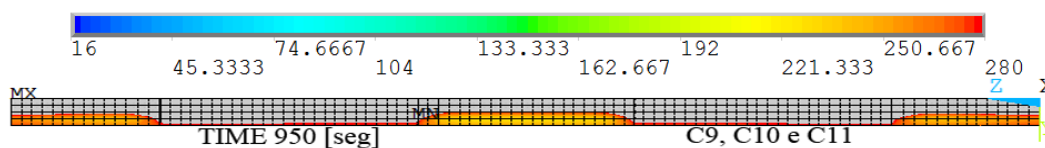


Figura 101: Localização dos pontos de medição, cortes C1, C2 e C3.

Tabela 28: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9, C10 e C11

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9		16					28					17
C10		16					29					17
C11		16					28					17
Média		16,0					28,3					17,0
D. Padrão		0,0					0,6					0,0



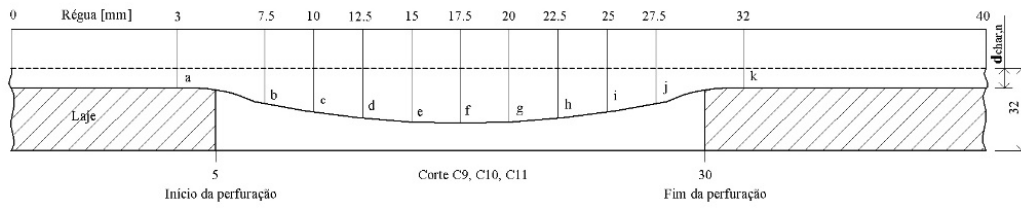


Figura 102: Localização dos pontos de medição, cortes C9, C10 e C11.

No caso da célula 2, zona sem perfurações, os resultados da espessura da madeira carbonizada, são obtidos nos pontos de medição C4 e C5, exemplificados na Figura 103, apresentados na Tabela 29, em conjunto com C12 e C13, Figura 104, Tabela 30.

Tabela 29: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C4 e C5

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C4		11					11					11
C5		11					11					11
Média		11,0					11,0					11,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0

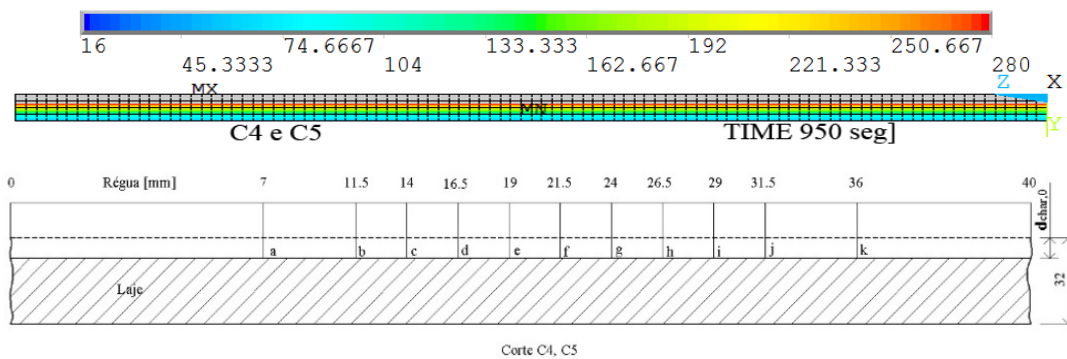
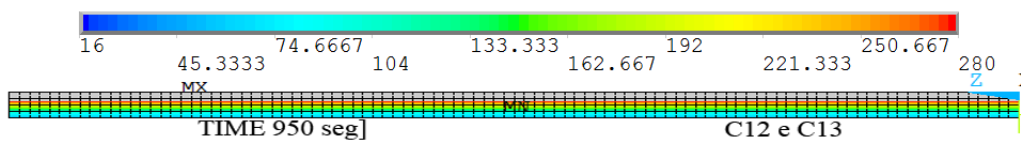


Figura 103: Localização dos pontos de medição, cortes C4 e C5.

Tabela 30: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C12 e C13

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C12		11					11					11
C13		11					11					11
Média		11,0					11,0					11,0
D. Padrão		0,0					0,0					0,0



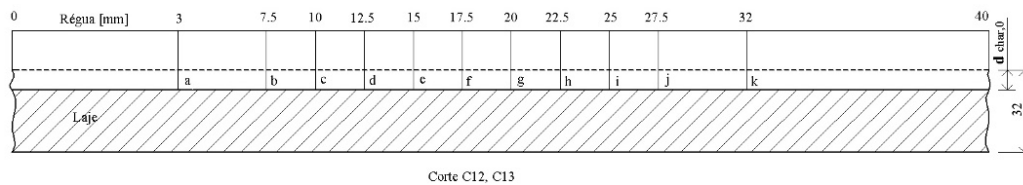


Figura 104: Localização dos pontos de medição, cortes C12 e C13.

Por último, apresenta-se os resultados da espessura carbonizada, da zona de influência das perfurações de menor dimensão, célula 1. Os valores são obtidos nos pontos de medição C6, C7, e C8, exemplificados na Figura 105, Tabela 31, em conjunto com C14, C15 e C16, Figura 106, Tabela 32.

Tabela 31: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C6, C7 e C8

Corte	Madeira carbonizada [mm]										
Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C6	13	25		14		25		14		25	14
C7	13	25		14		25		16		25	14
C8	14	25		15		25		15		25	14
Média	13,3	25,0		14,3		25,0		15,0		25,0	14,0
D. Padrão	0,6	0,0		0,6		0,0		1,0		0,0	0,0

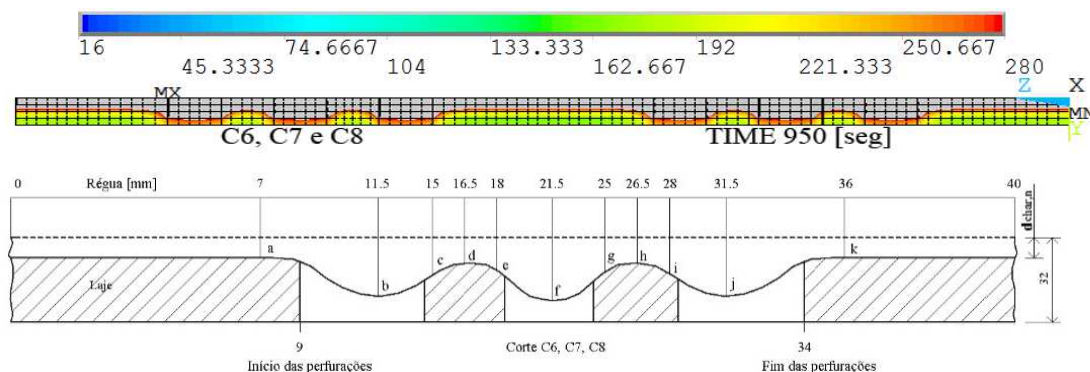


Figura 105: Localização dos pontos de medição, cortes C6, C7 e C8.

Tabela 32: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C14, C115 e C16

Corte	Madeira carbonizada [mm]										
Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C14	13	25		14		25		14		25	14
C15	14	25		14		25		14		25	14
C16	14	25		14		25		15		25	14
Média	13,7	25,0		14,0		25,0		14,3		25,0	14,0
D. Padrão	0,6	0,0		0,0		0,0		0,6		0,0	0,0

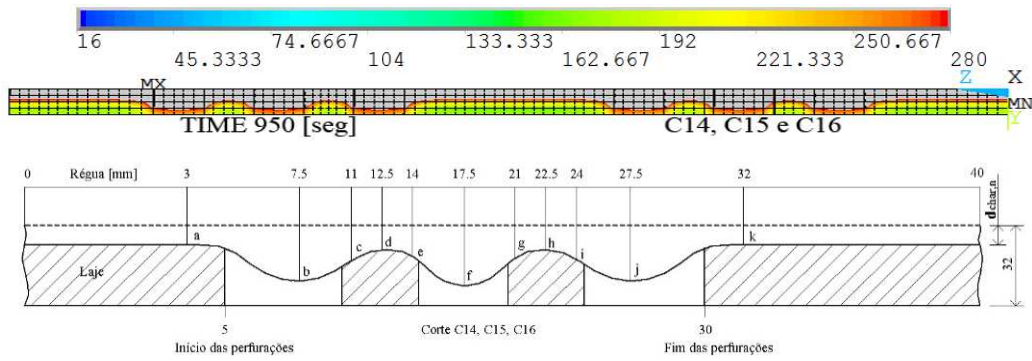


Figura 106: Localização dos pontos de medição, cortes C14, C15 e C16.

A velocidade de carbonização, calculada para as três zonas do modelo, célula 3, célula 2 e célula 1 é de 1,3 [mm/min], 0,7 [mm/min] e 1,2 [mm/min] respetivamente. O cálculo foi feito com base na equação 13 apresentada no capítulo 2 deste trabalho, considerando 950 [s] de tempo total de ensaio. Os valores apresentados, são a média da velocidade de carbonização para cada uma das três zonas do modelo numérico, conforme Tabela 33.

Tabela 33: Velocidades de carbonização da laje 2, modelo numérico.

Células Identificação	Cortes Identificação	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	C1, C2 e C3	1.3	1.3
	C9, C10 e C11	1.3	
2	C4 e C5	0.7	0.7
	C12 e C13	0.7	
1	C6, C7 e C8	1.2	1.2
	C14, C15 e C16	1.2	

Comparando os valores da velocidade de carbonização, Figura 107, verifica-se que é maior na célula 3, seguida na célula 1 e por fim na célula 2, facto relacionado com o tamanho das perfurações.

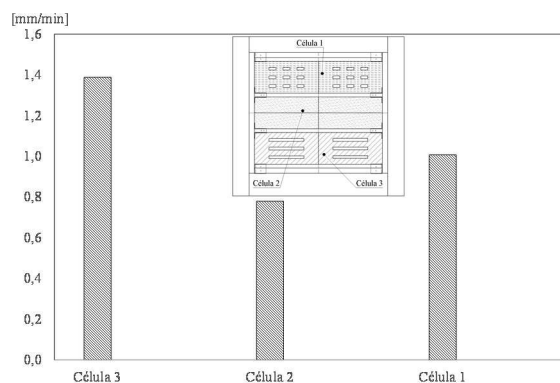


Figura 107: Velocidade de carbonização, laje 2, resultados numéricos.

Capítulo 6

Comparação dos resultados

6 Comparação dos resultados

Neste capítulo apresenta-se a comparação entre resultados experimentais e numéricos para as duas lajes em estudo. A comparação de resultados foi efetuada na face não exposta, nas vigas e em algumas das posições das células 1, 2 e 3. Os resultados são comparados em forma de gráficos onde a abreviatura “**num**” significa resultado numérico e “**exp**” para resultado experimental.

6.1 Comportamento térmico da laje 1

A Figura 108 compara as temperaturas dos pontos de medição localizados na face não exposta. Verifica-se que, apesar das pequenas diferenças existentes, todas as curvas tem a mesma tendência na evolução ao longo do tempo. As maiores diferenças são de 12 [°C] e acontecem numa fase intermédia do ensaio, entre os 900 [°C] e 1100 [°C], que coincide com o intervalo de tempo da paragem dos queimadores e no instante em que se desligou o forno. Na fase final do ensaio, a tendência é de aproximação em todas as curvas de temperaturas.

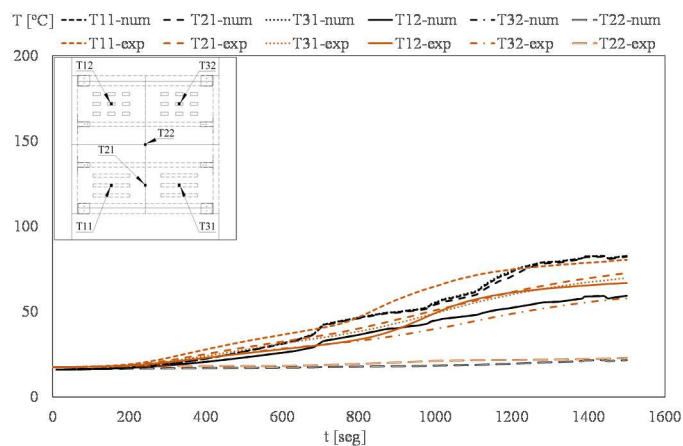


Figura 108: Face não exposta, comparação das temperaturas obtidas.

No caso das curvas de temperatura localizadas na base das vigas, Figura 109, a evolução é similar nos ensaios numérico e experimental, verificando-se a mesma tendência durante o tempo de exposição. A maior diferença acontece no instante final, T27-num, cerca de 53 [°C]

superior a T27-exp, situação que estará relacionada com a escolha do ponto nodal do modelo numérico na aquisição de temperaturas.

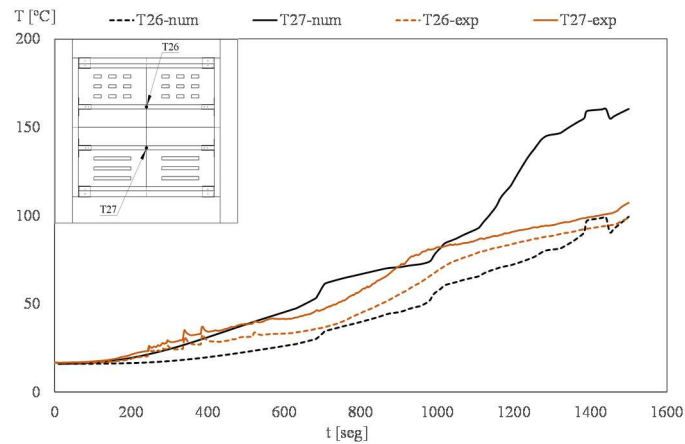


Figura 109: Vigas, comparação das temperaturas obtidas.

O gráfico da Figura 110 compara as curvas nos pontos de medição da célula 1. Tal como acontece nas situações anteriores, verifica-se grande tendência nas curvas obtidas pelas duas metodologias. As curvas obtidas no ensaio numérico são quase sempre superiores, registando-se a maior diferença aos 980 [s], em que T35-num é cerca de 100 [°C] superior a T35-exp.

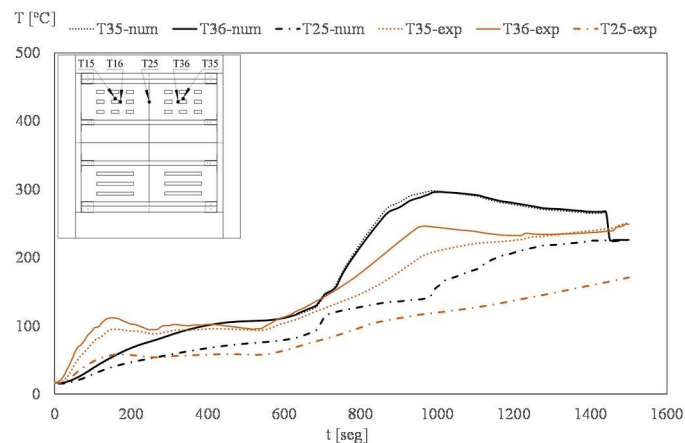


Figura 110: Célula 1, comparação das temperaturas obtidas.

Comparando-se as temperaturas da célula 2, Figura 111, nota-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

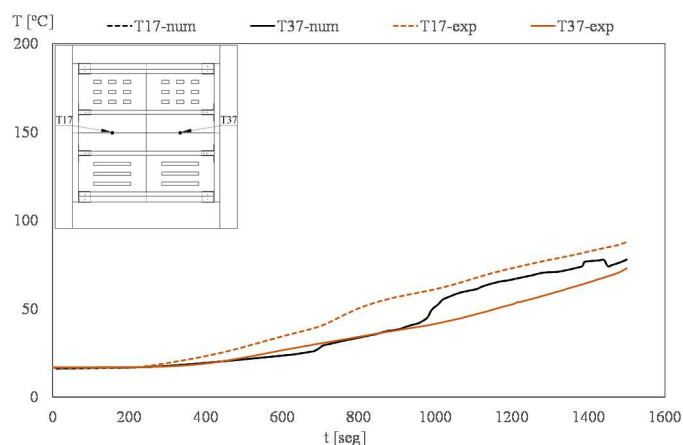


Figura 111: Célula 2, comparação das temperaturas obtidas.

Por último, comparando as temperaturas obtidas na célula 3, Figura 112, verifica-se que as curvas dos ensaios numérico e experimental, apresentam uma boa concordância e a mesma tendência durante o tempo de ensaio. Ao contrário do que acontece na célula 1, é no centro da célula, longe das perfurações, que se registam as maiores diferenças, cerca de 120 [°C] aos 1180 [s].

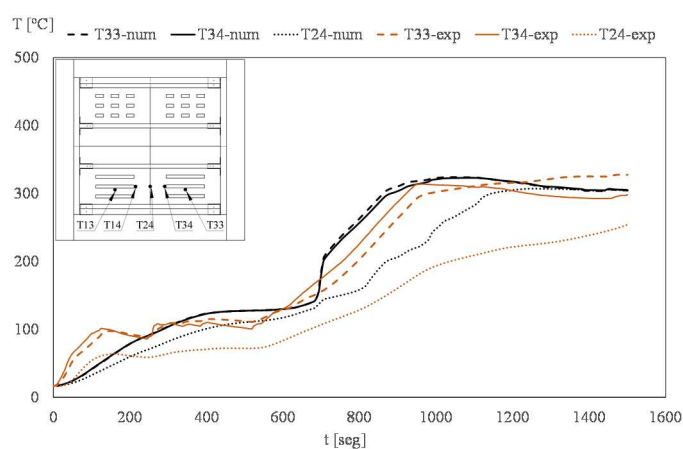


Figura 112: Célula 3, comparação das temperaturas obtidas.

6.2 Comportamento térmico da laje 2

Comparando os resultados obtidos numérica e experimentalmente para a laje 2, verifica-se que as temperaturas na face não exposta, Figura 113, são aproximadas, com valores superiores nos resultados experimentais. É no centro da placa de teto, T22-num e T22-exp que se registam as temperaturas mais baixas.

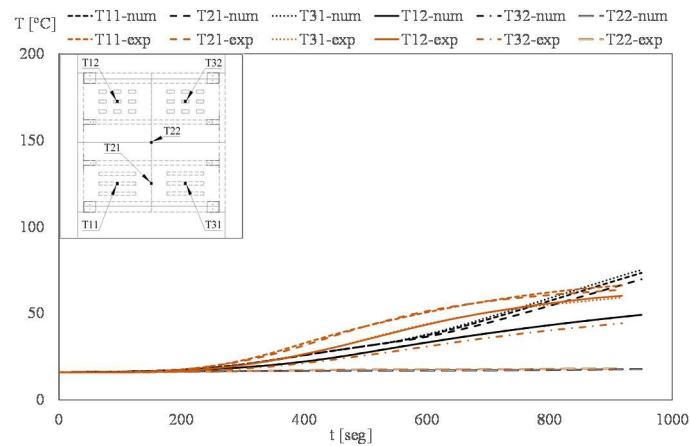


Figura 113: Face não exposta, comparação das temperaturas obtidas.

No caso das curvas de temperatura localizados na base das vigas, Figura 114, à semelhança do que acontece na laje 1 e apesar das pequenas diferenças existentes, o comportamento entre os resultados é semelhante, havendo uma boa concordância.

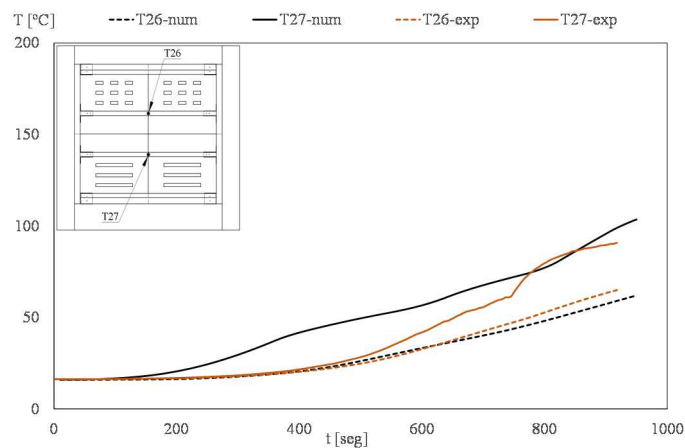


Figura 114: Vigas, comparação das temperaturas obtidas.

A Figura 115 compara as curvas obtidas para os pontos de medição na célula 1. Tal como acontece nas situações anteriores, verifica-se uma tendência semelhante entre as curvas obtidas através das duas metodologias. As curvas do ensaio numérico são quase sempre superiores, à semelhança do que acontece na laje 1, e é no centro da célula, longe das perfurações que as temperaturas numéricas e experimentais, T25-num e T25-exp, mais se aproximam.

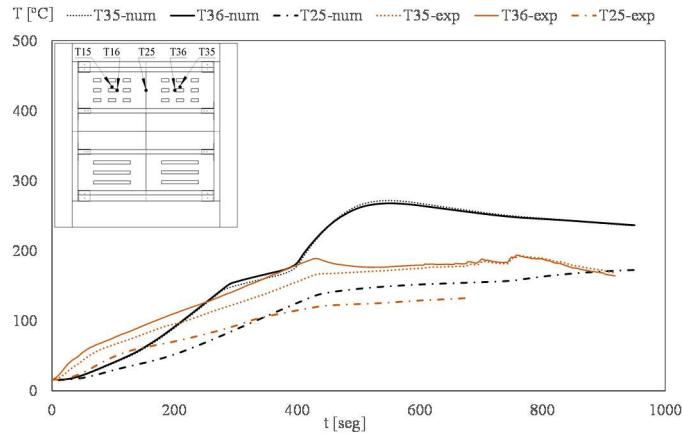


Figura 115: Célula 1, comparação das temperaturas obtidas.

Na célula 2, sem perfurações, a concordância e a tendência entre os resultados obtidos é muito boa, como se verifica na Figura 116. As temperaturas são mais baixas quando comparadas com as células que apresentam perfurações.

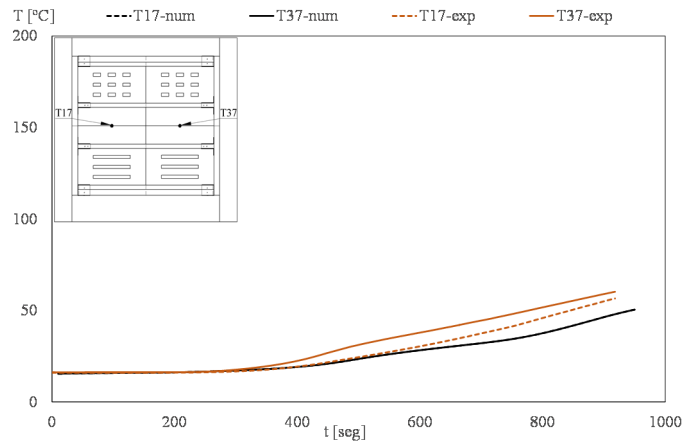


Figura 116: Célula 2, comparação das temperaturas obtidas.

Comparando as temperaturas obtidas na célula 3, Figura 117, verifica-se que as curvas dos ensaios numéricos e experimentais, apresentam uma boa concordância e igual tendência durante o tempo de ensaio. No final do ensaio as temperaturas obtidas pelos dois métodos são muito semelhantes.

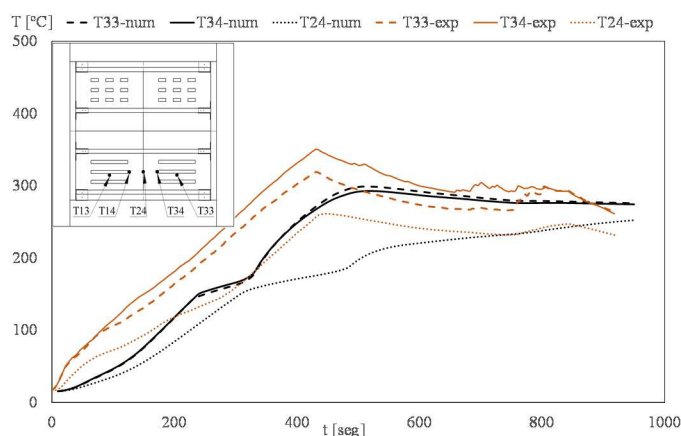


Figura 117: Célula 3, comparação das temperaturas obtidas.

6.3 Velocidade de carbonização

A velocidade de carbonização é um dado muito importante a retirar deste tipo de ensaios, uma vez que torna possível determinar o tempo de colapso da estrutura. A Tabela 34, apresenta de uma forma resumida os valores obtidos para a velocidade de carbonização nas das diferentes zonas das lajes ensaiadas. Os valores obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, são muito próximos, mas quando comparados com o valor referência do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004), 0.7 [mm/min], à exceção do valor numérico da laje 2 nas zonas C4, C5, C12 e C13, e experimental da laje 1, nos mesmos cortes, os restantes valores são superiores, o que justifica a utilização de curvas de incêndio diferentes, das normalizadas, pelas quais são obtidos os valores do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004).

Tabela 34: Comparação das velocidades de carbonização.

Cortes	Carbonização_Ansys	Carbonização_Experimental
Laje 1 - C1, C2, C3, C9, C10, C11	 1,3mm/min	 1,2mm/min
Laje 1 - C4, C5, C12, C13	 1,0mm/min	 0,65mm/min
Laje 1 - C6, C7, C8, C14, C15, C16	 1,4mm/min	 1,0mm/min
Laje 2 - C1, C2, C3, C9, C10, C11	 1,3mm/min	 1,4mm/min
Laje 2 - C4, C5, C12, C13	 0,7mm/min	 0,8mm/min
Laje 2 C6, C7, C8, C14, C15, C16	 1,2mm/min	 1,0mm/min

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

7 Conclusões

O trabalho apresentado relata simulações numéricas para análise térmica em regime transiente não linear, de lajes em madeira com diferentes perfurações na placa de teto, sujeitas a situações de incêndio, permitindo-nos analisar a evolução das temperaturas nos vários componentes da laje, calcular a espessura da camada carbonizada e a respetiva velocidade de carbonização. Os resultados obtidos numericamente, são comparados a resultados obtidos em ensaios experimentais, efetuados em laboratório.

A comparação dos vários resultados obtidos pelos dois métodos de ensaio, revelaram uma boa concordância. Estes métodos de simulação numéricos são muito importantes, permitindo avaliar ainda em fase de projeto, a segurança de estruturas quando sujeitas a situações de incêndio, o tempo de resistência antes do colapso e facilmente ajustar o modelo numérico de forma a simular diferentes condições de incêndio.

Quando se comparam as velocidades de carbonização obtidas para as diferentes zonas da placa de teto, verifica-se que a zona das perfurações retangulares (maior dimensão) tem uma velocidade de carbonização cerca de 12% superior quando comparada com a zona das perfurações quadrangulares (menor dimensão) e cerca de 67% superior à zona sem perfurações. Desta forma, para a situação em estudo podemos dizer que o seu tamanho está diretamente associado a uma maior velocidade de propagação, e conseqüente perda de massa, prejudicando a capacidade de resistência em situações de incêndio neste tipo de estruturas. Verifica-se que as velocidades de carbonização de uma forma geral, são superiores ao valor de referência do Eurocódigo 5, situação que possivelmente estará relacionada com o facto de que as curvas impostas nos ensaios não serem a ISO 834.

Nas situações em estudo verificou-se que as lajes construídas apresentaram boas características de isolamento e estanqueidade, ambas garantem os critérios impostos pela norma de ensaios (EN1363-1 1999), para a duração dos ensaios.

Os resultados obtidos, neste tipo de estudos, revelam-se de extrema importância, pois dão a conhecer mais pormenorizadamente o comportamento deste tipo de estruturas, em situações de incêndio. Conhecendo-as pode prever-se o tempo de resistência antes do seu colapso, aumentando a segurança das pessoas e dos bens.

7.1 Perspetivas de trabalhos futuros

Tendo por base o trabalho desenvolvido, apresentam-se algumas sugestões para futuros trabalhos a desenvolver nesta área de investigação:

- Realizar, ensaios experimentais e numéricos em lajes com perfurações de diferentes geometrias e dimensões;
- Realizar ensaios no calorímetro de perda de massa, com a madeira utilizada na construção das lajes, de forma a estabelecer uma relação entre a taxa de libertação de calor e taxa de perda de massa com a velocidade de carbonização obtida nestes ensaios;
- Realizar ensaios experimentais em lajes com isolamento do tipo lã de rocha ou placas de MDF nas cavidades celulares;
- Realizar estudos paramétricos com outras geometrias e definir tabelas de resistência o fogo.

8 Bibliografia

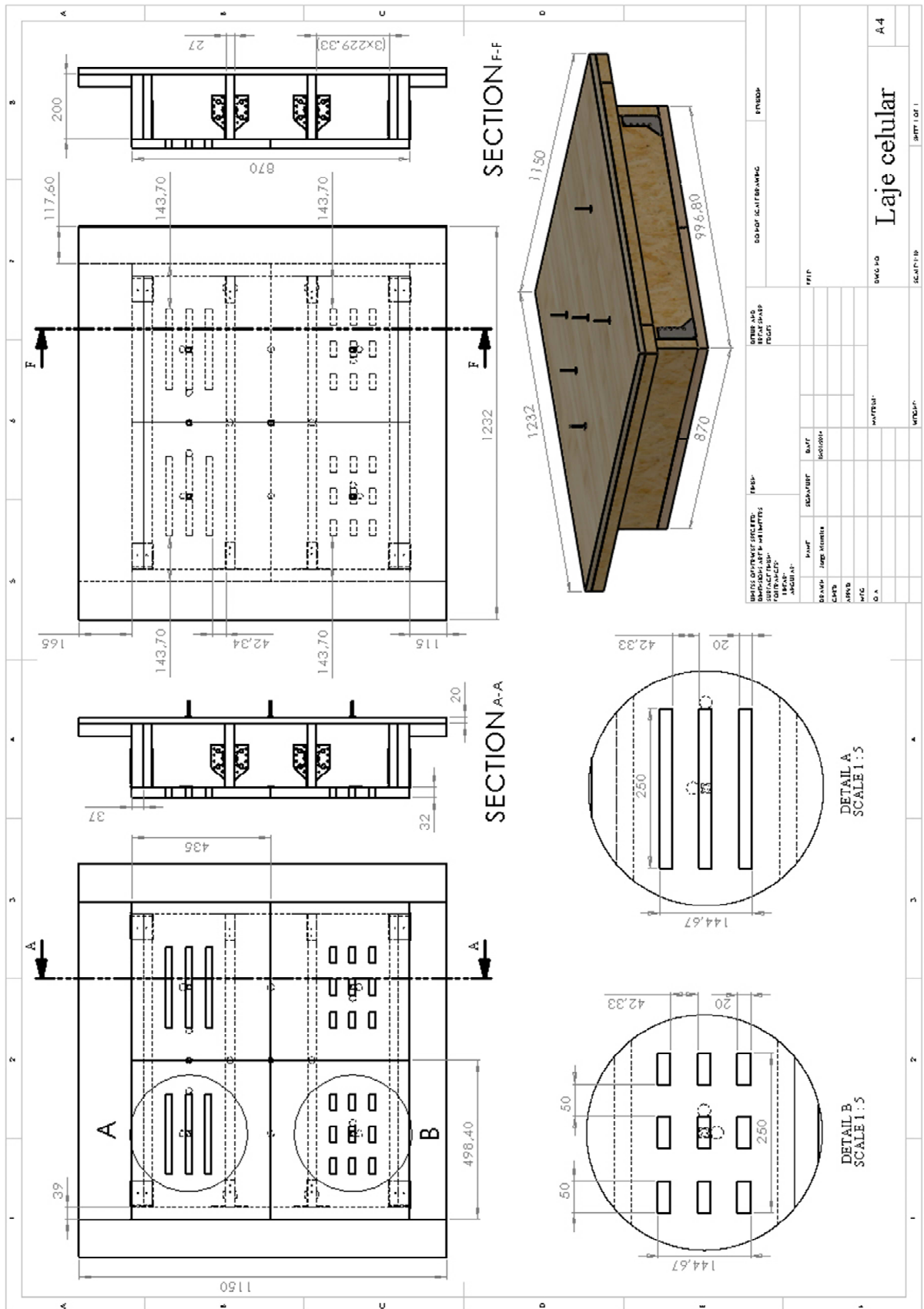
- Andrea, Frangi, Mario Fontana, e Carsten Erchinger. “Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities” *Fire Safety Journal*, volume 43, pp.551-564, 2008.
- Andrea, Frangi, Markus, Knobloch, Fontana, Mario. “Fire design of timber slabs made of hollow core elements” *Fire Safety Journal*, volume 31, pp.150-157, 2009.
- Association, American Forest & Paper. “Fire Performance of wood Products Awareness Guide” Washington, 2006.
- ASTME119. “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials” American Society for testing and Materials, 2008.
- Barreira, Luisa Maria da Silva. “Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira” Tese de Mestrado, Bragança, 2008.
- Coelho, Diana Carina Silva. “Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira” Tese de Mestrado, Bragança, 2011.
- EN1363-1. “Fire resistance tests. Part 1, general requirements” August de 1999.
- EN1365-2. “Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 2: Floors and roofs” December de 1999.
- EN1634-1. “Fire Resistance test for door and shutter assemblies - Part 1: Fire doors and shutters” February de 2000.
- EN1991-1-2. “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire” November de 2002.
- EN1993-1-2. “Projeto de estruturas de aço Parte 1-2: Regras gerais verificação da resistência ao fogo” Dezembro de 2005.
- EN1995-1-2. “Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design. Brussels: CEN - Comité Européen de Normalisation” 2004.
- EWPA. “Fire Resistance” Outubro de 2013.
- Fonseca, Elza, Luisa Barreira, Jorge Meireles, e Paulo Piloto. “Avaliação Numérica da ação do fogo em coberturas de madeira com cavidades e perfurações” 3.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos, ISBN: 978-989-98435-0-9, pp. 229-236, Coimbra, Portugal 2013.
- Gardner W. D., Syme D. R. “Charring of glued-laminated beams of eight australian-grown timber species and the effect of 13 mm gypsum plasterboard protection on their charring” N.S.W. Technical report no.5. Sydney, 1991.
- White R. H., Dietsberger M. A. *Fire Safety*, Chap. 17, *Wood Handbook*. “Wood as an Engineering Material” 1999.
- Holman, J. P. “Heat Transfer.” Delhi, India: McGraw-Hill Book Company, 1997.

- White R. H., Erik V., Nordheim E. V. “Charring rate of wood for ASTM E119 exposure” Fire Technol, volume 28 (1). 1992.
- Incropera, Frank P., David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, e Adrienne S. Lavine. “Fundamentos de transferência de calor e de massa.” Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros, 2008.
- Janssens, Marc. “Modeling of the thermal degradation of structural Wood members exposed to fire” Fire and materials, volume 28, 2004.
- Konig J, Walleij L. “One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations” Swed Inst Wood Technol Res. 1999.
- Lowden, Laura Anne, e Terence Richard Hull. “Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction” Fire Science Reviews, pp. 2-4. 2013.
- Özsisik, M. Necati. “Trânsferência de calor, Um Texto Básico” Rio de Janeiro, RJ - CEP 230040-040: Guanabara Koogan S.A, 1990.
- Pinto, Edna Moura, e Carlito Calil Junior. “Estudo Teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalipto de uso estrutural exposta ao fogo” Pesquisa Tcnologica, Minerva, volume 3(2), pp.131-140, São Paulo Brazil, 2004.
- Poon L., England J. P. Literature Review on the Contribution of Fire Resistant Timber Construction to Heat Release Rate–Timber Development Association, Warrington Fire Research Aust. Pty. Ltd., Project No.20633, version 2b, pp. 1-78. 2003.
- Pun C. Y., Seng H. K., Midon M. S., Malik A. R. Timber design handbook. FRIM, Malayan Forest Records no.42. 1997.
- Real, Paulo Vila. “Incêndio em Estruturas Metálicas” Amadora: Edições Orion, 2003.
- Schaffer E. L. “Charring rate of selected woods transverse to grain” Research paper FPL 69. Madison (WI): Forest Products Laboratory. 1967.

Anexos

9 Anexos

9.1 A 1- desenho de definição da laje



9.2 A 2- Parafusos e conectores metálicos

SAE

Cachorros com asas exteriores
aço galvanizado
espessura 2 mm

Resultados testes PV do CTBA sob consulta

Tipo	A*	B	C	Furações
200	32 à 80	84	84	Ø 5 - Ø 11
250**	32 à 80	84	84	Ø 5 - Ø 11
300**	32 à 100	Ver cálculo	84	Ø 5 - Ø 13
340**	38 à 80	da	84	Ø 5 - Ø 13
380**	64 à 120	da	84	Ø 5 - Ø 13
440**	66 à 120	medida	84	Ø 5 - Ø 13
500**	76 à 150	medida	84	Ø 5 - Ø 13

* Outras larguras sob consulta.
Disponíveis em "inox" 316L, espessura 1,5 mm

SAI

Cachorros com asas exteriores
aço galvanizado
espessura 2 mm

Resultados testes PV do CTBA sob consulta

Tipo	A*	B	C	Furações
200	64 à 80	76	76	Ø 5 - Ø 11
250	64 à 80	76	76	Ø 5 - Ø 11
300	64 à 80	Ver cálculo	76	Ø 5 - Ø 11
340	64 à 100	da	76	Ø 5 - Ø 11
380	64 à 120	da	76	Ø 5 - Ø 13
440	76 à 120	medida	76	Ø 5 - Ø 13
500	80 à 120	medida	76	Ø 5 - Ø 13

* Outras larguras sob consulta.

GSAE - GSAI

Cachorros grandes
asas exteriores ou asas interiores
aço galvanizado - espessura 2,5 - 3 - 4 mm**

modelo de 540 à 780 modelo de 840 à 1020

Tipo	Asas ext. A*	Asas Int. A*	B	C	Furações
540	60 à 140	76 à 140	110	110	Ø 5 - Ø 13
600	60 à 140	76 à 140	110	110	Ø 5 - Ø 13
660	60 à 140	76 à 140	Ver cálculo	110	Ø 5 - Ø 13
720	60 à 140	76 à 140	da	110	Ø 5 - Ø 13
780	60 à 140	76 à 140	da	110	Ø 5 - Ø 13
840	60 à 130	76 à 130	medida	80	Ø 5 - Ø 13
900	60 à 130	76 à 130	medida	80	Ø 5 - Ø 13
960	60 à 130	76 à 130	medida	80	Ø 5 - Ø 13
1020	60 à 130	76 à 130	medida	80	Ø 5 - Ø 13

Resultados testes PV do CTBA sob consulta.
* Outras larguras sob consulta.
** Ver « Reação ao fogo »

COMO ESCOLHER O TIPO DE CACHORRO

CÁLCULO DA MEDIDA

Esquema = Tipo = 2 B + A
EX.: uma viga de 75 mm x 225 mm,
o cachorro correspondente tem de largura 76 mm*.
altura mínima do cachorro = 2/3 de 225 mm = 150 mm
B 150 + A 76 + B 150 = 376

O cachorro com a medida superior mais aproximada É o tipo 380

* A altura do cachorro em função da

A altura do cachorro deve cobrir pelo menos 2/3 da altura da viga

CASAS A OSSATURA DE MADEIRA

maisons Bois
outils concept®

conceito MBOC

Sob consulta

SIMPSON
Strong-Tie

SIMPSON Strong-Tie France
e mail : commercial@strongtie.com

www.simpson.fr

Seu distribuidor
JULAR
madeiras

Porto - Fátima - Azambuja - Camarate - Albufeira

nº azul
808 26 28 08 www.jular.pt
CHAMADA LOCAL

DBT20

Clips para fixação de sobrados
Para sobrado de 21 a 30 mm

Ref.	A	B	D	E	Zp
DBT20	15	45	5	2	

Aço + zinagem electro-lítica bicromado.

Fixação : pregos.

PCR

Pregos dentados- Electro galvanizados

Dimensões	Condicionamento
4,2 x 60	12 x 1 kg e 1 x 5 kg
4,2 x 50	12 x 1 kg e 1 x 5 kg
4,2 x 35	12 x 1 kg e 1 x 5 kg
3,1 x 35	1 x 5 kg
2,5 x 35	12 x 1 kg e 1 x 5 kg

Prego dentado em inox disponível em :
Ø 4,0 x 50 - Ø 2,5 x 35
Ø 2,5 x 50 - Ø 2,5 x 60

disponível em inox

SIMPSON
Strong-Tie

NO CODAL

LIGADORES METÁLICOS
PARA A CONSTRUÇÃO EM MADEIRA

SRD - SRC - SRR

Suportes de rampa - Aço bicromado - Esp. 3 mm

Tipo	ØA	B	Placa	Furações
SRD	60	53	55 x 20	Ø 6
SRC	60	82	55 x 20	Ø 6
SRR	60	80 a 100mm	55 x 20	Ø 6

PARAFUSOS TORX INOX

Parafuso para madeira com cabeça Torx - inox

Dimensões	Condicionamento
5,0 x 25	6 caixas de 250 parafusos
5,0 x 35	6 caixas de 250 parafusos
5,0 x 40	6 caixas de 250 parafusos

Parafuso para madeira com cabeça TORX galvanizado disponível em :
Ø 5,0 x 25 - Ø 5,0 x 35
Ø 5,0 x 40 - Ø 5,0 x 50

disponível em galvanizado

CLIP - WPC

CLIP : clip para lambrim de madeira para entalhe : 2 - 3 - 3,5 - 4 - 5 mm.
WPC : clip para lambrim em PVC para ranhura : de 0,5 a 1 mm.

Furações : para agrafes de 6 a 16 mm para pregos Ø 2,5 mm.
Condicionamento : caixas com 100 ou 250 unidades, com pregos. Blisters com 100 unidades, com pregos.

com pregos

Para listreiros PVC Para lambrim de madeira

agrafados ou pregados

CP

Esquadro para paliçada

Aço bicromado
Espessura 2 mm
Furações Ø 4,5 mm
Parafuso Ø 4 x 40

Ref.	A	B	C	E
CP	30	38	35	44

CPIX

Esquadro para paliçada inox

Aço inox
Espessura 2 mm
Furações Ø 5 mm

Ref.	A	B	C
CP	40	40	40

Fixação : 4 parafusos inox 4,5 x 30

SIMPSON Strong-Tie™ E-GRO 07/04

9.3 A 3- Localização e identificação dos termopares

Tabela 35: Posição e identificação dos termopares

Termopar Local	Identificação Tid	Coordenadas		
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Face não exposta (pavimento)	T11	692.34	252	728.10
	T12	178.67	252	728.10
	T21	692.34	252	498.28
	T22	435	252	498.28
	T31	692.34	252	268.70
	T32	178.67	252	268.70
Face exposta (teto)	T13	702.34	32	728.10
	T14	692.34	32	394.37
	T15	168.67	32	728.10
	T16	178.67	32	703.10
	T17	435	32	728.10
	T24	692.34	32	498.28
	T25	178.67	32	498.28
	T33	702.34	32	268.70
	T34	692.34	32	394.7
	T35	188.67	32	268.70
	T36	178.67	32	294.37
Vigas	T26	306.83	32	498.28
	T27	563.17	32	498.28
Células	TP1	178.67	114.5	498.28
	TP2	434.83	114.5	498.28
	TP3	692.34	114.5	498.28
Conectores metálicos	TC1	291.33	122	920.8
	TC2	322.33	122	920.8
	TC3	547.67	122	920.8
	TC4	578.67	122	920.8