

**Comportamento ao fogo de lajes celulares de pavimento ou
cobertura em madeira com perfurações circulares**

David Léandro Pinto do Couto

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

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Ramo Engenharia Mecânica

Orientadores

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Novembro de 2015

*“A única maneira de fazer um ótimo
trabalho é amando aquilo que se faz”*

Steve Jobs

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus orientadores, Prof Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto e Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca pela ajuda fornecida ao longo da realização deste estudo, assim como a disponibilidade na resolução de problemas.

De seguida, gostaria de agradecer a ajuda fornecida pelo Mestre Jorge Manuel Meireles na elaboração experimental realizada em todos os pormenores fornecidos a facilitar os processos onde estive envolvido.

Por fim, agradeço à empresa Jular pela disponibilização do material utilizado neste estudo, para a realização dos ensaios experimentais.

Comportamento ao fogo de lajes celulares de pavimento ou cobertura em madeira com perfurações circulares

Por:

David Léandro Pinto do Couto

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 boas características mecânicas, térmicas e acústicas que a madeira proporciona numa estrutura está a levar a um aumento da sua utilização, sendo este um material ideal para utilizar em pavimentos e coberturas. Como a madeira é um material combustível, é importante prever o seu comportamento em situação de incêndio, pois a madeira nessas condições, carboniza diminuindo a secção de material intacto e conseqüentemente, a sua resistência estrutural.

Neste estudo apresentam-se dois modelos de laje celular com perfurações circulares semelhantes. As lajes são construídas em madeira abeto que serão utilizadas em dois ensaios experimentais. Os ensaios baseiam-se em colocar as lajes expostas a uma situação de incêndio normalizado para determinação do perfil de temperaturas e da velocidade de carbonização em função da perfuração associada a cada uma das lajes.

Apresenta-se também um modelo numérico em regime transiente não linear térmico com as mesmas características da laje em madeira utilizada validado experimentalmente.

Palavras-chave: laje celular; madeira; perfurações circulares; incêndio; carbonização.

Fire behavior of celular floor or roof woodenslabs with circular perforations

By:

David Léandro Pinto do Couto

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 good mechanical, thermal and acoustic characteristics that the wood provides to the structure is leading to an increase of its use, being an perfect material for use in floors and roofs. Since wood is a combustible material, it is important to predict its behavior in fire because the wood forms a char layer and decreases the section and consequently the its structural strength.

In this study two celular wooden slab are presented with similar circular perforations, the slabs are built in spruce material that will be used in two experimental test. The experimental test are based on placing the slabs exposed to fire standard situation order to determine the temperature profile and the charring rates due each associated slab perforation.

Furthermore, it presents a numerical model in nonlinear thermal and transient, with the same characteristics of the tested wood slabs validated with the experimental test.

Keywords: celular slab; wood; circular perforations; fire; char layer.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Apresentação sumária dos capítulos.....	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Estudo experimental	5
2.2	Estudo numérico	6
2.3	Estudos realizados no IPB	7
3	Mecanismos de Transferência de Calor	10
3.1	Condução	10
3.1.1	Lei de Fourier	11
3.2	Convecção	12
3.2.1	Lei de Newton	13
3.3	Radiação	14
3.3.1	Lei de Stefan-Boltzman.....	14
4	Ação do Fogo.....	15
4.1	Introdução.....	15
4.2	Incêndio natural	15
4.3	Curvas normalizadas de incêndio	16
4.4	Comportamento térmico da madeira	18
4.4.1	Velocidade de carbonização da madeira	19
4.4.2	Camada de carbonização efetiva	20
4.5	Propriedades térmicas da madeira	21
4.5.1	Condutividade térmica	21
4.5.2	Calor específico.....	22
4.5.3	Massa volúmica.....	23
5	Lajes celulares com perfurações	25
5.1	Critérios de desempenho	26
5.1.1	Capacidade de carga.....	26
5.1.2	Isolamento	26
5.1.3	Estanquidade	26

5.2	Construção da laje	27
5.3	Caracterização da laje	28
5.3.1	Tipos de estruturas de madeira	30
5.4	Construção das lajes	31
5.4.1	Lajes para os ensaios normalizados	31
6	Ensaio experimentais de resistência ao fogo.	35
6.1	Instrumentação com termopares tipo K.....	36
6.2	Instrumentação com termopares de placa.....	38
6.3	Instrumentação com termopares na face não exposta	38
6.4	Aquisição de dados	41
6.5	Forno de ensaio.....	43
6.6	Resultados experimentais	44
6.6.1	Comportamento térmico da laje 1	46
6.6.2	Velocidade de carbonização da laje 1	52
6.6.3	Comportamento térmico da Laje 2.....	56
6.6.4	Velocidade de carbonização, laje 2	62
7	Modelo computacional.....	67
7.1	Malha de elementos finitos.....	68
7.2	Condições de fronteira.....	68
7.3	Comportamento térmico da laje 1	70
7.4	Velocidade de carbonização da laje 1.....	73
7.5	Comportamento térmico da laje 2	76
7.6	Velocidade de carbonização da laje 2.....	80
7.7	Velocidade de Carbonização Laje 1 e 2	82
8	Comparação dos resultados entre modelo experimental e computacional.....	86
8.1	Comportamento térmico da laje 1	86
8.2	Comportamento térmico da laje 2	89
8.3	Velocidade de carbonização	92
9	Comparação de resultados entre lajes com furação retangular e circular	93
10	Conclusões e trabalhos futuros	98
10.1	Perspetivas de trabalhos futuros	99
11	Bibliografia	100

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de estrutura celular em madeira, (Meireles, 2014).....	5
Figura 2 - Laje celular em madeira, (Frangi A., 2004).	6
Figura 3 - Ensaio numérico de madeira casquinha vermelha (Coelho, 2011).	7
Figura 4 - Ensaio numérico tridimensional de laje celular (Couto, 2013).	7
Figura 5 - Ensaio numérico 2D (Barreira, 2008).	8
Figura 6 - Ensaio experimental (Barreira, 2008).....	8
Figura 7 - Ensaio numérico 2D com madeira casquinha branca (Coelho, 2011).....	8
Figura 8 - Ensaio numérico 2D com madeira casquinha vermelha (Coelho, 2011).	8
Figura 9 - Ensaio numérico 2D em estrutura madeira-aço ao fim de 1800 segundo (Silva e Ramos, 2013).	8
Figura 10 - Ensaio numérico 2D solução ao fim de 3000 segundo (Silva e Ramos, 2013).....	8
Figura 11 - Ensaio numérico 3D em madeira abeto (Couto, 2013).	9
Figura 12 - Ensaio numérico 3D em madeira abeto ao fim de 1361 segundo (Couto, 2013)...	9
Figura 13 - Ensaio numérico 3D com laje celular, com e sem isolamento interno (Fonseca et al 2013).....	9
Figura 14 - Ensaio numérico 3D com laje celular, solução ao fim de 1800 segundo (Fonseca et al 2013).....	9
Figura 15 - Ensaio numérico 3D ao fim de 1500 segundo (Meireles, 2014).	9
Figura 16 - Ensaio experimental, solução ao fim de 1500 segundo (Meireles, 2014).	9
Figura 17- Condução, Convecção e Radiação, representação gráfica, (Kreith, F., 2011).	10
Figura 18 - Representação da condução de calor através de um sólido ou de um fluido em regime estacionário, (Kreith F., 2011).	11
Figura 19 - Representação da convecção natural ou livre, (Kreith F., 2011).....	12
Figura 20 - Representação da convecção forçada, (Kreith F., 2011).	13
Figura 21 - Representação da transferência de calor por radiação, (Kreith F., 2011).....	14
Figura 22 - Fases de um incêndio natural, (Real, 2003).	16
Figura 23 - Curvas de incêndio normalizadas, EC1 e ASTM.	18
Figura 24 - Arredondamento de uma secção exposta ao fogo em três direções, (Barreira, 2008).	20
Figura 25 - Secção transversal residual e secção transversal efetiva, EC5 (EN1995-1-2, 2004).	20

Figura 26 - Variação da condutividade térmica da madeira em função da temperatura, EC5.	22
Figura 27 - Calor específico em função da temperatura.	23
Figura 28 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura.....	24
Figura 29 - Modelos de lajes celulares em madeira, (Meireles, 2014).	25
Figura 30 - Utilização de lajes celulares no quotidiano.	25
Figura 31 - Forno de alta resistência, LERM-IPB.	27
Figura 32 - Forno, bastidor e laje, (Meireles, 2014).	27
Figura 33 - Tipo de furação associado a cada célula.....	28
Figura 34 - Modelo de laje em estudo, SolidWorks.....	29
Figura 35 - Vigas Kerto S de 37 e 39 [mm], (Meireles 2014).	30
Figura 36 - Pormenor construtivo.	31
Figura 37 - Placa de teto cortadas em quatro partes iguais, LTM.....	32
Figura 38 - Colocação de 1/4 de placa de teto na máquina CNC e início da maquinagem, LTM.	32
Figura 39 - Maquinagem das perfurações de 10 e 20 [mm] na CNC, LTM.	32
Figura 40 - Placa de teto com furações circulares, LTM.	33
Figura 41 – Fresadora vertical, (Imagem Google).	33
Figura 42 - Rebaixo para aplicação do conector Simpson, LTM.....	33
Figura 43 - Conector metálico Simpson SAI300/64/2, LTM.....	34
Figura 44 - Conector metálico Simpson SAE300/70/2, LTM.	34
Figura 45 - Vigas com conectores metálicos, LTM.	34
Figura 46 - Montagem da laje, LTM.	34
Figura 47 - Laje 1 e 2 concluídas, ESTIG-IPB.	34
Figura 48 - Desenho de definição da localização dos termopares, SolidWorks.	35
Figura 49 - Fio termopar tipo K, LTM.....	36
Figura 50 - Preparação da proteção do fio termopar, LTM.	36
Figura 51 - Processo de proteção do ponto de medição com massa térmica, LTM.	37
Figura 52 - Colocação do fio termopar na placa de teto, LTM.	37
Figura 53 - Colocação de massa térmica para proteger o ponto de medição, LTM.....	37
Figura 54 - Termopares colocados nos conectores metálicos, LTM.....	37
Figura 55 - Placa de teto, vista interior, LTM.	37
Figura 56 - Processo de construção dos termopares de placa, LTM.....	38
Figura 57 - Processo de construção dos termopares de disco, LTM.....	39
Figura 58 - Localização dos termopares na face não exposta ao fogo, LTM.	40

Figura 59 - Colocação dos termopares na placa de teto, LTM.	40
Figura 60 - Colocação dos termopares nos conectores metálicos, LTM.	40
Figura 61 - Colocação dos termopares de placa protegidos com lã de rocha, LTM.	41
Figura 62 - Termopares de placa no centróide das células, LTM.	41
Figura 63 - Termopar de disco com gesso cartonado, LTM.	41
Figura 64 - Colocação dos termopares de disco, com cola térmica, LTM.	41
Figura 65 - Finalização da instrumentação da laje no interior das células, LTM.	41
Figura 66 - Finalização da instrumentação com a colocação dos termopares na face não exposta, LTM.	41
Figura 67 - Equipamento para aquisição de dados, MGCplus, LERM.	42
Figura 68 - Equipamento para aquisição de dados Spider 8, LERM.	42
Figura 69 - Forno de ensaio padronizado, LERM.	42
Figura 70 - Camara termográfica utilizada na placa não exposta, LERM.	42
Figura 71 - Bancada de trabalho, LERM.	43
Figura 72 – Imagem real do forno de resistência térmica, LERM.	43
Figura 73 – Imagem virtual do forno de resistência térmica (Meireles, 2014).	43
Figura 74 - Laje 1, ensaio experimental, LERM.	45
Figura 75 - Janela do forno, fogo localizado no teto do forno, Laje 1, LERM.	45
Figura 76 - Instante de abertura da porta do forno depois do ensaio da laje 1, LERM.	45
Figura 77 - Laje 1 depois do ensaio experimental, LTM.	45
Figura 78 - Laje 2, ensaio experimental, LERM.	45
Figura 79 - Janela do forno, instante em que a laje 2 começa a carbonizar, LERM.	45
Figura 80 - Instante de abertura da porta do forno depois do ensaio da laje 2, LERM.	45
Figura 81 - Laje 2 depois do ensaio experimental, LTM.	45
Figura 82 - Temperatura no interior do forno e nas células 1, 2 e 3.	46
Figura 83 - Temperaturas nos conetores.	47
Figura 84 - Temperaturas na face não exposta.	48
Figura 85 - Câmara termográfica ao longo do ensaio da Laje 1 (Variação 15-100 °C), LERM- IPB.	49
Figura 86 - Temperaturas na face não exposta da Laje 1, obtidas através da captura termográfica (FLIR).	49
Figura 87 - Comparação das temperaturas da face não exposta e da captura termográfica.	50
Figura 88 - Temperaturas da Célula 1.	51
Figura 89 - Temperaturas da Célula 2.	51

Figura 90 - Temperaturas da Célula 3.	52
Figura 91 - Temperaturas das vigas.	52
Figura 92 - Localização dos cortes e pontos de medição, laje 1.	53
Figura 93 – Temperatura imposta e ocorrida no interior do forno e nas células 1, 2 e 3, Laje 2.	56
Figura 94 - Temperaturas nos conetores.	57
Figura 95 - Temperaturas na face não exposta, Laje 2.....	58
Figura 96 - Câmara termográfica ao longo do ensaio da Laje 2 (Variação 15-100 °C), LERM- IPB.....	59
Figura 97 - Temperaturas face não exposta da Laje 2, obtidas através da captura termográfica (FLIR).....	60
Figura 98 - Comparação das temperaturas da face não exposta e da câmara termográfica.	60
Figura 99 - Temperaturas da Célula 1.	61
Figura 100 - Temperaturas da Célula 2.	61
Figura 101 - Temperaturas da Célula 3.	62
Figura 102 - Temperaturas das vigas.	62
Figura 103 - Localização dos cortes e pontos de medição, laje 2.	63
Figura 104 - Modelo tridimensional das lajes em estudo, Ansys.....	67
Figura 105 - Malha de elementos finitos, Ansys.....	68
Figura 106 - Condições fronteira do modelo das lajes 1 e 2, (Meireles, 2014).	69
Figura 107 - Curvas de temperatura dos ensaios experimentais utilizadas nas análises numéricas das lajes 1 e 2.	69
Figura 108 – Solução numérica da Laje 1, imagem esquerda – temperatura mínima 20 °C e temperatura máxima de 525 °C, imagem da direita – espessura carbonizada, variação da temperatura de 20 a 300 °C, Ansys.	70
Figura 109 - Temperatura face não exposta, modelo numérico Laje 1.....	71
Figura 110 - Temperaturas célula 1, modelo numérica Laje 1.....	71
Figura 111 - Temperaturas célula 3, modelo numérico Laje 1.	72
Figura 112 - Temperaturas célula 2, modelo numérico Laje 1.	72
Figura 113 - Temperaturas nas vigas, modelo numérico Laje 1.	73
Figura 114 - Representação do corte 1 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	74
Figura 115 - Representação do corte 7 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	74
Figura 116 - Representação do corte 3 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	74
Figura 117 - Representação do corte 9 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	75

Figura 118 - Representação do corte 5 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	75
Figura 119 - Representação do corte 11 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.....	75
Figura 120 - Solução numérica da Laje 2, imagem esquerda – temperatura mínima 20 °C e temperatura máxima de 411 °C, imagem da direita – espessura carbonizada, variação da temperatura de 20 a 300 °C, Ansys.....	77
Figura 121 - Perfil de temperaturas na face não exposta.	77
Figura 122 - Perfil de temperaturas registadas na célula 1.	78
Figura 123 - Perfil de temperaturas registadas na célula 3.	78
Figura 124 - Perfil de temperaturas registadas na célula 2.	79
Figura 125 - Perfil de temperaturas registadas nas vigas.	79
Figura 126 - Representação do corte 1 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	80
Figura 127 - Representação do corte 7 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	80
Figura 128 - Representação do corte 3 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	81
Figura 129 - Representação do corte 9 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	81
Figura 130 - Representação do corte 5 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	81
Figura 131 - Representação do corte 11 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.....	82
Figura 132 - Temperaturas Laje 2 na furação (T 20-412 °C), Ansys.....	83
Figura 133 - Temperaturas Laje 2 na furação (T 20-300 °C), Ansys.....	83
Figura 134 - Localização dos novos pontos de medição.....	83
Figura 135 - Perfil de temperatura, face não exposta, modelo computacional e experimental, Laje 1.....	86
Figura 136 - Perfil de temperatura nas vigas, modelo computacional e experimental, Laje 1.	87
Figura 137 - Perfil de temperatura na célula 1, modelo computacional e experimental, Laje 1.	87
Figura 138 - Perfil de temperatura na célula 2, modelo computacional e experimental, Laje 1.	88
Figura 139 - Perfil de temperatura na célula 3, modelo computacional e experimental, Laje 1.	88
Figura 140 - Perfil de temperatura, face não exposta, modelo computacional e experimental, Laje 2.....	89
Figura 141 - Perfil de temperatura nas vigas, modelo computacional e experimental, Laje 2.	90
Figura 142 - Perfil de temperatura na célula 1, modelo computacional e experimental, Laje 2.	90

Figura 143 - Perfil de temperatura na célula 2, modelo computacional e experimental, Laje 2.	91
Figura 144 - Perfil de temperatura na célula 3, modelo computacional e experimental, Laje 2.	91
Figura 145 - Modelos de laje retangular e circular, IPB-ESTIG.	93
Figura 146 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, face não exposta.	94
Figura 147 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, face não exposta.....	94
Figura 148 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, na face das vigas.	94
Figura 149 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, na face das vigas.	94
Figura 150 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 1.....	95
Figura 151 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 1.....	95
Figura 152 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 2.....	95
Figura 153 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 2.....	95
Figura 154 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 3.....	96
Figura 155 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 3.....	96
Figura 156 - Velocidade de carbonização dos ensaios computacionais.....	97
Figura 157 - Velocidade de carbonização dos ensaios experimentais.	97

Capítulo 1

1 Introdução

Uma das matérias primas mais antigas a serem utilizadas na construção, é a madeira, pois é um material leve, de fácil montagem e maquinagem, relativamente barato e principalmente, apresenta boas características arquitetônicas, térmicas e acústicas. Este material privilegia pela sua elevada resistência, sobretudo quando comparada com o seu peso, e apresenta ótimas características de utilização, tais como, boa durabilidade, resistência à água salgada, à oxidação e à ação de agentes corrosivos.

A madeira é um material de fácil combustão, e quando de um acidente (incêndio) a superfície exterior da madeira que sofre a ação do fogo, vai formar uma camada envolvente de carbonização, que ajuda a retardar o processo de propagação da temperatura para o seu interior. Esta primeira camada pode mesmo ser comparada a um isolante térmico. Ao retardar o aquecimento do núcleo da madeira, este consegue manter durante mais tempo as propriedades inalteradas, tornando a degradação mais lenta em função do tempo de exposição ao fogo e também com as dimensões do elemento exposto.

Em contrapartida, a madeira acelera a sua própria deterioração, pois em combustão há libertação de gases, que expostos a altas temperaturas, produzem chamas, levando ao aquecimento da secção da madeira, induzindo a combustão e conseqüente a libertação de gases. Este é um processo contínuo e cíclico.

Conforme proposto pelo Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004), a temperatura de carbonização que esta em contato com o núcleo é de aproximadamente 300 [°C]. Todo o material que se encontre a uma temperatura superior é considerado carbonizado.

Este estudo incide sobre um tipo de madeira específico que é muito utilizado em construções com fins decorativos, arquitetônicos e acústicos, sendo a madeira abeto.

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).

Para este estudo foram construídos dois modelos de laje, semelhantes aos modelos de estruturas utilizadas na construção. As lajes são semelhantes, com cavidades celulares de diferentes perfurações entre as células. Estes modelos são constituídos por lajes pré-fabricadas em madeira de abeto.

As duas lajes construídas serão analisadas em ensaios experimentais submetidas à ação do fogo e os resultados serão comparados com um modelo numérico desenvolvido e validado através de um programa de elementos finitos.

Com os resultados obtidos dos ensaios experimentais e numéricos é possível determinar o comportamento da estrutura exposta a situação de incêndio e verificar a influência do tipo e dimensão da furação aplicados nas lajes.

1.1 Objetivos

O presente trabalho, tem como principal objetivo estudar o comportamento das lajes celulares em madeira, com diferentes perfurações na face inferior (teto), à ação do fogo, tendo por base a norma europeia (EN1365-2, 1999). Pretende-se verificar a sua resistência, através de dois ensaios experimentais, realizados num forno de resistência, preparado para utilizar curvas padrão, nomeadamente a curva de incêndio ISO 834 (ISO834, 1999), com o intuito de calcular o perfil das temperaturas em vários pontos da laje, a velocidade de carbonização e a evolução da temperatura também dentro das cavidades celulares.

Outro objetivo é validar o modelo numérico com o recurso ao programa de elementos finitos ANSYS, comparando os resultados obtidos, da velocidade de carbonização e do perfil de temperaturas em vários pontos da laje. Pretende-se ainda verificar a influência do tipo de perfuração na propagação do fogo, comparando este estudo com outro realizado anteriormente (Meireles, 2014).

1.2 Apresentação sumária dos capítulos

No **Capítulo 2** é feita uma breve abordagem ao comportamento de estruturas de madeira submetidas à ação de fogo, relativamente a estudos numéricos e experimentais realizados por vários autores.

No **Capítulo 3** apresenta-se uma descrição dos mecanismos de transferência de calor, os respetivos processos (condução, convecção e radiação), bem como as leis associadas, nomeadamente a Lei de Fourier, Lei de Newton e Lei de Stefan-Boltzmann.

O **Capítulo 4** inicialmente faz uma breve explicação da ação do fogo, apresenta as curvas paramétricas definidas pelo Eurocódigo 1 (EN1991-1-2, 2002), pela ASTM E119, (American Society for Testing and Materials) e a curva de incêndio natural, que caracteriza a evolução da temperatura em função do tempo de exposição ao fogo. Por fim, explica-se o comportamento térmico da madeira e apresentam-se as suas propriedades térmicas, nomeadamente a condutividade térmica, calor específico e a massa específica.

No **Capítulo 5** é exposto o modelo de laje utilizado neste estudo, assim como aspetos construtivos e exemplos de aplicação. Apresentam-se também os critérios de desempenho, as condicionantes derivadas às dimensões do forno de resistência utilizado e os tipos de vigas usados.

No **Capítulo 6**, são apresentadas as etapas percorridas para realizar os ensaios experimentais de resistência ao fogo: instrumentação dos diferentes termopares utilizados e respetiva colocação, bem como o procedimento para aquisição dos dados. Posteriormente, é feita uma abordagem ao forno utilizado para os ensaios de resistência térmica. Por fim apresentam-se os resultados experimentais, o comportamento térmico e a velocidade de carbonização das lajes em estudo.

No **Capítulo 7** é apresentado o estudo numérico realizado para os dois ensaios, através da utilização do programa de elementos finitos Ansys. O estudo numérico tem por base a evolução da temperatura nos compartimentos ocorrido nos ensaios experimentais, no interior das células e no interior do forno, com objetivo de determinar a velocidade de carbonização numérica e comparar com os ensaios experimentais.

No **Capítulo 8** são comparados os resultados experimentais com os resultados numéricos para as ambas as lajes, através da comparação do perfil de temperaturas em pontos homólogos

e a velocidade de carbonização em cada célula. A velocidade de carbonização é comparada com o valor de referência dado pelo Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004).

No **capítulo 9** são comparados os dados obtidos em relação a um ensaio de uma laje realizado anteriormente, através das curvas de temperatura e velocidade de carbonização em relação ao tipo de perfuração utilizado.

No **Capítulo 10**, são apresentadas as conclusões finais sobre o estudo desenvolvido, assim como algumas sugestões para futura investigação.

Capítulo 2

2 Estado da Arte

Desde os primórdios que a madeira foi utilizada na construção de inúmeros objetos, em especial na estrutura de habitações pois, trata-se de um material de baixo custo e de fácil processamento em construção.

Sendo este um material muito utilizado, surgiu a necessidade de desenvolver o conhecimento nesta área, principalmente, quando sujeita a risco de incêndio. Vários autores desenvolveram esta temática, utilizando ensaios experimentais complementados com simulações numéricas para compreender e estudar o comportamento quando submetidas à ação do fogo.

Com a evolução da ciência e da tecnologia houve a necessidade de criar normas, pelas quais todos os projetistas seguem na planificação e construção de novos projetos. Estas normas têm como finalidade obter estruturas seguras aquando expostas ao fogo, (EN1995-1-2, 2004).

2.1 Estudo experimental

Um dos métodos utilizados para investigar o comportamento da madeira em situação de incêndio são os ensaios experimentais. Porém, como em qualquer outro estudo, este método tem uma desvantagem, pois poderá acarretar um grande custo económico consoante o tamanho da estrutura a ser estudada. No entanto, este método começa a ser utilizado, tendo surgido trabalhos e investigações realizadas em lajes, construídas com vigas de madeira com configurações de estrutura celular, ou seja com uma área vazia entre vigas (Figura 1).



Figura 1 - Exemplo de estrutura celular em madeira, (Meireles, 2014).

Como referido, vários investigadores realizaram ensaios experimentais, com o objetivo de verificar a degradação física ocorrida na madeira sob ação do fogo, verificar a segurança em caso de incêndio, (White e Dietenberger, 1999), (Janssens, 2004), (Frangi A., 2004), (Pinto & Calil Junior, 2004), (Barreira, 2008), (Meireles, 2014).

Os estudos são realizados através da imposição de curvas parametrizadas, impostas pela regulamentação e são realizados em função do tipo de furação associada e do tempo de exposição (Figura 2).

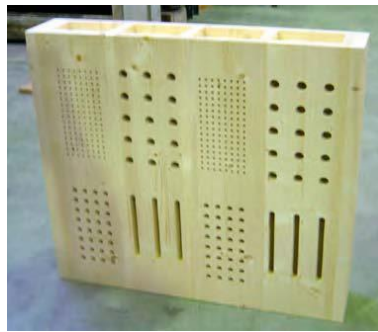


Figura 2 - Laje celular em madeira, (Frangi A., 2004).

Com o intuito de obter dados relativamente à carbonização da madeira, é conveniente estudar a velocidade de carbonização. Este parâmetro corresponde à espessura carbonizada durante um período de tempo, vários investigadores realizaram estudos experimentais para determinarem a velocidade de carbonização, (Schaffer, 1967), (Gardner et al, 1991), (White et al, 1992), (Pun et al, 1997), (Konig et al, 1999), (Pinto & Calil Junior, 2004), (Fonseca et al., 2013), (Meireles, 2014).

2.2 Estudo numérico

O estudo numérico é um método alternativo para avaliar o desempenho de estruturas. Para além de que o programa de elementos finitos, não implica custos elevados como o método experimental, é mais facilmente controlado, pois em ensaios experimentais, há fatores externos que influenciam nos resultados obtidos, como por exemplo a humidade do ar, temperatura entre outros. Existem inúmeros estudos realizados com objetivo principal de comparar e validar modelos numéricos realizados.

O conhecimento adquirido através de estudos realizados com modelos de elementos finitos bidimensionais (Figura 3), e tridimensionais (Figura 4) permite antecipar o comportamento de uma determinada estrutura. Vários autores realizaram estudos numéricos com o mesmo intuito (Frangi A., 2004), (Coelho D., 2011), (Couto, 2013), (Meireles, 2014).

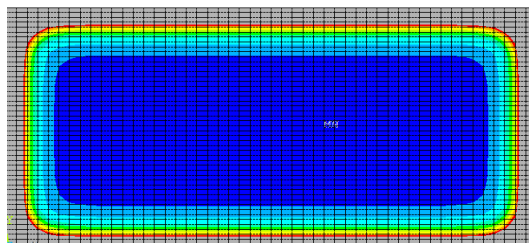


Figura 3 - Ensaio numérico de madeira casquinha vermelha (Coelho, 2011).

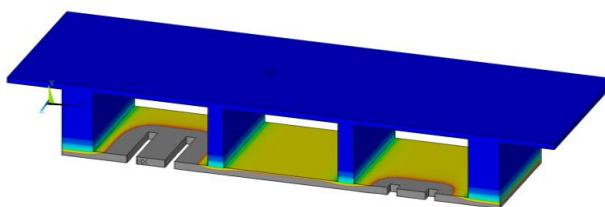


Figura 4 - Ensaio numérico tridimensional de laje celular (Couto, 2013).

2.3 Estudos realizados no IPB

Existem inúmeros estudos realizados acerca da carbonização da madeira, muitos desses estudos foram realizados no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), (Barreira, 2008), (Coelho, 2011), (Silva e Ramos, 2013), (Couto, 2013), (Fonseca et al, 2013), (Garzia et al, 2013), (Meireles, 2014).

Nas figuras seguintes, podem visualizar-se alguns exemplos de estudos realizados em ensaios experimentais e numéricos referentes a diferentes autores.



Figura 5 - Ensaio numérico 2D (Barreira, 2008).



Figura 6 - Ensaio experimental (Barreira, 2008).

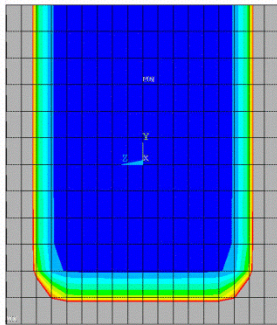


Figura 7 - Ensaio numérico 2D com madeira casquinha branca (Coelho, 2011).

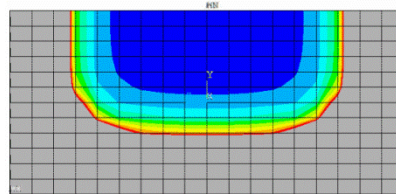


Figura 8 - Ensaio numérico 2D com madeira casquinha vermelha (Coelho, 2011).

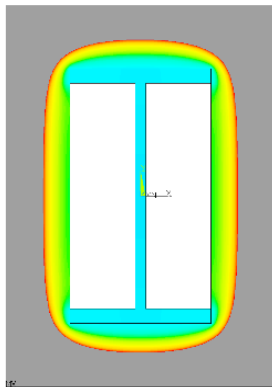


Figura 9 - Ensaio numérico 2D em estrutura madeira-aço ao fim de 1800 segundo (Silva e Ramos, 2013).

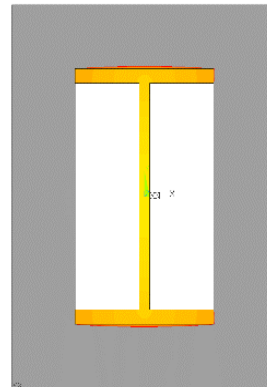


Figura 10 - Ensaio numérico 2D solução ao fim de 3000 segundo (Silva e Ramos, 2013).

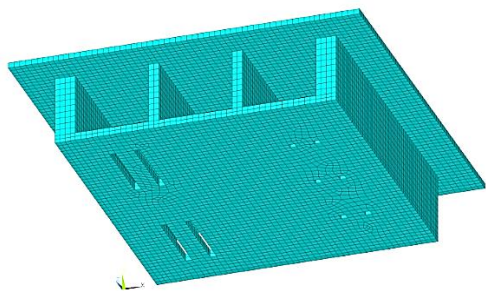


Figura 11 - Ensaio numérico 3D em madeira abeto (Couto, 2013).

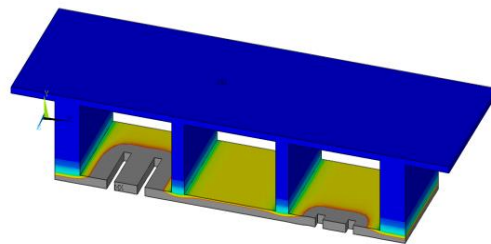


Figura 12 - Ensaio numérico 3D em madeira abeto ao fim de 1361 segundo (Couto, 2013).

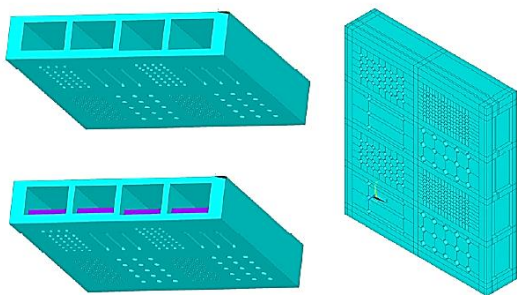


Figura 13 - Ensaio numérico 3D com laje celular, com e sem isolamento interno (Fonseca et al 2013).

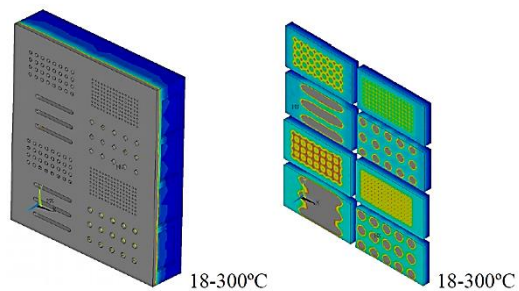


Figura 14 - Ensaio numérico 3D com laje celular, solução ao fim de 1800 segundo (Fonseca et al 2013).

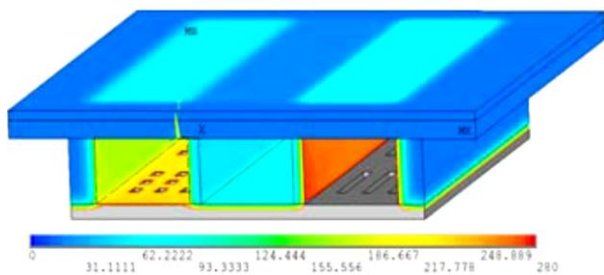


Figura 15 - Ensaio numérico 3D ao fim de 1500 segundo (Meireles, 2014).

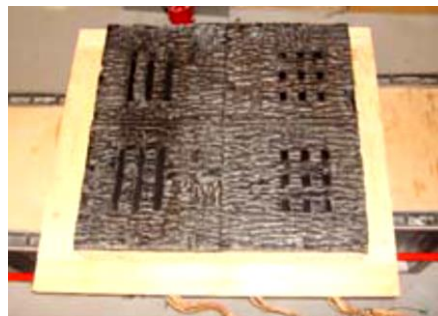


Figura 16 - Ensaio experimental, solução ao fim de 1500 segundo (Meireles, 2014).

Capítulo 3

3 Mecanismos de Transferência de Calor

“A transferência de calor é a área da ciência que estuda os mecanismos de transporte de calor e a determinação das distribuições de temperaturas e dos fluxos de calor” (Özisik, M. N., 1990), ou seja, refere-se à forma como o calor é transmitidos e as características que daqui advém.

Quando existe uma diferença de temperatura, ocorre transmissão de energia sob a forma de calor. “A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço” (Incropera, F. P., 2008). A transmissão, normalmente ocorre das superfícies de temperaturas superiores para as superfícies de temperatura inferiores, até que seja estabelecido o equilíbrio térmico. Este processo pode ocorrer entre meios sólidos, líquidos e gasosos sob a forma de condução, convecção e radiação (Figura 17).

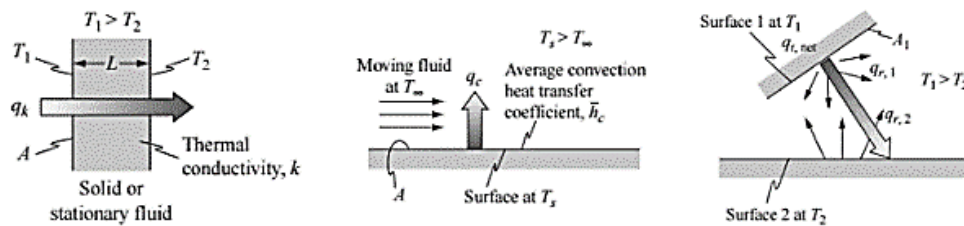


Figura 17- Condução, Convecção e Radiação, representação gráfica, (Kreith, F., 2011).

3.1 Condução

A condução de calor denomina-se como o processo de troca de energia entre sistemas, ou partes de um mesmo sistema em diferentes temperaturas, esta condução ocorre através da interação molecular, na qual moléculas de alto nível energético transferem energia às de menor nível energético. Este processo ocorre devido ao impacto ocorrido entre as moléculas, gerando uma onda térmica, cuja velocidade de propagação depende da condutibilidade do material (Washington B. F., 2003).

A condução de calor ocorre normalmente em meios sólidos, a energia é propagada sob a forma de calor através do contato de moléculas de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes. A condução varia de acordo com a condutividade do meio, ou seja, materiais com

elevada condutividade térmica, transmitem bem o calor, materiais com baixa condutividade térmica são maus condutores de calor, também denominados como materiais isolantes (ex. lã de vidro, borracha, madeira, entre outros).

3.1.1 Lei de Fourier

“A lei básica da condução de calor é baseada nas observações experimentais de Fourier...” (Washington B. F., 2003), designa-se por lei de Joseph Fourier (1768-1830) ou lei fundamental da condução. Esta considera que num sistema unidimensional sem movimento de fluídos, a velocidade de transferência de calor é proporcional ao produto do gradiente de temperaturas e a área normal à direção do fluxo de calor. Na figura 18 está esquematizado o modo de transferência de calor por condução num sólido ou em um fluido em regime estacionário de espessura, **L**.

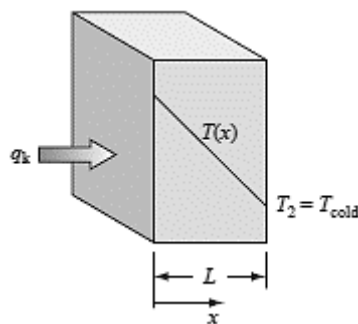


Figura 18 - Representação da condução de calor através de um sólido ou de um fluido em regime estacionário, (Kreith F., 2011).

Num regime estacionário, o fluxo de calor por condução **Q** num material homogéneo é expresso pela equação (1), e o fluxo de calor **q**, é expresso pela equação (2). A constante **k**, representa o coeficiente de condutividade térmica em [W/m°C], a constante **L** representa a espessura em [m], **T** representa as temperaturas em [°C] e **A** representa a área em [m²].

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

$$q = \frac{Q}{A} = -k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Como se pode verificar pela equação (1) e (2), a taxa de fluxo de calor depende da área da secção (**A**), do coeficiente de condutividade (**k**), da variação da temperatura (ΔT) e da variação da espessura (Δx). Nas expressões é colocado um sinal negativo para garantir que o fluxo de calor seja positivo para o sentido do fluxo de calor associado.

3.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor que abrange dois mecanismos, a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e a transferência de energia devido ao movimento global ou macroscópico do fluido (Incropera, F. P., 2008).

No estudo da convecção interessa essencialmente a transferência de energia que ocorre no contacto entre uma superfície e um fluido em movimento quando estas apresentam temperaturas diferentes. A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com o movimento do fluido, designada por convecção natural ou livre, convecção forçada ou convecção mista.

A convecção natural ocorre devido às diferentes densidades causadas pela diferença de temperatura no fluido, fazendo o fluido movimentar-se naturalmente (Figura 19).

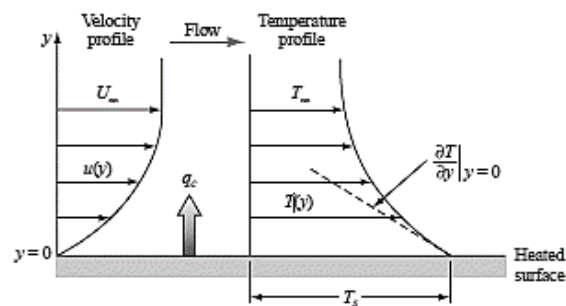


Figura 19 - Representação da convecção natural ou livre, (Kreith F., 2011).

A convecção forçada (Figura 20), ocorre quando o fluido é obrigado a movimentar-se num determinado sentido por ação de agentes externos (ex. ventiladores, bomba, entre outros).

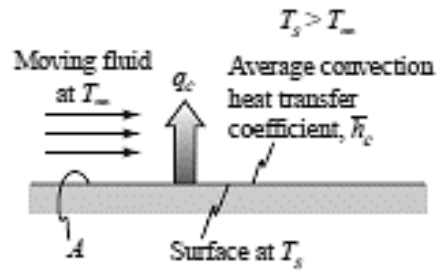


Figura 20 - Representação da convecção forçada, (Kreith F., 2011).

Por fim, poderá ocorrer uma convecção mista, onde ocorre simultaneamente os dois tipos de convecção anteriormente referidos.

3.2.1 Lei de Newton

A lei que se refere ao modo de transferência de energia por convecção designa-se por lei de Newton ou lei fundamental da convecção esta, dá-nos o fluxo de calor \mathbf{q} em $[\text{W}/\text{m}^2]$ transmitido através do produto do coeficiente de transferência de calor por convecção \mathbf{h} em $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$, e pelo gradiente de temperaturas \mathbf{T} em $[\text{K}]$ (Couto, 2013).

Se a temperatura da parede for superior à temperatura do fluído ($T_s > T_\infty$), o fluxo de calor é dado pela equação 3, se a temperatura do fluido for superior à temperatura da parede ($T_\infty > T_s$), o fluxo de calor é dado pela equação 4.

Neste trabalho, o fluido em movimento é o ar, este apresenta um coeficiente de transferência de calor por convecção \mathbf{h} , é $25 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$.

$$q = h. (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$q = h. (T_\infty - T_s) \quad (4)$$

3.3 Radiação

A radiação representa a energia emitida por toda a matéria que se encontre a uma temperatura não nula (Incropera, F. P., 2008). Sendo esta, emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas ou partículas de alta energia. A radiação de calor é a transferência de calor por meio de raios infravermelhos, sendo possível passar através do vácuo, viajando à mesma velocidade da luz (ex. calor solar). O feixe de radiação pode ser refletido, refratado ou absorvido, não afetando o meio por onde passa.

3.3.1 Lei de Stefan-Boltzman

O fluxo de calor transmitido devido à radiação é dado pela lei de Stefan- Boltzmann ou lei fundamental da radiação. Esta lei, afirma que a radiação do corpo negro E , expressa em $[\text{W}/\text{m}^2]$ é dado pelo produto da temperatura absoluta da superfície T em $[\text{K}]$ e pela constante de Stefan-Boltzmann σ em $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$, ou seja, obtida através das equações 5. O fluxo de calor emitido por um corpo real, é inferior a um corpo negro devido à emissividade do material, assim, o fluxo de calor determina-se de acordo com o produto da emissividade do material ϵ , a constante de Stefan-Boltzmann e a temperatura da superfície.

$$E = \sigma. T_S^4 \quad (5)$$

$$E = \epsilon. \sigma. T_S^4 \quad (6)$$

A constante de Stefan-Boltzman é igual a $5.6697 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ e a emissividade da superfície é adimensional com valores compreendidos entre zero e um.

Como visto anteriormente, o fluxo de calor transmitido devido à radiação depende da emissividade do material da superfície, da sua área e da temperatura imposta.

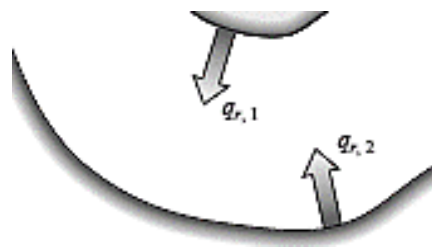


Figura 21 - Representação da transferência de calor por radiação, (Kreith F., 2011).

Capítulo 4

4 Ação do Fogo

4.1 Introdução

A ação do fogo, é uma parte importante a ter em conta na construção e dimensionamento de estruturas pois, atua como agente destrutivo na maioria dos materiais, sendo necessário haver um maior controlo e preocupação acerca da segurança contra incêndio, nomeadamente o tempo que a estrutura mantém o seu desempenho quando exposta a condições dessa natureza.

Através do estudo da exposição ao fogo em materiais como a madeira, é necessário ter em atenção a proteção da vida dos ocupantes, dos bens existentes, da própria estrutura, proteção ambiental, entre outros. Logo, é necessário diminuir o risco de ocorrência de incêndio e aumentar a duração do material quando exposto ao fogo. Para isso existe o regulamento de segurança contra incêndio em edifícios (EN1991-1-2, 2002), que incide na resistência dos materiais ao fogo tendo por base determinadas regras na construção de estruturas que têm de ser seguidas.

Para realizar o estudo da resistência ao fogo de elementos, seria vantajoso efetuar o estudo físico e completo de uma estrutura. Este estudo implicaria grandes custos económicos. Para evitar custos elevados, usam-se frequentemente modelos representativos mais reduzidos como por exemplo as lajes celulares perfuradas que serão objeto deste trabalho, ou recorre-se a programas de simulação numérica de elementos finitos.

4.2 Incêndio natural

Um incêndio natural ocorre quando existe em simultâneo uma fonte de calor, combustível e oxigénio, estes elementos quando misturados a uma determinada temperatura entram em combustão. Um incêndio natural define-se em quatro fases (Figura 22), a ignição, a fase inicial, a fase de plena combustão e a fase de arrefecimento.

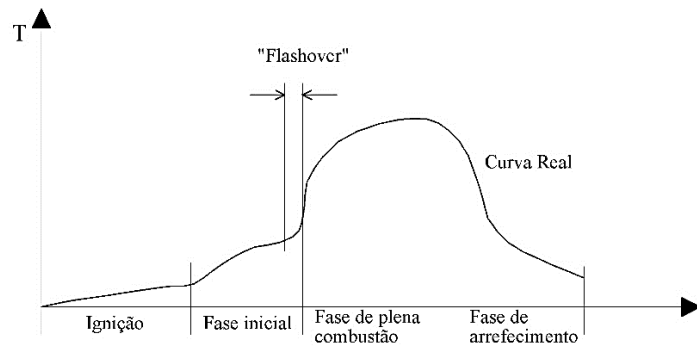


Figura 22 - Fases de um incêndio natural, (Real, 2003).

O início de um incêndio natural, na fase de ignição e fase inicial, não influencia o comportamento de uma estrutura, devido às temperaturas serem relativamente baixas, mas é nesta fase que ocorre a maior libertação de gases tóxicos. Após ocorrer a fase inicial, dá-se a propagação do incêndio, ou seja, a radiação atinge níveis elevados, passando o incêndio para todos os materiais combustíveis, criando assim, a fase mais crítica de um incêndio, o “flashover”. Este caracteriza-se pela transição entre a fase de aquecimento e de queima nesta fase, a temperatura aumenta rapidamente, devido à grande produção de chamas e quantidade de oxigénio existente no ar (Meireles, 2014).

De seguida, surge a fase de plena combustão. Nesta ocorre a queima de todos os materiais combustíveis e a temperatura mantém-se mais ou menos constante ao longo do incêndio. Por fim, sucede a fase de arrefecimento, devido à diminuição do combustível ou até do oxigénio, surge uma diminuição da temperatura que poderá levar à extinção do incêndio.

4.3 Curvas normalizadas de incêndio

As curvas normalizadas de incêndio, são curvas que representam a evolução da temperatura ao longo do tempo. A sua evolução é definida em regulamentos relacionados com o estudo da ação do fogo como o Eurocódigo 1 (EC1, EN1991-1-2, 2002) e o ASTM E119 (American Society for Testing and Materials). Segundo o EC1, a curva padronizada é a ISO 834, definida pela equação 7 (ISO834, 1999).

$$T = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (7)$$

O T , representa 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].

A curva definida pelo EC1 (EN1991-1-2, 2002) que determina o perfil de temperaturas para elementos estruturais externos é dada pela equação 8 e após 30 [min] de exposição permanece constante a 680 [°C].

$$T = 660 \times [1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}] + T_0 \quad (8)$$

Na equação anterior, o T_0 representa a temperatura inicial do compartimento em [°C] e t representa o tempo decorrido em [min].

A curva definida pelo EC1 (EN1991-1-2 2002) que mostra o perfil de temperaturas dos hidrocarbonetos é descrita pela equação 9, após 30 [min] de exposição, mantém uma temperatura constante de 1100 [°C].

$$T = 1080 \times [1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}] + T_0 \quad (9)$$

Na curva definida anteriormente, T_0 representa a temperatura inicial do compartimento em [°C] e t o tempo decorrido de ensaio em [min].

Por fim, a curva definida pela norma ASTM E119 (equação 10), avalia o comportamento de elementos estruturais ao fogo.

$$T = 750 \times [1 - e^{-3.79553\sqrt{t}}] + 170.41 \times \sqrt{t} + T_0 \quad (10)$$

O t representa o tempo decorrido desde o início do ensaio em [horas] e T_0 a temperatura inicial do compartimento em [°C]. Na figura 23, representam-se as diferentes curvas descritas anteriormente para uma exposição até 300 [s].

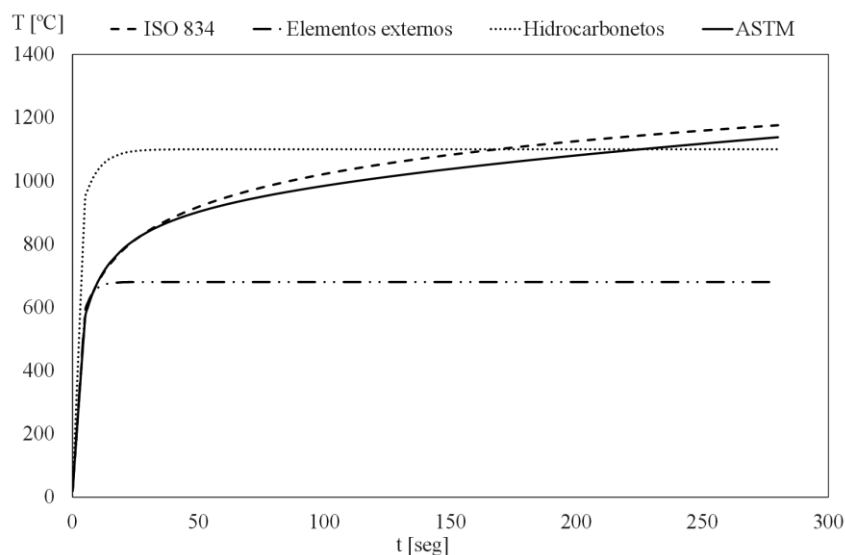


Figura 23 - Curvas de incêndio normalizadas, EC1 e ASTM.

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 (Barreira, 2010).

4.4 Comportamento térmico da madeira

De acordo com o material, a ação do fogo provoca diferentes reações. No caso da madeira, ocorre uma diminuição da secção transversal. No caso do aço, diminui a sua rigidez e resistência.

No caso da madeira, quando exposta ao fogo, pode-se distinguir três camadas ao longo da sua secção. A camada superficial denominada por carvão, ou seja é material carbonizado, de seguida ocorre a zona de pirolise e por fim há a madeira intacta.

A camada inicial ou camada carbonizada, funciona como isolante térmico devido à sua baixa condutividade térmica, impedindo a penetração do calor para o interior da secção. A zona de pirólise é uma camada mais fina, definida pelo material que se encontra com propriedades térmicas modificadas devido à temperatura imposta, mas, ainda não é material degradado. A zona de madeira intacta é definida no interior da secção, onde a madeira ainda não sofreu nenhuma alteração nas suas propriedades.

4.4.1 Velocidade de carbonização da madeira

A taxa de carbonização é a velocidade de transformação de madeira em carvão, sendo esta fundamental para avaliar a resistência de estruturas submetidas à ação do fogo pois, o colapso de estruturas de madeira dá-se devido à diminuição da área resistente (Pinto e Calil Junior, 2004).

Existem inúmeros métodos para determinar a velocidade de carbonização, sendo baseados em modelos empíricos determinados através de dados experimentais e teóricos.

De acordo com o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004), a determinação da velocidade de carbonização ($d_{char,0}$) expressa em [mm], baseia-se na equação 11, onde t é o tempo de exposição ao fogo em [min] e β_0 a velocidade de carbonização em [mm/min]. Segundo o EC5 (EN1995-1-2, 2004), a velocidade de carbonização varia de acordo com a massa volúmica e a tipologia da madeira (Tabela 1).

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (11)$$

Tabela 1 - Valores de β , para o cálculo da taxa de carbonização da madeira, EC5 (1995-1-2, 2004).

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

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

O método de determinação da velocidade de carbonização anterior, não é eficaz para contabilizar o efeito e arredondamento dos cantos e fissuras quando a estrutura está sujeita ao fogo em três direções (Figura 24).

Assim, para contabilizar esse efeito, determina-se a velocidade de carbonização pela equação 12, apresentado pelo EC5 (EN1995-1-2, 2004).

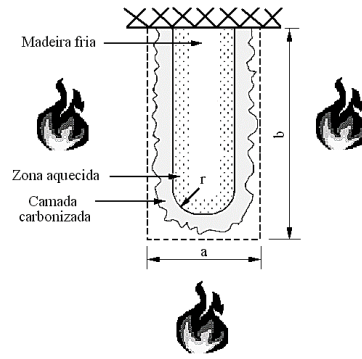


Figura 24 - Arredondamento de uma secção exposta ao fogo em três direções, (Barreira, 2008).

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (12)$$

4.4.2 Camada de carbonização efetiva

A camada de carbonização efetiva contabiliza o efeito de pirólise, segundo o EC5 (EN1995-1-2, 2004), o cálculo da camada de carbonização efetiva (Figura 25) é definido pela equação 13, onde k_0 é uma constante obtida com base na Tabela 2 e $d_{char,n}$ é calculado recorrendo à equação 12.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (13)$$

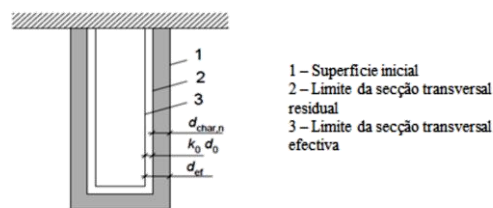


Figura 25 - Seção transversal residual e seção transversal efetiva, EC5 (EN1995-1-2, 2004).

Tabela 2 – Constante k_0 , para superfícies não protegidas.

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

4.5 Propriedades térmicas da madeira

Cada material apresenta diferente resistência a alterações térmicas. As propriedades que definem o comportamento térmico do material quando sujeito a variações da sua temperatura, são o calor específico, a condutividade térmica e a massa volúmica.

As propriedades térmicas enunciadas anteriormente, estão definidas no anexo B do EC5 (EN1995-1-2, 2004) nomeadamente na parte B2. Segundo o Eurocódigo, considera-se uma humidade inicial de 12% e temperatura ambiente de 20 [°C].

A condutividade térmica (λ), representa a taxa a que a energia calorífica que passa através de 1 [m²] de área transversal por cada diferença de grau (K) ao longo das superfícies. Esta determina ainda as propriedades de isolamento do material, ou seja, quanto maior a condutividade menor isolamento, logo a taxa de transferência de calor será superior.

O calor específico (Cp) de um material consiste, na quantidade de calor que é necessário fornecer para elevar a temperatura de um grau a uma unidade de massa de uma substância, isto é, a energia necessária para aumentar a temperatura de 1 [Kg] de material em 1 [°C ou K].

A massa volúmica de um material é definida pela massa por unidade de volume. Esta propriedade não é fixa e pode normalmente ser alterada com a mudança de pressão ou temperatura, sendo esta mudança normalmente mais notória em gases do que em líquidos ou sólidos (Barbosa, 2012).

4.5.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica representa a taxa temporal de transmissão de energia, sob a forma de calor através de um material, esta grandeza física permite distinguir um material bom condutor de um mau condutor de calor. Um material com uma condutividade térmica elevada é um bom condutor de calor e um material com uma baixa condutividade térmica é um mau condutor de calor. No caso da madeira, é um material que possui baixa condutividade térmica, relativamente a outros materiais de construção.

Na tabela seguinte é apresentada, a variação da condutividade térmica da madeira, de acordo com a temperatura a que esta fica sujeita (EN1995-1-2, 2004).

Tabela 3 - Condutividade térmica da madeira, EC5.

Temperatura [°C]	Condutividade térmica (λ) [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

Na figura 26 é possível visualizar a evolução da condutividade térmica em função da variação da temperatura.

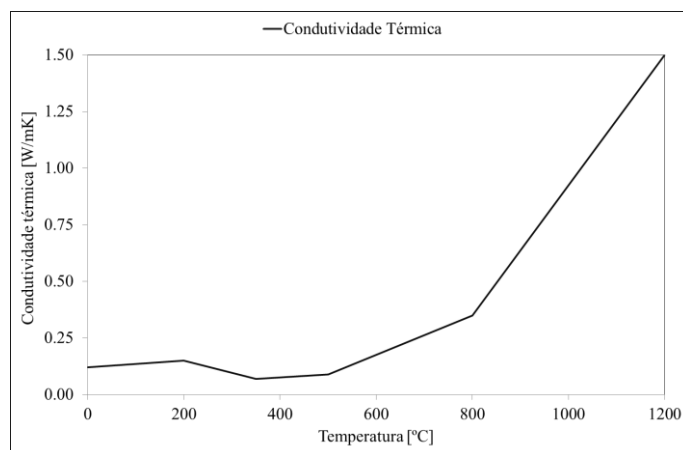


Figura 26 - Variação da condutividade térmica da madeira em função da temperatura, EC5.

4.5.2 Calor específico

O calor específico depende unicamente da temperatura e da humidade existente na madeira, este representa a quantidade de calor que é necessário fornecer a uma unidade de massa para aumentar a sua temperatura de um grau. Os valores propostos pelo EC5 para esta propriedade estão definidos na tabela seguinte e representados no respetivo gráfico.

Tabela 4 - Calor específico da madeira, EC5.

Temperatura [°C]	Calor Específico [kg/kJ.K]
20	1,53
99	1,77
100	13,60
110	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

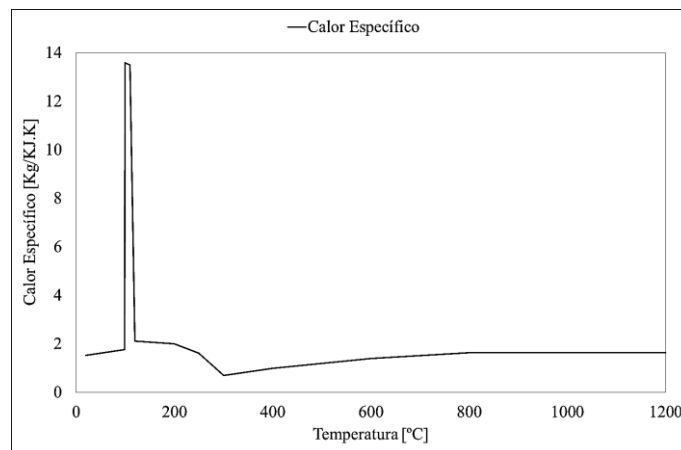


Figura 27 - Calor específico em função da temperatura.

4.5.3 Massa volúmica

A massa volúmica de um material, define-se pela massa por unidade de volume. Esta propriedade não é fixa e pode normalmente ser alterada com a mudança de pressão ou temperatura, sendo esta alteração normalmente mais notória em gases do que em líquidos ou sólidos.

A massa volúmica da madeira determina-se de acordo com o teor de humidade existente no material. Na tabela 5 apresenta-se um fator relativo à massa volúmica em função da

temperatura, sendo a massa volúmica do material utilizado igual a 450 [kg/m³] à temperatura ambiente para as placas e 480 [kg/m³] para as vigas que separam as células.

A massa volúmica determina-se através do produto entre o respetivo fator proposto pelo EC5 e o valor da massa volúmica do material à temperatura ambiente para uma humidade (w). No caso em estudo considerou-se uma humidade de 12 %.

Tabela 5 – Massa Volúmica da madeira, EC5.

Temperatura [°C]	Fator
20	1 + w
99	1 + w
100	1 + w
110	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	0.0

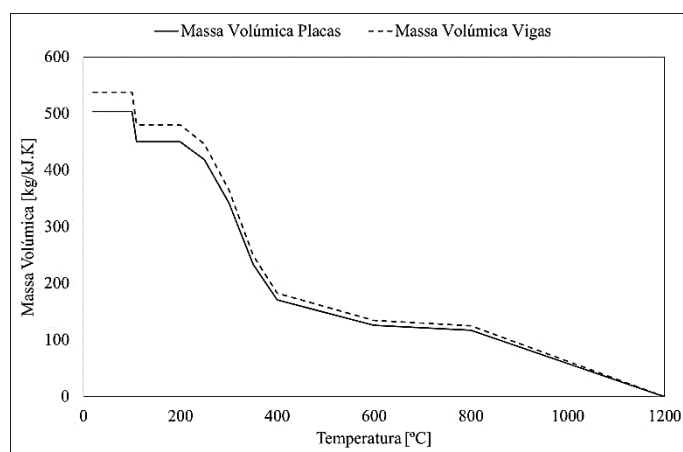


Figura 28 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura.

Capítulo 5

5 Lajes celulares com perfurações

O modelo de laje utilizado neste trabalho baseia-se na combinação de duas placas que são suportadas por vigas separadas, sendo responsáveis pela formação de uma estrutura celular. As duas placas utilizadas denominam-se por placa de pavimento e de teto.

Este tipo de estruturas em madeira podem ser construídas com ou sem perfurações na placa de teto. São estruturas leves e de fácil montagem, apresentam boas características térmicas, arquitetônicas e acústicas, permitindo soluções a nível de peso e segurança (Figura 29).



Figura 29 - Modelos de lajes celulares em madeira, (Meireles, 2014).

A utilização deste tipo de estruturas é muito diversa (Figura 30). Geralmente estas estruturas são utilizadas em todo o tipo de construções, paredes, tetos, etc., devido às suas boas características térmicas e acústicas, permitindo um maior conforto em todo o tipo de utilização.



Figura 30 - Utilização de lajes celulares no quotidiano.

5.1 Critérios de desempenho

Os critérios de desempenho baseiam-se numa norma europeia de ensaios de resistência ao fogo (EN1363-1, 2012), sendo esta sujeita a uma situação normalizada de incêndio. Segundo a norma, os três critérios a serem avaliados são, a capacidade de carga (**R**), o isolamento (**I**) e a estanquidade (**E**).

5.1.1 Capacidade de carga

O critério de capacidade de carga, é avaliado pelo tempo em minutos completos, que a estrutura apresenta condições para suportar a carga imposta, ou seja, é o tempo que demora até que a estrutura entre em colapso. A situação de colapso, é definida de acordo com um valor limite para o deslocamento ou de acordo com um valor limite para a taxa de deslocamento da estrutura.

5.1.2 Isolamento

O critério de isolamento baseia-se no tempo em minutos completos que a estrutura apresenta capacidade de isolamento, garantindo que a temperatura na face não exposta seja inferior ao valor imposto pelo critério. A verificação do isolamento é feito de acordo com um dos dois critérios seguintes. O primeiro indica que o incremento médio de temperaturas em relação à temperatura média inicial não deverá ultrapassar os 140 °C, e o segundo refere que o incremento máximo de temperatura em qualquer ponto da face não exposta, não seja superior a 180 °C em relação à temperatura inicial (EN1993-1, 2012).

5.1.3 Estanquidade

A estanquidade é definida pelo tempo em minutos completos que a amostra de material consegue manter o isolamento, para prevenir a transmissão do fogo de um lado para o outro da

amostra, este critério é realizado utilizando um sensor em algodão, embebido em álcool etílico (produto inflamável). Considera-se que a amostra desempenha bem a sua função, até que se verifique um dos seguintes critérios, ignição do algodão, penetração de um calibre ou aparecimento de chama por penetração.

5.2 Construção da laje

O modelo de laje em estudo é ensaiado num forno de resistência ao fogo (Figura 31), existente no Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais (LERM), no Instituto Politécnico de Bragança. Este forno apresenta 4 queimadores, com funcionamento a gás natural com uma potência de 360 [kW] e um volume útil de 1 [m³], estando preparado para funcionar com qualquer curva aquecimento (Meireles, 2014).

O acoplamento da laje com o forno é feito na parte superior, utilizando um anel de aço com betão refratário (bastidor), que fixa a laje à estrutura do forno (Figura 32).



Figura 31 - Forno de alta resistência, LERM-IPB.

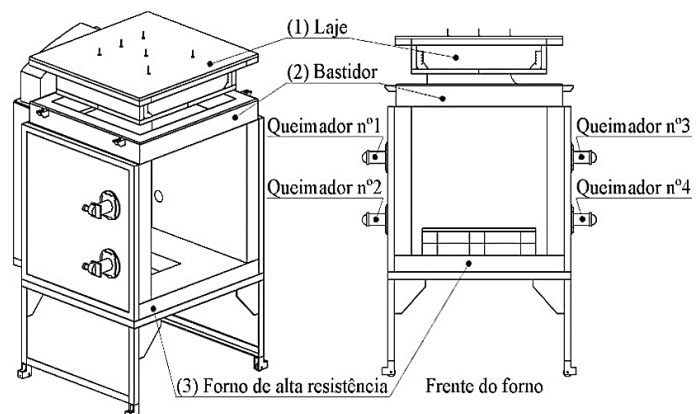


Figura 32 - Forno, bastidor e laje, (Meireles, 2014).

Os tipos de construções realizadas com este género de material podem ser diversos. As principais diferenças entre lajes do mesmo tipo distinguem-se na placa de teto pois, esta pode apresentar diferentes formas e tamanhos de furações, com fim a melhorar a sua característica estética e funcional, bem como adaptá-la às diferentes situações em que pode ser utilizada.

Neste tipo de laje, é usual encontrar várias formas de furações, não só com objetivo de melhorar a sua forma estética mas também com objetivo de melhorar o seu desempenho acústico e funcional. No caso em estudo, quando uma laje está sujeita a situação de incêndio, as diferentes furações na sua estrutura implicam diferente desempenho térmico, e consequente resistência ao fogo.

Assim sendo, optou-se por três tipos de furações nas células, sendo possível visualizar as diferentes furações realizadas na figura 33. A cada tipo de perfuração está associada a uma célula diferente, sendo estas denominadas por célula 1,2 e 3.

A célula 1 apresenta dois conjuntos de furações circulares com 10 [mm] de diâmetro. A célula 2 não apresenta qualquer tipo de furação. A célula 3 apresenta uma furação semelhante à célula 1, mas com furações de diâmetro 20 [mm].

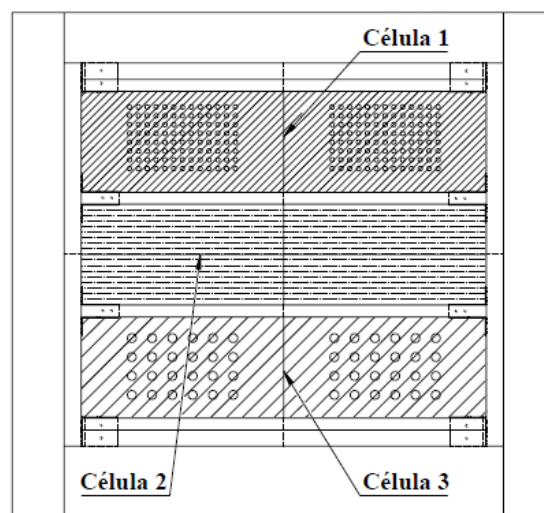


Figura 33 - Tipo de furação associado a cada célula.

5.3 Caracterização da laje

O dimensionamento da laje é feito de acordo com as dimensões do forno, e respetivo material fornecido pela empresa JULAR. Assim, admite um modelo de laje próximo com o representado na figura 33. Os desenhos de definição deste modelo estão descritos no anexo A1.

Como se pode verificar pela figura 34 e nos respetivos desenhos definição, a laje é constituída por uma placa superior em painel tricapa (A), denominada por placa de pavimento

(superfície não exposta), com dimensões de 1150 x 1232 x 20 [mm], e por uma placa em painel tricapa inferior denominada por placa de teto (superfície exposta), (B), com dimensões de 870 x 996.80 x 32 [mm]. Na parte interior, de forma a dividir as células (cavidades), foram utilizadas quatro vigas em painel tricapa (C) com dimensões de 918.8 x 200 x 27 [mm]. Para aumentar a resistência da laje, é ainda colocada uma armadura exterior constituída por duas vigas Kerto S com 918.8 x 200 x 37 [mm] e duas vigas Kerto S com 870 x 200 x 39 [mm], (D).

O acoplamento de todos estes elementos foi realizado através da utilização de conectores metálicos e parafusos apropriados ao material usado. Os elementos de ligação utilizados são os SIMPSON com asas exteriores para vigas tipo 300 (A=27, B=133, C=84) e os elementos de ligação SIMPSON com asas interiores, para ligação da armadura tipo 300 (A=64, B=133, C=76), (Anexo A4).

O material utilizado na conceção da laje é o abeto cuja densidade é igual a 450 [kg/m³] para as placas de teto e pavimento, e de 480 [kg/m³] para as vigas e armadura exterior, esta diferença de densidade varia devido ao processo utilizado no seu fabrico.

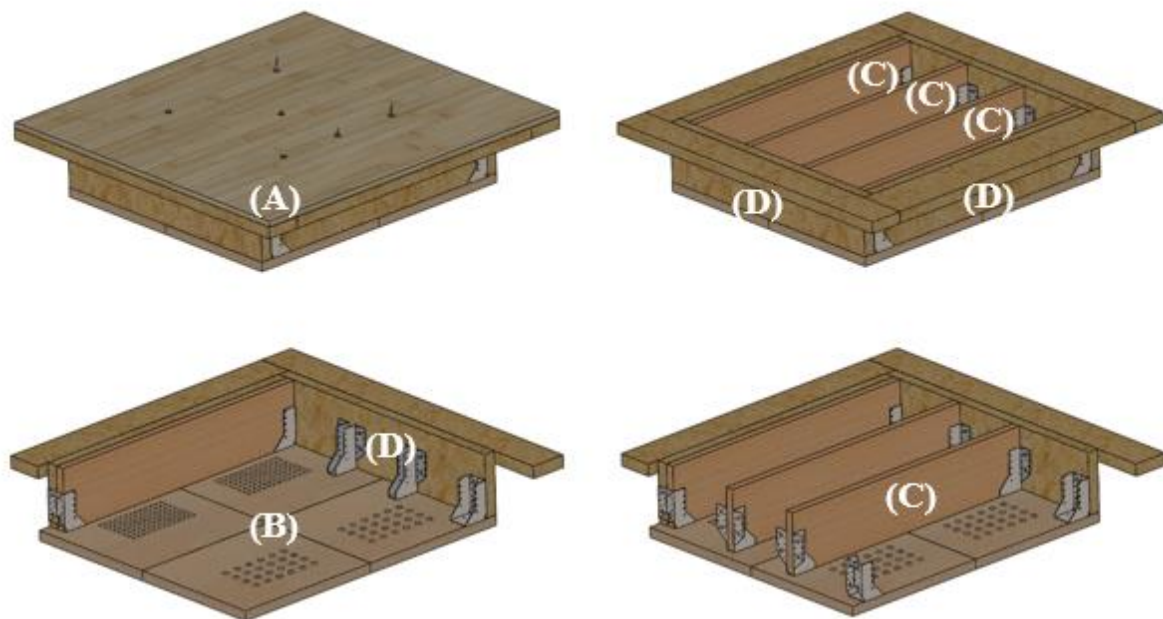


Figura 34 - Modelo de laje em estudo, SolidWorks.

5.3.1 Tipos de estruturas de madeira

Todo o material utilizado na laje é proveniente da madeira abeto, cuja massa volúmica varia de acordo com o processo de fabrico, sendo utilizados dois tipos de material para as vigas kerto S e para os painéis tricapa.

As vigas Kerto S são micro-laminados, constituídas por várias camadas de laminado de madeira abeto com aproximadamente 3 [mm] de espessura, coladas a quente com diferentes orientações entre si, por forma a aumentar a sua rigidez em todos os sentidos. Neste caso, as espessuras utilizadas para as vigas kerto S são de 37 e 39 [mm] (Figura 35).

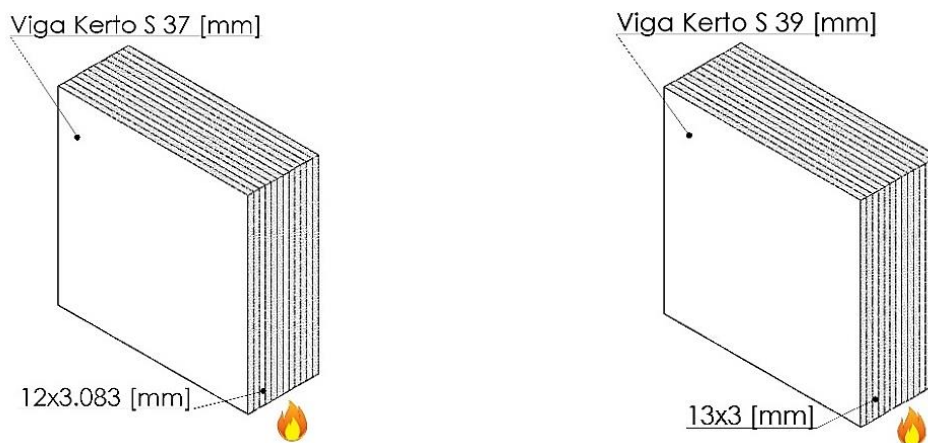


Figura 35 - Vigas Kerto S de 37 e 39 [mm], (Meireles 2014).

Os painéis tricapa são compostos por três camadas de madeira, coladas entre si, com diferentes orientações para aumentar uniformemente a sua rigidez. A espessura das camadas varia de acordo com as dimensões desejadas. No caso em estudo, utiliza-se este tipo de painéis na placa de pavimento (A), na placa de teto (B) e nas vigas (C), com espessuras de 20, 32 e 27 [mm] respetivamente (Figura 36).

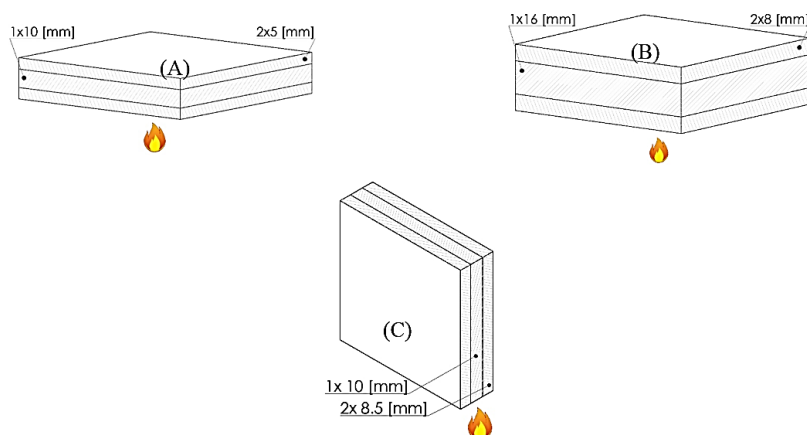


Figura 36 - Pormenor construtivo.

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

5.4 Construção das lajes

Para este estudo, foram construídas duas lajes celulares para ensaio de resistência ao fogo normalizado, através da imposição da curva de incêndio padrão ISO 834. A construção das lajes foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), do Instituto Politécnico de Bragança.

5.4.1 Lajes para os ensaios normalizados

As lajes celulares foram construídas de acordo com dimensões impostas previamente (anexo A1), sendo a placa de teto a que implicaria mais tempo na sua preparação devido à furação. Foi conveniente começar a construção pela preparação da placa de teto. Como inicialmente, o painel que iria ser utilizado para a placa de teto apresentava grandes dimensões, foi necessário cortar em quatro partes iguais, para ser possível recorrer ao centro de maquinagem CNC, de modo a facilitar o processo de furação.

Nas figuras 37, 38 e 39, é possível visualizar o processo de corte da placa de teto, assim como a colocação na máquina CNC e respetiva maquinagem.



Figura 37 - Placa de teto cortadas em quatro partes iguais, LTM.

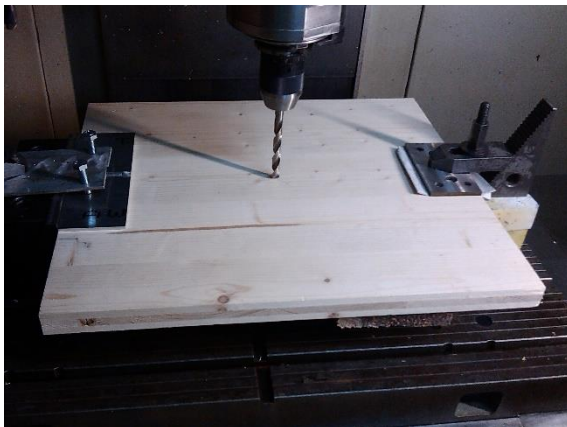


Figura 38 - Colocação de 1/4 de placa de teto na máquina CNC e início da maquinação, LTM.

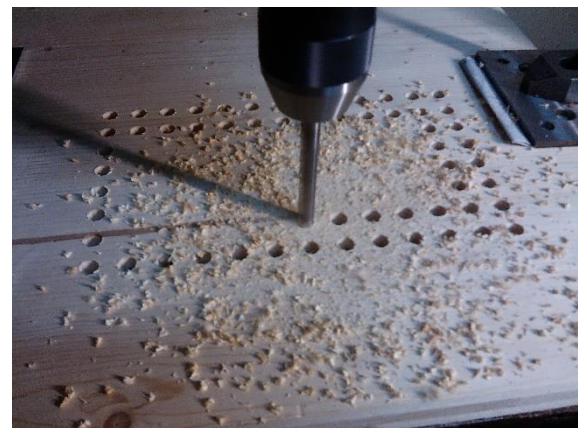


Figura 39 - Maquinação das perfurações de 10 e 20 [mm] na CNC, LTM.

Na figura 40 é possível visualizar a placa de teto com as perfurações associadas a cada célula.



Figura 40 - Placa de teto com furações circulares, LTM.

Após a maquinagem da placa de teto (Figura 40), foi realizado a preparação de todas as vigas e da placa de pavimento, para isso foi utilizada a fresadora (Figura 41). Para fazer a ligação entre as placas, são utilizados conectores Simpson metálicos, para se obter superfícies completamente planas, foi necessário também retirar material das placas (Figura 42) para haver um contacto perfeito nas ligações, para diminuir os espaços abertos entre as mesmas (Figuras 43 e 44).

Após toda a preparação (Figura 45), realiza-se a montagem final (Figura 47), obtendo duas lajes similares denominadas por laje 1 e laje 2 (Figura 47).



Figura 41 – Fresadora vertical, (Imagem Google).

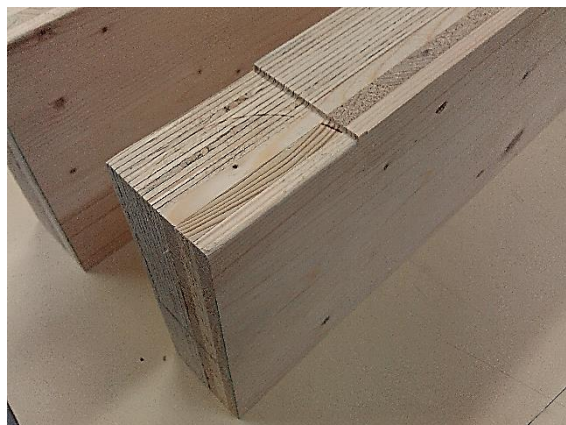


Figura 42 - Rebaixo para aplicação do conector Simpson, LTM.

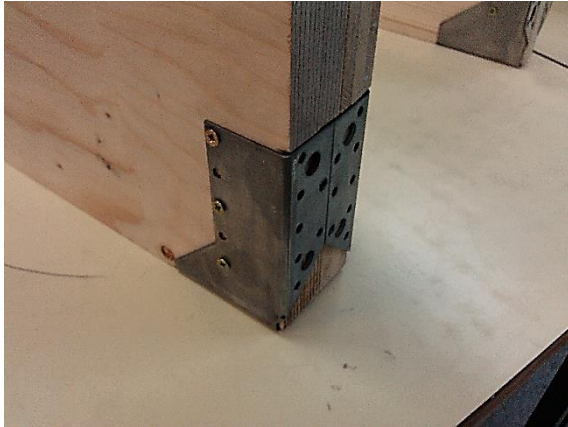


Figura 43 - Conector metálico Simpson SAI300/64/2, LTM.



Figura 44 - Conector metálico Simpson SAE300/70/2, LTM.



Figura 45 - Vigas com conectores metálicos, LTM.



Figura 46 - Montagem da laje, LTM.

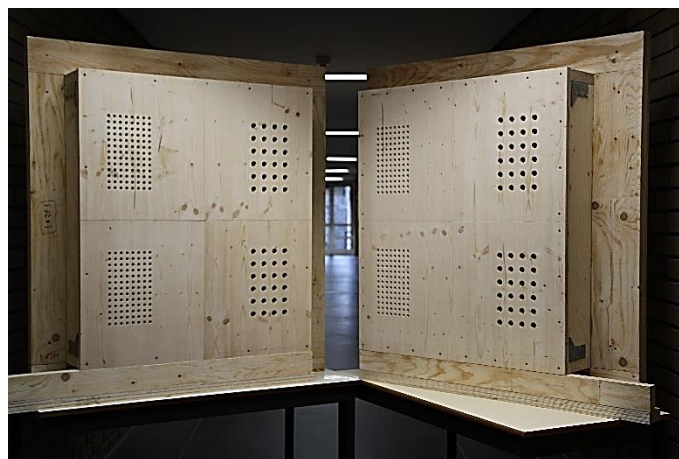


Figura 47 - Laje 1 e 2 concluídas, ESTIG-IPB.

Capítulo 6

6 Ensaios experimentais de resistência ao fogo.

O ensaio experimental é realizado num forno de gás natural, que evolui de acordo com uma curva padrão ISO834. Para posterior análise, é necessário saber a evolução da temperatura em determinados pontos nas lajes, ou seja, é necessário colocar sensores térmicos (Termopares). Este processo, de instrumentação, é muito importante devido à aquisição dos dados provenientes dos termopares.

A instalação dos termopares, é similar à utilizada em outros modelos de laje (Meireles, 2014), sendo baseada nas especificações impostas pelas normas (EN1363-1, 2012) e (EN1365-2, 2012), com ligeiras modificações.

Neste estudo, pretende-se verificar o comportamento da laje em situação de incêndio consoante o tipo de furação existente, sendo fundamental comparar o seu comportamento com modelos de laje celular já estudados.

Como a placa de teto está diretamente em contato com o fogo, utiliza-se um maior número de termopares para determinar a evolução das temperaturas, estando estes sensores localizados no interior da laje. Os restantes termopares, estão distribuídos pelos conectores metálicos, no interior das células e na face não exposta (pavimento), com fim a determinar a temperatura mínima, média e máxima (Critério I).

Os termopares estão simetricamente localizados, para tornar possível comparar a evolução de temperaturas em locais simétricos da laje. Na figura seguinte, é possível verificar a sua distribuição, sendo no total utilizados 27 termopares em cada laje (Anexo A2).

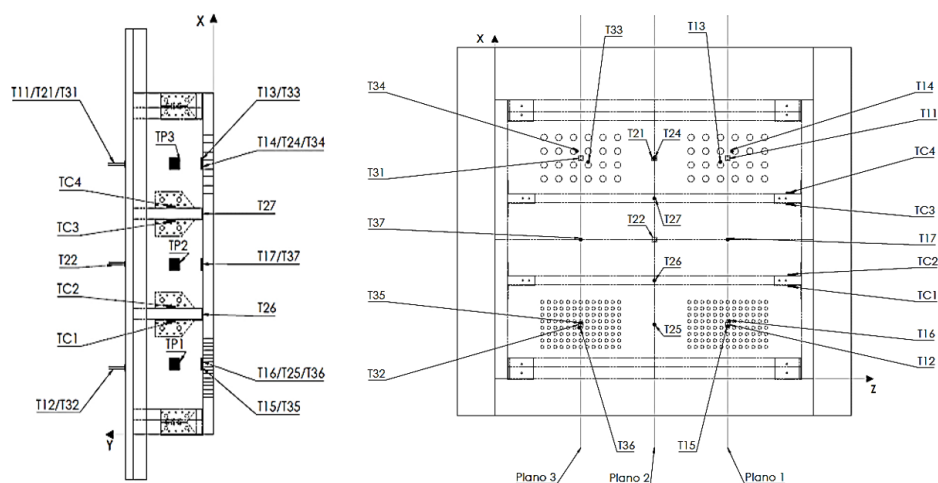


Figura 48 - Desenho de definição da localização dos termopares, SolidWorks.

6.1 Instrumentação com termopares tipo K

O fio termopar utilizado neste estudo é do tipo K (Figura 49), constituído por dois fios, um amarelo correspondendo ao sinal positivo, e um vermelho que corresponde ao sinal negativo, resistentes a altas temperaturas.



Figura 49 - Fio termopar tipo K, LTM.

Para que o fio termopar registre o perfil de temperaturas, é necessário fazer a junção do termopar. O local de leitura da temperatura é no ponto de contacto entre ambos (junção). Como o ensaio envolvia temperaturas elevadas, de modo a garantir uma leitura correta, todo o fio termopar é protegido com papel de alumínio (Figura 50), e todos os pontos de leitura, protegido com massa térmica (Figura 51).



Figura 50 - Preparação da proteção do fio termopar, LTM.

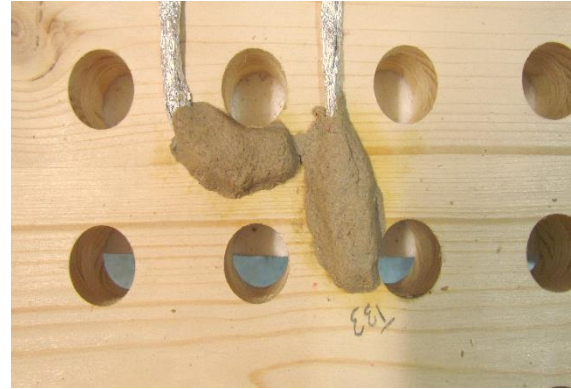
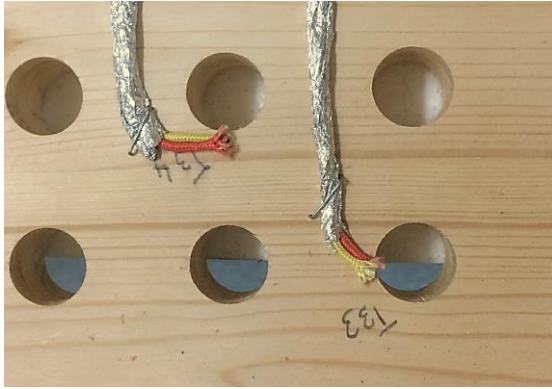


Figura 51 - Processo de proteção do ponto de medição com massa térmica, LTM.

Nas figuras seguintes, é possível visualizar a fixação dos fios termopares à estrutura para garantir que os fios não se movam, durante o procedimento de ensaio.



Figura 52 - Colocação do fio termopar na placa de teto, LTM.

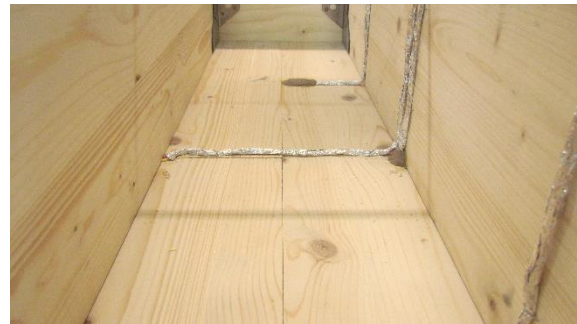


Figura 53 - Colocação de massa térmica para proteger o ponto de medição, LTM.



Figura 54 - Termopares colocados nos conectores metálicos, LTM.



Figura 55 - Placa de teto, vista interior, LTM.

6.2 Instrumentação com termopares de placa

Para medir o perfil de temperaturas no interior das células em função da evolução do incêndio no exterior da laje, foram utilizados 3 termopares de placa. A medição baseia-se na temperatura a que a placa de aço fica sujeita, obtendo uma medição suavizada (Figura 56). Estes termopares, designados por TP1, TP2 e TP3, foram colocados, respetivamente, na célula 1, 2 e 3.

A localização destes termopares é sensivelmente no centróide do volume de cada célula, sendo a sua construção baseada na norma (EN1363-1, 2012).

A medição da temperatura média dentro de cada célula é importante, pois essas curvas de temperatura serão impostas no modelo numérico, a validar com o comportamento da laje.



Figura 56 - Processo de construção dos termopares de placa, LTM.

6.3 Instrumentação com termopares na face não exposta

Um dos critérios principais de uma estrutura é o critério de isolamento. Para a sua medição, utilizam-se termopares de disco, construídos com placas finas circulares de cobre com 12 [mm] de diâmetro e 0.2 [mm] de espessura onde são soldados os dois fios termopares, este é protegido com uma placa retangular de gesso cartonado (Figura 57), (EN1363-1, 2012).

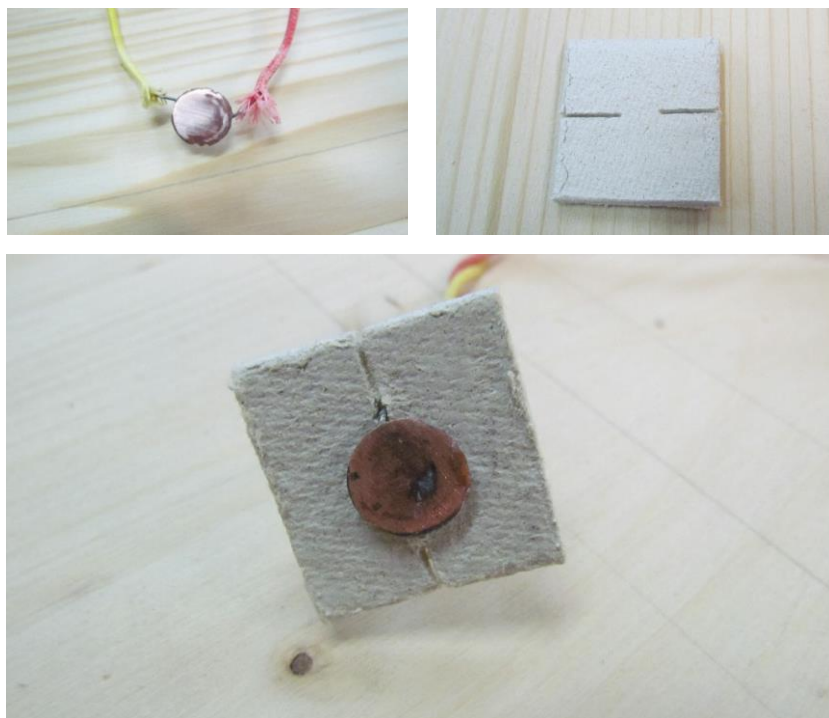


Figura 57 - Processo de construção dos termopares de disco, LTM.

A localização dos termopares de disco, colocados na superfície não exposta ao fogo, está feita de acordo com a norma (EN1634-1, 2000). Devido à limitação imposta pelos equipamentos utilizados para aquisição de dados, estão disponíveis 27 canais de leitura, limitando o número de sensores.

Assim, existe um total de 6 termopares para adquirir dados na face não exposta, cinco termopares para medir a temperatura média (T11, T12, T22, T32 e T31) e um localizado na célula com maiores perfurações (célula 3), (T21), com objetivo de medir a temperatura mais elevada.

Nas imagens seguintes é possível visualizar a localização dos termopares de disco, utilizados para medir a temperatura média, assim como, o termopar utilizado para medir a temperatura máxima. De modo a obter-se um resultado médio para a temperatura, os termopares de medição da temperatura média foram colocados em forma de cruz, abrangendo toda a área da laje na superfície não exposta ao fogo (EN1634-1, 2000). O termopar que à priori terá um valor de temperatura superior esta localizado na célula três, pois esta apresenta uma furação com maior abertura, localizada a meio do comprimento da célula.

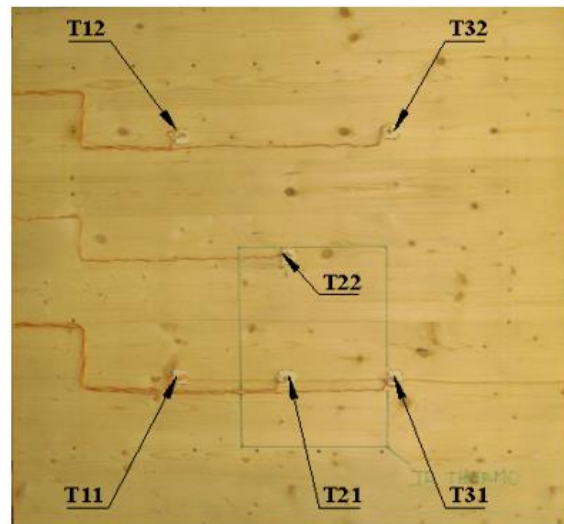
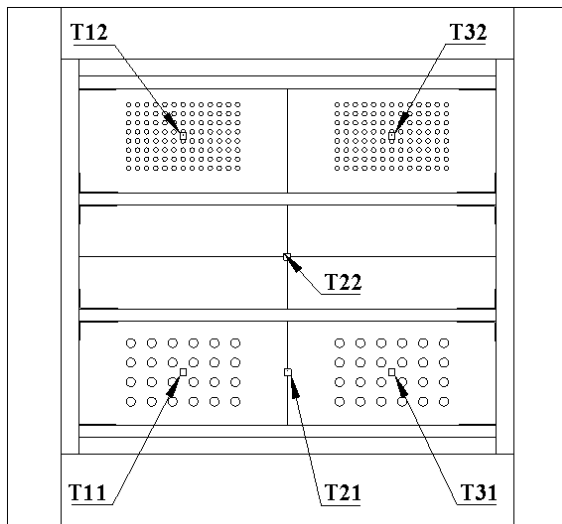


Figura 58 - Localização dos termopares na face não exposta ao fogo, LTM.

Após a preparação dos 27 termopares, 14 na placa de teto, 4 nos conectores, 3 de placa e 6 de disco, procedeu-se à sua colocação de acordo com o imposto anteriormente. Nas figuras seguintes, visualizam-se as etapas realizadas no processo de instrumentação em cada laje até à sua conclusão.



Figura 59 - Colocação dos termopares na placa de teto, LTM.



Figura 60 - Colocação dos termopares nos conectores metálicos, LTM.



Figura 61 - Colocação dos termopares de placa protegidos com lâ de rocha, LTM.



Figura 62 - Termopares de placa no centróide das células, LTM.

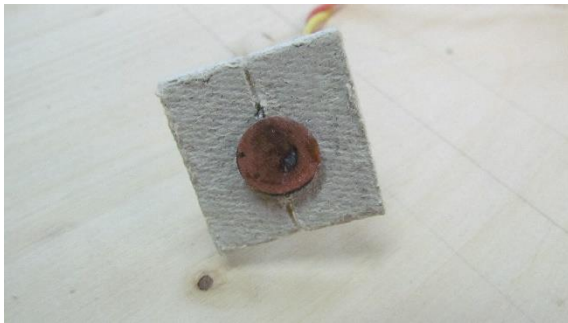


Figura 63 - Termopar de disco com gesso cartonado, LTM.



Figura 64 - Colocação dos termopares de disco, com cola térmica, LTM.



Figura 65 - Finalização da instrumentação da laje no interior das células, LTM.

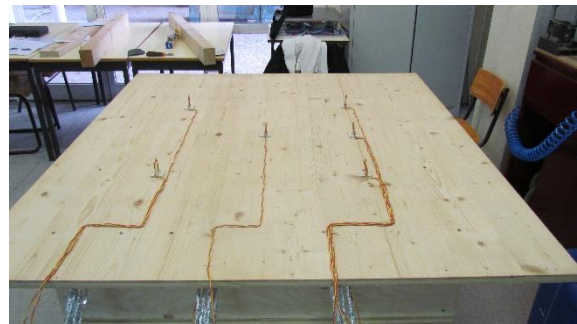


Figura 66 - Finalização da instrumentação com a colocação dos termopares na face não exposta, LTM.

6.4 Aquisição de dados

Tal como referido anteriormente, o número máximo de canais para aquisição de dados é 27, porque os equipamentos utilizados estão limitados a esse número de ligações. Os equipamentos utilizados foram o MGC plus (Figura 67) e o Spider 8 (Figura 68) disponíveis no laboratório de estruturas e resistência dos materiais (LERM).

Juntamente com os equipamentos anteriores, foram adquiridos os dados provenientes do forno (Figura 69), ou seja, a curva real de temperatura durante o ensaio assim como, foi utilizada uma câmara termográfica com detetor de infra vermelhos, para registar a evolução da temperatura na face não exposta.

A localização da câmara termográfica foi sensivelmente na célula três, pois era a que apresentava furação de maior abertura, sendo esta a localização prevista para atingir uma temperatura superior (Figura 70).



Figura 67 - Equipamento para aquisição de dados, MGCplus, LERM.



Figura 68 - Equipamento para aquisição de dados Spider 8, LERM.



Figura 69 - Forno de ensaio padronizado, LERM.

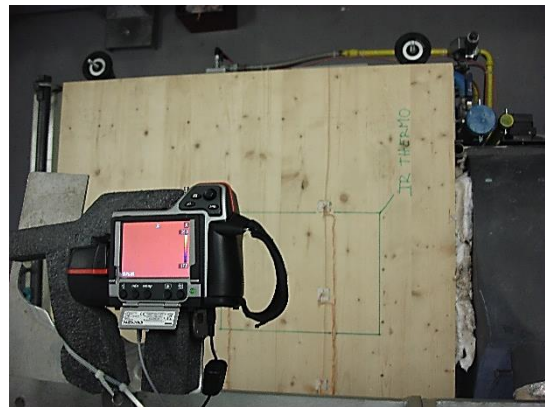


Figura 70 - Camara termográfica utilizada na placa não exposta, LERM.



Figura 71 - Bancada de trabalho, LERM.

6.5 Forno de ensaio

O forno utilizado tem como combustível gás natural e apresenta quatro queimadores, sendo utilizados apenas dois nestes ensaios, dispostos na diagonal e utilizados os que estão mais baixos, para se obter uma temperatura dentro no forno mais uniforme. Dispõe ainda de um sistema eletrónico que controla os queimadores de forma a criar uma curva de temperatura que se pretenda implementar.

Nas figuras seguintes, é possível visualizar o forno utilizado assim como, o acoplamento da laje na parte superior.



Figura 72 – Imagem real do forno de resistência térmica, LERM.

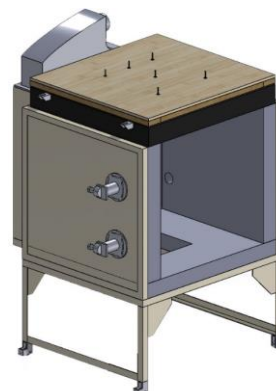


Figura 73 – Imagem virtual do forno de resistência térmica (Meireles, 2014).

6.6 Resultados experimentais

Os ensaios experimentais resultam da utilização da curva ISO834 no forno, através do controlo dos queimadores. Nestes ensaios, utilizam-se dois dos quatro queimadores na sua potência mínima, mas como a madeira é um material combustível, a curva real do perfil de temperaturas dentro do forno é ligeiramente superior à curva padronizada ISO834, mas apresenta uma temperatura superior ao longo do ensaio.

Nos ensaios, são admitidas as temperaturas iniciais, ou seja é considerado a temperatura ambiente no local de localização do forno, a temperatura inicial no ensaio da laje 1 foi aproximadamente de 19 [°C] e no ensaio da laje 2 de 21 [°C].

Da estrutura da laje, a placa de teto é o único elemento que fica em contacto direto com o fogo, sendo o calor propagado para toda a estrutura ao longo do ensaio.

Nas figuras seguintes, é possível visualizar as fases de evolução pela qual a laje 1 e 2 passaram ao longo do ensaio experimental.

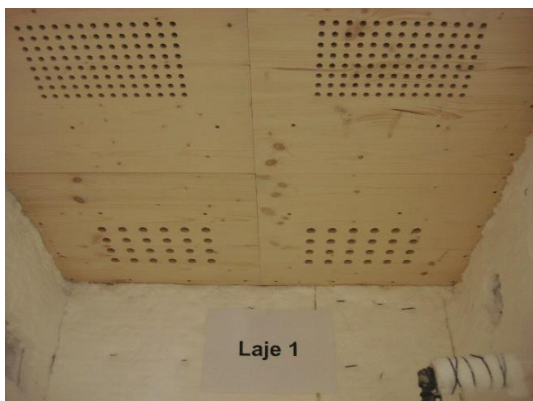


Figura 74 - Laje 1, ensaio experimental, LERM.



Figura 75 - Janela do forno, fogo localizado no teto do forno, Laje 1, LERM.



Figura 76 - Instante de abertura da porta do forno depois do ensaio da laje 1, LERM.



Figura 77 - Laje 1 depois do ensaio experimental, LTM.



Figura 78 - Laje 2, ensaio experimental, LERM.



Figura 79 - Janela do forno, instante em que a laje 2 começa a carbonizar, LERM.



Figura 80 - Instante de abertura da porta do forno depois do ensaio da laje 2, LERM.

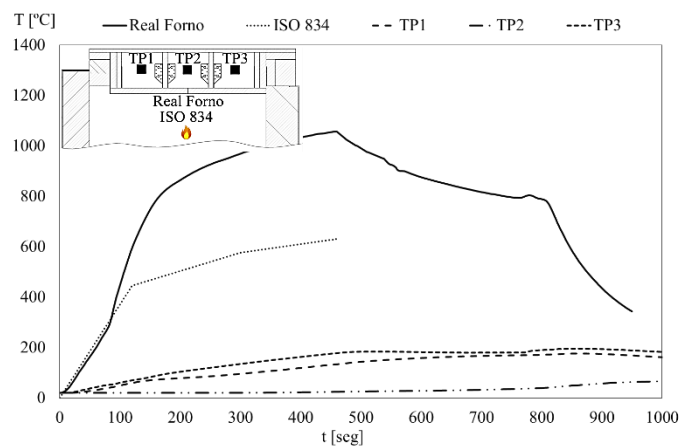


Figura 81 - Laje 2 depois do ensaio experimental, LTM.

6.6.1 Comportamento térmico da laje 1

O primeiro ensaio realizado foi o ensaio da laje 1 com uma duração de 950 [s] (15 min 50 [s]). Durante o ensaio a temperatura máxima real atingida foi de 1057 [°C] aos 460 [s].

Na figura 82, visualiza-se o comportamento térmico ocorrido no interior do forno (Real Forno), a curva padronizada ISO834 e as temperaturas atingidas no interior de cada célula (TP1, TP2 e TP3).



Como se pode verificar, o forno apresenta uma evolução de temperaturas semelhante à curva padrão (ISO834), apresentando duas quedas acentuadas de temperatura, sendo a primeira associada ao desligar dos queimadores aos 460 [s] e a segunda à abertura da porta do forno.

Em relação à temperatura ocorrida no interior das células, pode-se verificar que apresentam uma evolução mais lenta em relação à temperatura real do forno, mostrando uma variação uniforme entre elas, como era de esperar. A temperatura mais elevada ocorreu na célula 3 (TP3), seguida da célula 1 (TP1) e por fim na célula 2 (TP2). Esta diferença de temperatura ocorre devido ao tipo de furação, no caso da célula 1 e 3, a evolução da temperatura é aproximadamente igual porque ambas as células apesar de terem uma furação diferente, apresentam uma área de furação semelhante, (Célula 1 – 16336 [mm²], Célula 3 – 15072 [mm²]). Na célula 2 a temperatura é inferior porque não existe qualquer tipo de furação associada.

A figura 83 permite observar a evolução da temperatura nos conectores metálicos. Estes apresentam uma evolução semelhante ao que ocorre no interior de cada célula. Nas células 1 (TC1) e 3 (TC4) registam-se as temperaturas superiores e na célula 2 (TC2 e TC3) temperaturas inferiores, conseqüente do tipo de furação associada à respetiva célula.

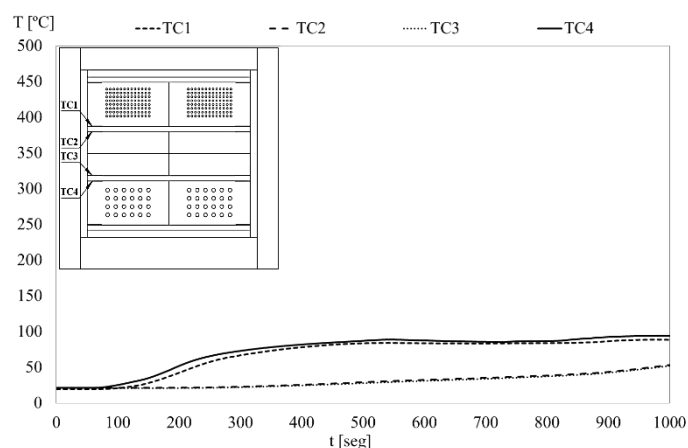


Figura 83 - Temperaturas nos conectores.

Tal como referido anteriormente, a evolução da temperatura nos conectores metálicos, é o reflexo da evolução do interior das células, as quais estão diretamente relacionadas com o tipo de furação existente. Como o material, quando sujeito a altas temperaturas, modifica as suas propriedades, é fundamental garantir que não ultrapassem um valor de segurança, para assegurar que os conectores metálicos não degradem e que ponham em risco toda a estrutura. De acordo com a norma (EN1363-1, 2012), a temperatura máxima ocorrida, na superfície não exposta ao fogo, não devem ultrapassar mais de 180 [°C] da temperatura inicial de ensaio. Segundo a figura 84, verifica-se que em toda a superfície não exposta ao fogo (Placa de pavimento), as temperaturas registadas pelos termopares (T11, T21, T31, T22, T12 e T32), não ultrapassam o incremento máximo de 180 [°C] em relação à temperatura inicial de ensaio, verificando-se assim a resistência da laje em relação ao critério de isolamento (EN1363-1, 2012).

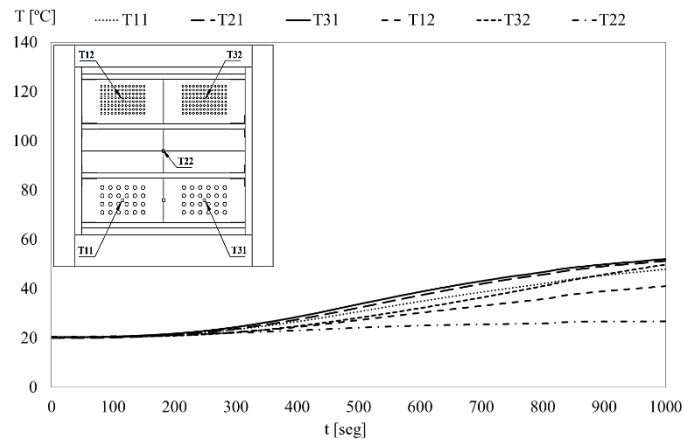


Figura 84 - Temperaturas na face não exposta.

Como a laje 1 apresenta uma geometria simétrica, a variação da temperatura é semelhante para o mesmo local simétrico de leitura. Esse efeito pode ser verificado na figura 84, pois a variação da temperatura dos termopares T12 e T32, T11, T21 e T31 é semelhante. Tal como esperado, também é possível verificar que a zona com temperatura mais elevadas está associado à célula com maior abertura, ou seja a zona mais quente corresponde à célula 3 (T11, T21 e T31), seguida da célula 1 (T12 e T32) e posteriormente, com temperaturas inferiores a célula 2 (T22).

Foi ainda utilizado um método de medição para avaliação da temperatura numa área definida. Esta área está localizada entre a célula 2 e célula 3, local onde foram esperadas temperaturas superiores (Figura 85).

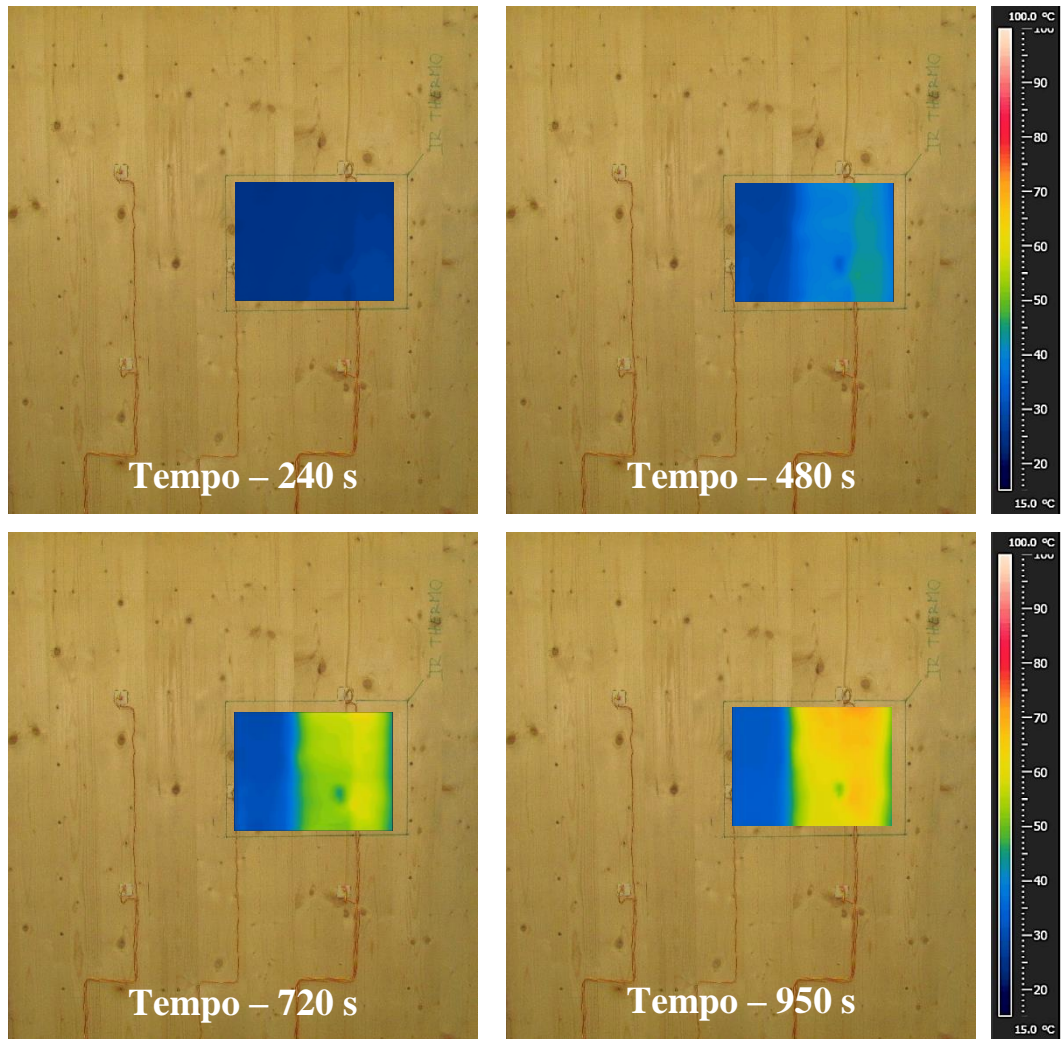


Figura 85 - Câmara termográfica ao longo do ensaio da Laje 1 (Variação 15-100 °C), LERM-IPB.

Com a aquisição de dados da evolução da temperatura através da câmara termográfica, é possível visualizar graficamente a evolução da temperatura mínima, média e máxima ocorrida na área de análise ao longo do ensaio (Figura 86).

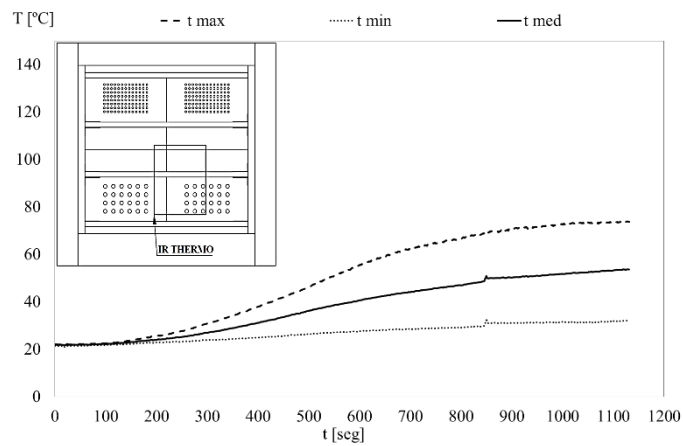


Figura 86 - Temperaturas na face não exposta da Laje 1, obtidas através da captura termográfica (FLIR).

Através da análise dos dados registados nos termopares localizados na face não exposta, também é possível determinar temperaturas mínimas, médias e máximas e compará-las com os dados obtidos através da câmara termográfica (Figura 87). Como se pode verificar todas as curvas apresentam uma evolução semelhante ao longo do tempo. A diferença de temperaturas obtidas na medição da câmara termográfica está relacionada com a área definida para medição. No caso das temperaturas dos termopares, corresponde à utilização do ponto de medição da face não exposta, enquanto que a câmara termográfica utiliza unicamente os dados da área de medição escolhida, corresponde à célula com temperatura superior (célula 3).

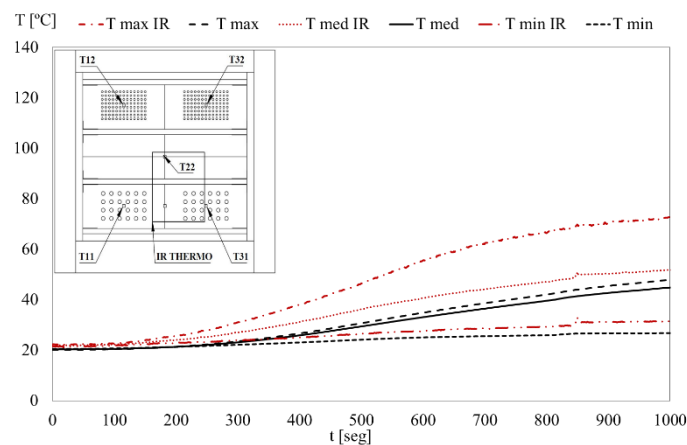


Figura 87 - Comparação das temperaturas da face não exposta e da captura termográfica.

Nas figuras seguintes é possível visualizar os resultados obtidos da medição térmica dos termopares. Cada gráfico que se segue corresponde a cada célula existente na laje. Comparando todos os gráficos, facilmente podemos afirmar que as temperaturas mais elevadas encontram-se na célula 3, seguida da célula 1 e depois na célula 2.

Como se pode verificar pela figura 88, a variação da temperatura dos termopares localizados nas furações (T16 e T15, T35 e T36), apresentam maiores variações de temperatura que o termopar localizado no interior da célula, que apresenta uma temperatura inferior (T25), a diferença de temperaturas entre os termopares localizados nas furações poderá ser explicado pela localização dos queimadores do forno.

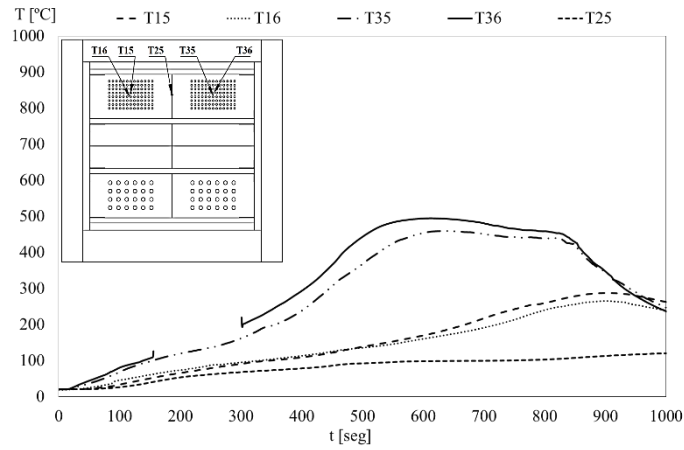


Figura 88 - Temperaturas da Célula 1.

Na figura 89, verifica-se uma variação térmica brusca ocorrido no termopar 17, que poderá ser explicado por uma má ligação dos fios termopares ou uma passagem de calor ocorrido no local devido à união nas placas de teto.

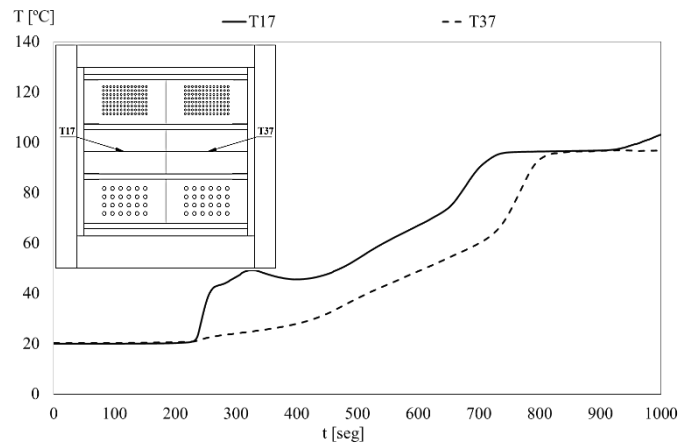


Figura 89 - Temperaturas da Célula 2.

Na figura seguinte, podem verificar-se os resultados semelhantes aos da célula 1, ou seja, a variação térmica dos termopares localizados nas furações é semelhante e o termopar localizado no interior apresenta uma temperatura inferior.

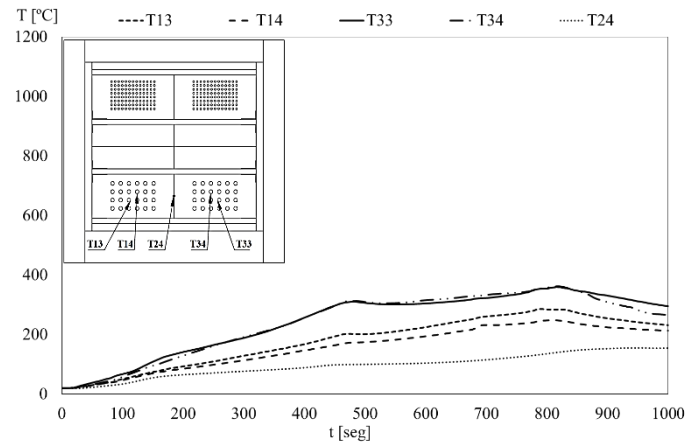


Figura 90 - Temperaturas da Célula 3.

Na figura 91, pode-se verificar a evolução térmica dos termopares localizados na interface das vigas que separam as células, verificando-se uma evolução semelhante ao longo do ensaio. Nestes termopares ocorre influência das variações das temperaturas entre as células.

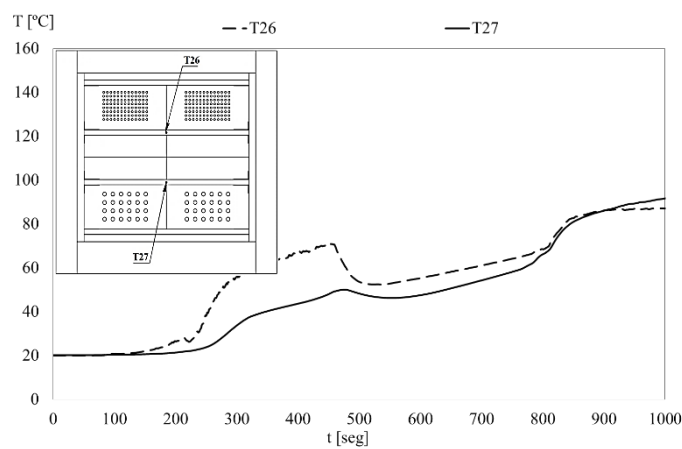


Figura 91 - Temperaturas das vigas.

6.6.2 Velocidade de carbonização da laje 1

De modo a avaliar a resistência ao fogo de uma estrutura, é fundamental determinar a velocidade de carbonização ocorrida. Nesse sentido foram realizados cortes ao longo da estrutura, para posteriores medições da espessura carbonizada ao longo da placa de teto. Como

nas lajes em estudo existem furações diferentes, é importante determinar a sua influência na velocidade de carbonização. Foram realizados 4 cortes em cada célula (12 cortes no total). Em cada corte foram efetuadas 11 medições da espessura, identificadas com as letras de **a** até **k** (Figura 92), (Anexo A3).

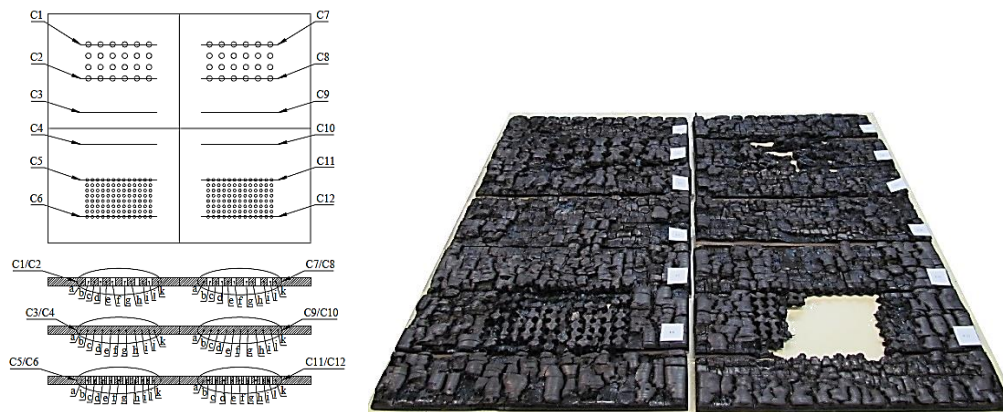


Figura 92 - Localização dos cortes e pontos de medição, laje 1.

Para obter resultados coerentes, adotou-se um modo de registo dos valores da espessura carbonizada. Para isso, foram obtidas duas imagens para cada corte com uma régua milimétrica, um corte com a totalidade da madeira (camada carbonizada e madeira residual) e outro com a madeira residual.

Nas tabelas seguintes é possível verificar os dados obtidos da medição da camada de carbonização referentes à célula 3, para cada lado da laje, os cortes C1 e C2 e posteriormente os cortes C7 e C8.

Tabela 6 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1 e C2

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1	23.7	28.3	28.9	27.0	29.6	28.0	29.4	29.5	27.8	29.3	21.5
C2	23.0	29.0	28.2	27.0	29.1	27.0	29.0	29.0	23.0	28.0	19.1
Média	23.4	28.7	28.6	27.0	29.35	27.5	29.2	29.3	25.4	28.7	20.3
D. Padrão	0.4	0.4	0.4	0.0	0.3	0.5	0.2	0.3	2.4	0.7	1.2

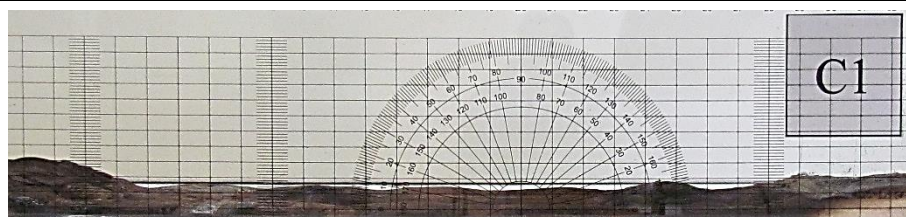


Tabela 7: Espessura da madeira carbonizada nos cortes C7 e C8

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C7	22.7	29.6	30.2	31.3	31.1	32.0	32.0	32.0	32.0	31.1	26.7	
C8	21.8	29.3	30.2	30.0	30.6	30.4	31	30.3	31	30.7	27.0	
Média	22.3	29.5	30.2	30.7	30.9	31.2	31.5	31.2	31.5	30.9	26.9	
D. Padrão	0.5	0.2	0.0	0.7	0.3	0.8	0.5	0.9	0.5	0.2	0.2	



Para a zona da laje sem furações, na célula 2, os dados obtidos através da medição da camada carbonizada estão expressos nas tabelas seguintes, referentes aos cortes C3, C4, C9 e C10.

Tabela 8 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C3 e C4.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C3	21.4	21.5	21.4	22.8	20.4	21	21.4	20.1	20.4	21.7	21.4	
C4	18.8	21.0	19.4	20.3	17.9	18.1	19.2	20.0	19.7	21.0	20.7	
Média	20.1	21.3	20.4	21.6	19.2	19.6	20.3	20.1	20.1	21.4	21.1	
D. Padrão	1.3	0.3	1.0	1.3	1.3	1.5	1.1	0.1	0.4	0.4	0.4	

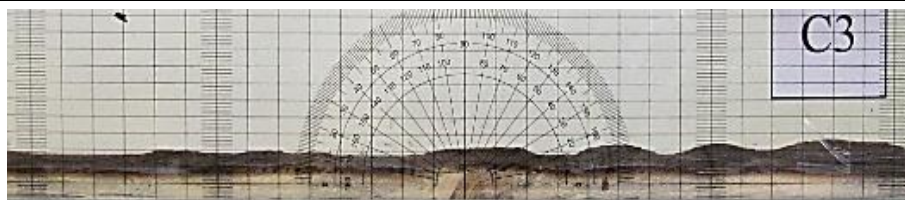
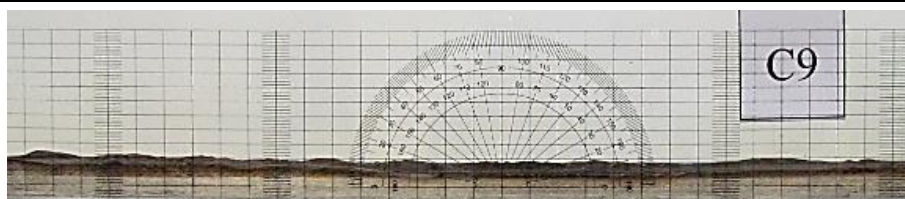


Tabela 9 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9 e C10.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9	17.3	18.3	19.4	19.8	22.8	21.8	21.4	22.5	21.1	20.4	20.0	
C10	20.4	19.2	21.5	22.1	21.1	22.0	23.6	23.6	21.6	18.4	18.1	
Média	18.9	18.8	20.5	21.0	22.0	21.9	22.5	23.1	21.4	19.4	19.1	
D. Padrão	1.6	0.5	1.1	1.2	0.9	0.1	1.1	0.6	0.3	1.0	1.0	



Por fim, na célula 1, os resultados estão expostos nas tabelas 10 e 11, obtidos através da medição da camada de carbonização dos cortes C5, C6, C11 e C12.

Tabela 10 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C5 e C6.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C5	20.0	27.5	27.3	27.5	28.2	28.0	27.0	28.0	29.0	27.9	21.4	
C6	17.7	18.3	18.3	22.8	24.2	24.7	23.7	24.7	23.6	22.0	18.9	
Média	18.9	22.9	22.8	25.2	26.2	26.4	25.4	26.4	26.3	25.0	20.2	
D. Padrão	1.2	4.6	4.5	2.4	2.0	1.7	1.7	1.7	2.7	3.0	1.3	

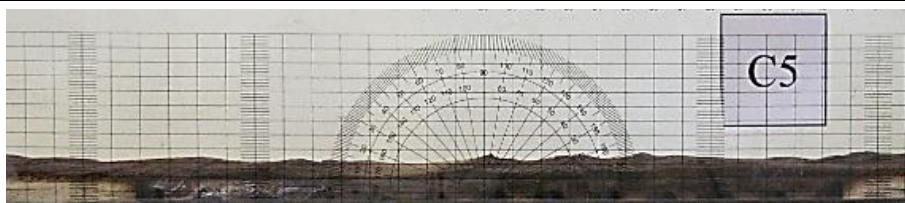
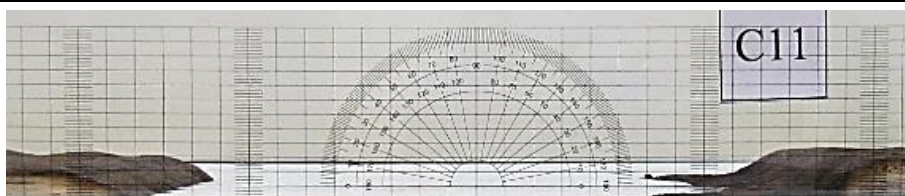


Tabela 11 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C11 e C12.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C11	23.5	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	30.3	28.2	19.1
C12	20.6	29.5	29.5	30.0	30.0	30.2	29.6	29.5	29.5	25.0	21.8	
Média	22.1	30.8	30.8	31.0	31.0	31.1	30.8	30.8	29.9	26.6	20.5	
D. Padrão	1.5	1.3	1.3	1.0	1.0	0.9	1.2	1.3	0.4	1.6	1.4	



A velocidade de carbonização da célula 3, 2 e 1 é respectivamente, 1.80 [mm/min], 1.30 [mm/min] e 1.67 [mm/min]. O cálculo da velocidade é baseado na carbonização ocorrida segundo o tempo total de ensaio (950 [s]), que engloba o aquecimento e arrefecimento do forno. Na tabela 12, é possível verificar a média das velocidades de carbonização calculadas em cada corte, assim como a velocidade média ocorrida em cada célula.

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 e C2	1.71	1.80
	C7 e C8	1.88	
2	C3 e C4	1.29	1.30
	C9 e C10	1.31	
1	C5 e C6	1.52	1.67
	C11 e C12	1.81	

Através da tabela 12, verifica-se que a velocidade de carbonização máxima ocorre na célula 3, seguida da célula 1 e posteriormente na célula 2. Este resultado era esperado, uma vez que, a área de furação influencia a penetração da temperatura para o interior da laje e consequentemente a velocidade de carbonização.

6.6.3 Comportamento térmico da Laje 2

No caso do ensaio da Laje 2, utilizaram-se os mesmos métodos de aquisição de dados e tratamento da Laje 1. Este ensaio também foi realizado para um tempo total igual ao anterior (950 [s]), atingindo uma temperatura real máxima de 1065 °C aos 486 [s].

Na figura 93, é possível observar o comportamento térmico ocorrido no interior do forno, em relação à curva padronizada (ISO834).

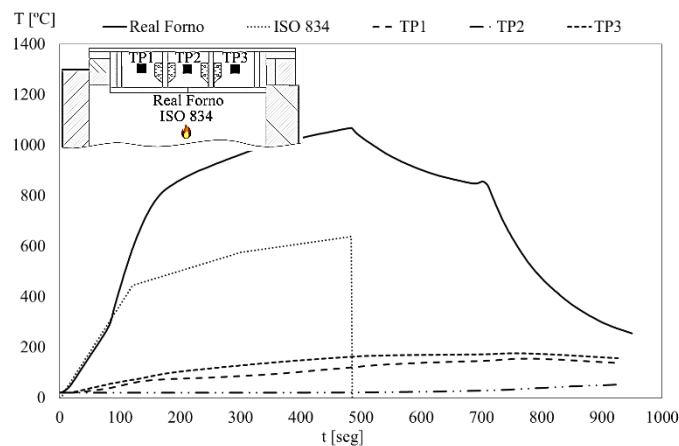


Figura 93 – Temperatura imposta e ocorrida no interior do forno e nas células 1, 2 e 3, Laje 2.

O comportamento térmico ocorrido no ensaio 2 é semelhante ao ensaio 1, a curva real segue a curva padronizada ISO834. A variação ocorrida é igualmente devido ao desligar dos queimadores (486 s) e à abertura da porta do forno (700 s). A evolução das temperaturas no interior das células segue a temperatura medida no forno e apresentam uma variação uniforme entre as diferentes células. A célula com temperatura máxima é a célula 3 (TP3), seguida da célula 1 (TP1), e por fim a célula 2 (TP2).

A figura 94 permite verificar a evolução das temperaturas ocorridas nos conectores metálicos, sendo esta variação idêntica à ocorrida no ensaio 1, ou seja as temperaturas dos conectores seguem a temperatura medida no interior de cada célula. Os conectores das células com temperaturas mais elevadas são aqueles que se destacam com temperaturas superiores.

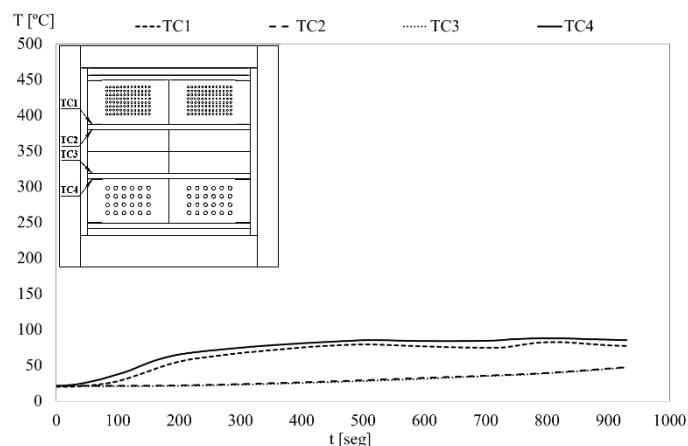


Figura 94 - Temperaturas nos conectores.

Como visto anteriormente, o objetivo da determinação do perfil de temperaturas dos conectores metálicos é para garantir que não cheguem a temperaturas altas, alterando as suas propriedades mecânicas, garantindo assim, que a temperatura máxima não seja superior a 400 [°C]. Para isso, é imposto pela norma (EN1993-1-2, 2005).

Com fim a validar o critério da estanquidade de uma estrutura (EN1363-1, 2012), as temperaturas ocorridas na superfície não exposta ao fogo não devem ultrapassar mais de 180 [°C] da temperatura inicial de ensaio. Segundo a figura 95, verifica-se que em toda a superfície não exposta ao fogo, as temperaturas registadas pelos termopares (T11, T21, T31, T22, T12 e

T32) não ultrapassam o incremento máximo de 180 [°C] em relação à temperatura inicial de ensaio (20 °C), verificando-se assim a resistência da laje em relação ao critério de isolamento.

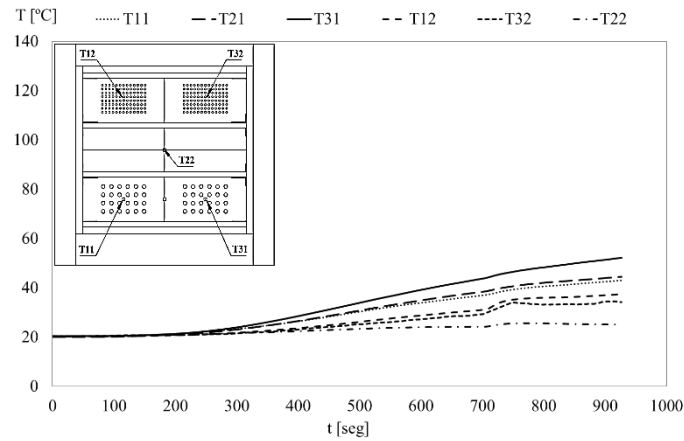


Figura 95 - Temperaturas na face não exposta, Laje 2.

No ensaio 2, o perfil de temperaturas ocorrido é semelhante ao que aconteceu no ensaio 1, mais uma vez, através da figura 95, é notável a simetria da estrutura, apresentando os pontos de aquisição de dados simétricos com um perfil igual. Também a diferença de temperaturas é idêntica pois as temperaturas superiores ocorrem na célula com furações superiores (Célula 3), seguida da célula de furações inferiores (Célula 1) e por fim a célula sem qualquer tipo de furação (Célula 2).

Na figura 96, é possível verificar a variação de temperaturas segundo a câmara termográfica, com valores compreendidos entre 15 e 100 °C.

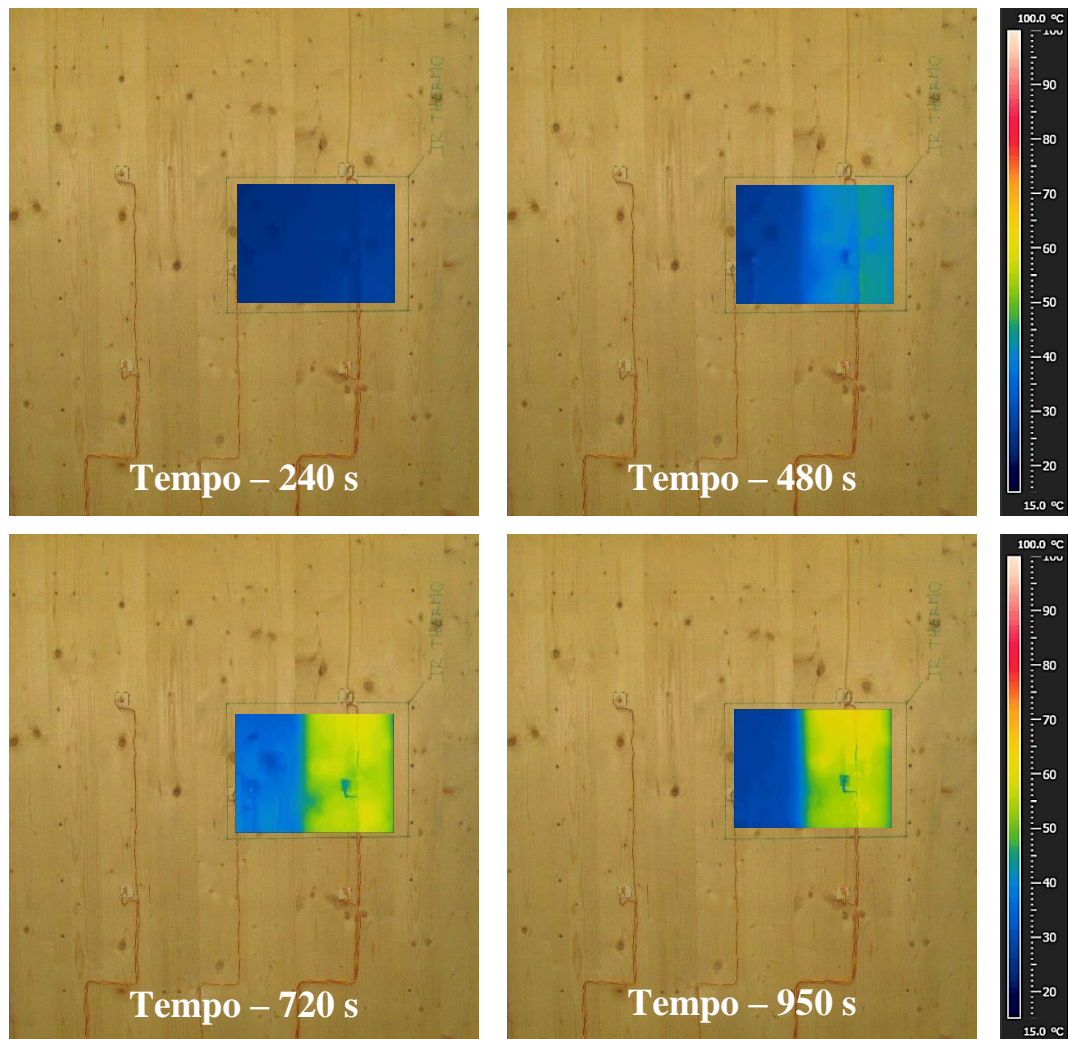


Figura 96 - Câmara termográfica ao longo do ensaio da Laje 2 (Variação 15-100 °C), LERM-IPB.

Os dados obtidos da variação térmica, na área lida pela câmara termográfica estão apresentados na figura 97, os dados apresentados correspondem à temperatura máxima, média e mínima ocorrida na face não exposta da laje.

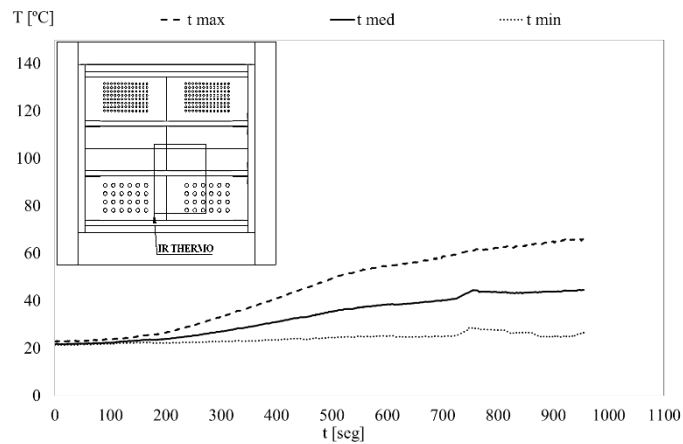


Figura 97 - Temperaturas face não exposta da Laje 2, obtidas através da captura termográfica (FLIR).

Através da comparação dos dados provenientes dos termopares da face não exposta e da câmara termográfica (Figura 98), é possível visualizar graficamente a variação da temperatura máxima, média e mínima ocorrida. Neste caso, observa-se que as temperaturas são superiores no registo da câmara termográfica, efeito que se deve à localização de leitura.

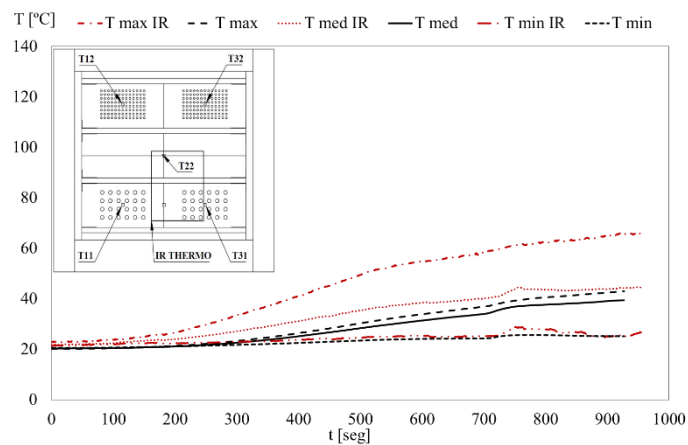


Figura 98 - Comparação das temperaturas da face não exposta e da câmara termográfica.

Através das figuras que se seguem, pode observar-se os dados obtidos dos termopares localizados no interior das células. Comparando todos os gráficos, facilmente pode afirmar-se que as temperaturas mais elevadas encontram-se na célula 3, seguida da célula 1 e posteriormente da célula 2. Sendo a laje uma estrutura simétrica, os termopares localizados nas furações deveriam apresentar uma variação térmica idêntica, mas devido à localização da laje no interior do forno e devido ao queimador utilizado não se encontrar no centro, ocorre um efeito de temperatura superior do lado direito da laje.

Na figura 99, é possível verificar os dados provenientes dos termopares da célula 1, com o efeito descrito anteriormente, os termopares T36 e T35 apresentam temperaturas superiores, enquanto as outras leituras são mais uniformes.

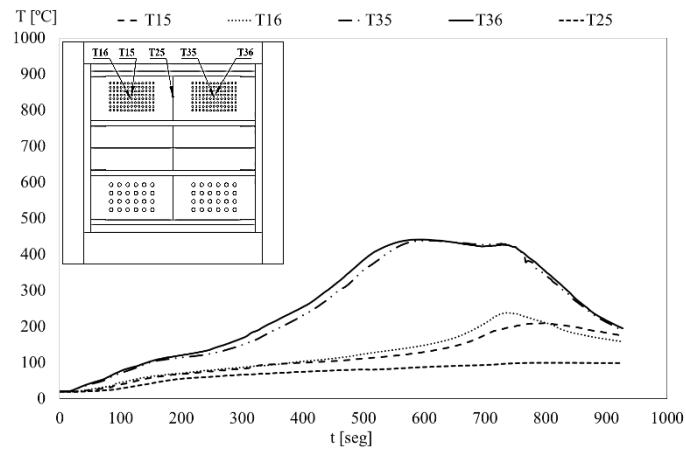


Figura 99 - Temperaturas da Célula 1.

Na figura 100 é possível visualizar a variação térmica ocorrida no termopar T17 e T37 localizados na célula 2, os dados adquiridos apresentam uma variação idêntica ao longo do ensaio.

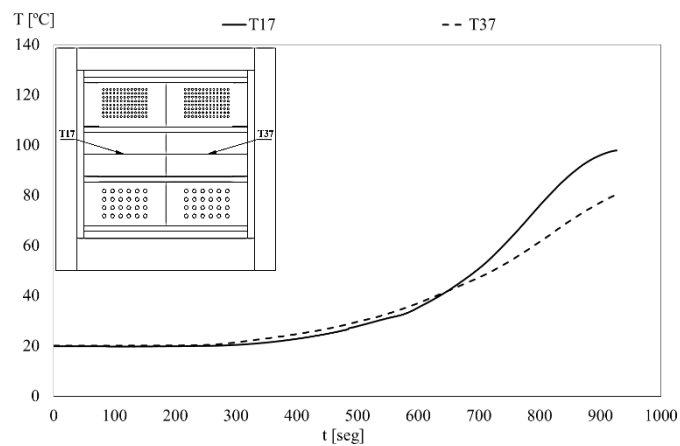


Figura 100 - Temperaturas da Célula 2.

Na célula 3 (Figura 101), verifica-se uma variação da temperatura mais uniforme entre todos os termopares, sendo os termopares T33 e T34, aqueles que apresentam as temperaturas superiores.

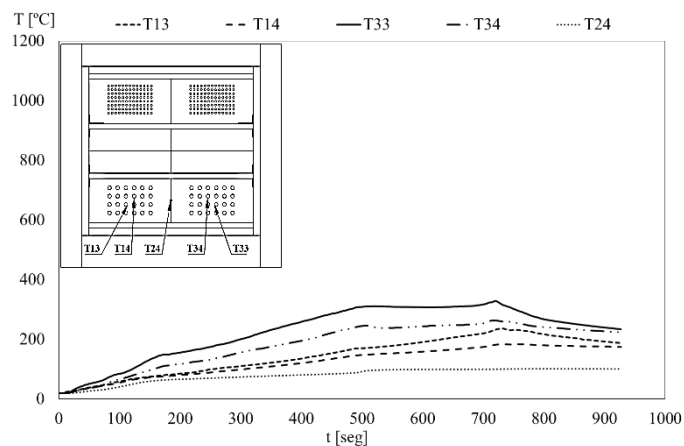


Figura 101 - Temperaturas da Célula 3.

A figura 102 mostra a evolução térmica dos termopares localizados na interface das vigas que separam as células. Verifica-se uma evolução semelhante ao longo do ensaio.

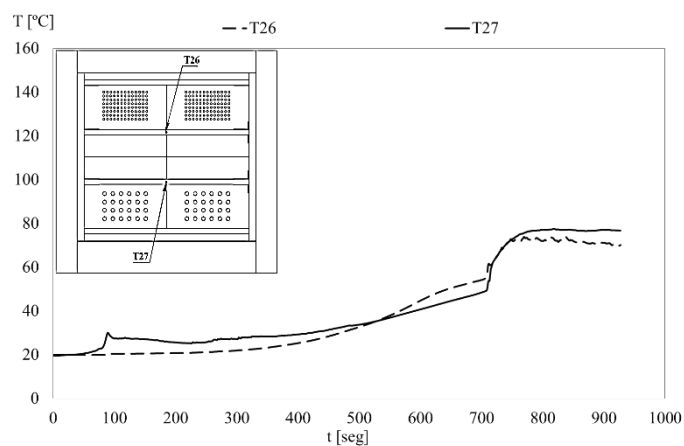


Figura 102 - Temperaturas das vigas.

6.6.4 Velocidade de carbonização, laje 2

A metodologia de leitura da espessura carbonizada é idêntica à utilizada no ensaio da Laje 1. Na figura 103, estão representados os cortes realizados na Laje 2, a distância de medição nos cortes é igual à Laje 1 (Anexo A3).

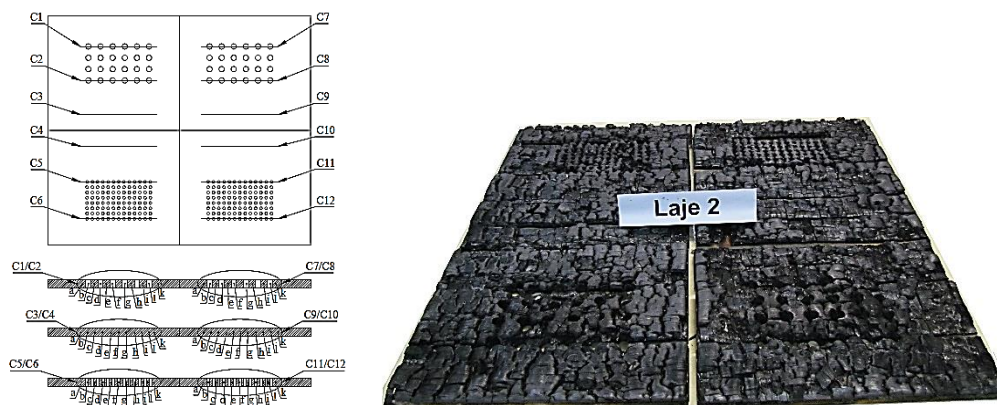


Figura 103 - Localização dos cortes e pontos de medição, laje 2.

O registo da espessura carbonizada foi efetuado como na Laje 1. Nas tabelas seguintes é possível verificar os dados obtidos para cada um dos cortes realizados, dependendo da célula associada ao corte.

Nas tabelas 13 e 14, estão apresentados os dados da espessura carbonizada referentes aos cortes C1 e C2, e C7 e C8, correspondentes a cada lado da célula 3.

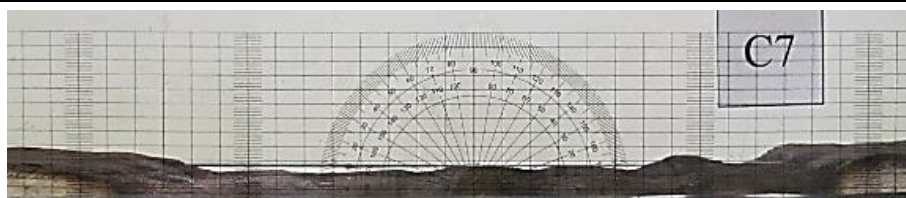
Tabela 13 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C1 e C2.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1		23.0	27.6	26.7	25.9	28.7	27.0	28.1	27.1	24.7	28.1	18.0
C2		22.0	26.5	24.8	21.7	28.1	20.2	28.1	21.8	19.2	27.1	19.2
Média		22.5	27.1	25.8	23.8	28.4	23.6	28.1	24.5	22.0	27.6	18.6
D. Padrão		0.5	0.6	1.0	2.1	0.3	3.4	0.0	2.7	2.8	0.5	0.6



Tabela 14 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C7 e C8.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	K
C7	21.1	29.6	29.5	29.9	30.0	27.5	29.0	27.9	27.6	28.8	19.6	
C8	21.1	28.8	28.8	28.0	29.9	26.2	29.0	26.2	28.1	29.8	21.0	
Média	21.1	29.2	29.2	29.0	30.0	26.9	29.0	27.1	27.9	29.3	20.3	
D. Padrão	0.0	0.4	0.4	1.0	0.1	0.7	0.0	0.9	0.3	0.5	0.7	



Nas tabelas 15 e 16 estão representados os dados referentes aos cortes C3 e C4, C9 e C10, correspondentes à célula 2.

Tabela 15 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C3 e C5.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C3	20.0	19.7	16.3	17.2	16.3	18.4	15.4	19.0	19.6	21.3	21.3	
C4	20.6	19.8	18.0	18.1	17.9	19.9	19.6	17.2	19.3	19.4	16.7	
Média	20.3	19.8	17.2	17.7	17.1	19.2	17.5	18.1	19.5	20.4	19.0	
D. Padrão	0.3	0.1	0.9	0.5	0.8	0.8	2.1	0.9	0.2	1.0	2.3	

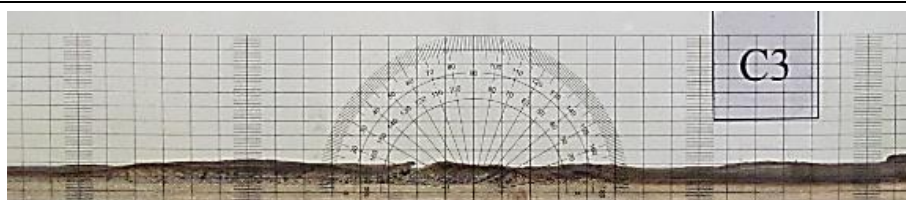
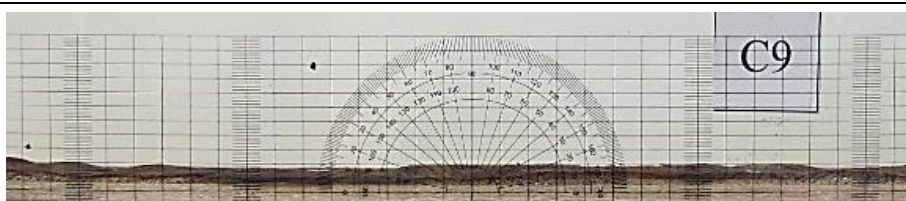


Tabela 16 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C9 e C10.

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C9	21.0	20.0	23.0	22.3	21.6	21.1	18.6	18.6	19.7	19.1	18.3	
C10	20.1	19.7	18.9	18.2	20.7	18.2	16.1	18.0	18.0	19.7	20.9	
Média	20.6	19.9	21.0	20.3	21.2	19.7	17.4	18.3	18.9	19.4	19.6	
D. Padrão	0.5	0.2	2.1	2.1	0.5	1.5	1.3	0.3	0.9	0.3	1.3	



Por último, os resultados da espessura da célula 1, são obtidos através dos pontos dos cortes C5 e C6, C11 e C12 apresentados nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C5 e C6

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C5	21.9	28.0	26.0	26.9	28.2	28.0	27.3	27.4	27.7	26.9	18.3	
C6	21.4	22.7	20.6	20.6	21.1	20.2	20.9	20.8	20.4	20.5	17.5	
Média	21.7	25.4	23.3	23.4	24.7	24.1	24.1	24.1	24.1	23.7	17.9	
D. Padrão	0.3	2.7	2.7	3.2	3.6	3.9	3.2	3.3	3.7	3.2	0.4	

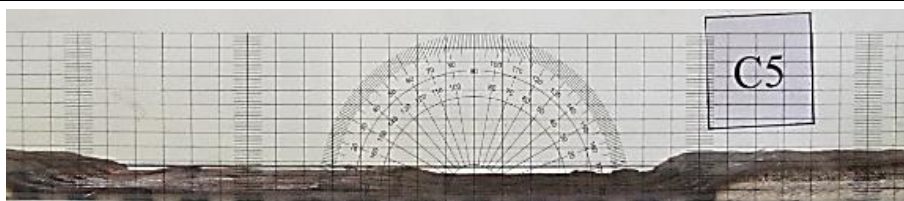
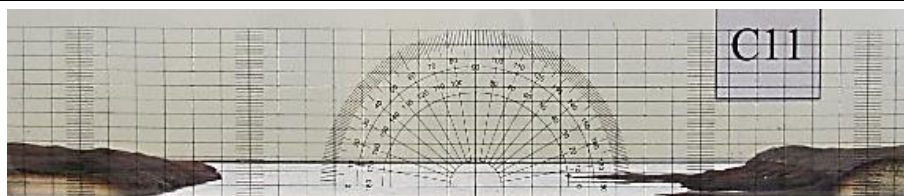


Tabela 18 - Espessura da madeira carbonizada nos cortes C11 e C12

Corte	Madeira carbonizada [mm]											
	Identificação	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C11	23.2	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	30.5	29.3	19.8	
C12	20.5	25.3	28.0	27.6	26.8	27.0	26.3	24.4	24.8	23.2	17.5	
Média	21.9	28.7	30.0	29.8	29.4	29.5	29.2	28.2	27.7	26.3	18.7	
D. Padrão	1.4	3.4	2.0	2.2	2.6	2.5	2.9	3.8	2.9	3.1	1.2	



A velocidade de carbonização de cada célula da laje 2 é 1.64 [mm/min], 1.21 [mm/min] e 1.60 [mm/min], respetivamente da célula 3, 2 e 1. Para o cálculo da velocidade de carbonização usou-se o mesmo método da Laje 1, para o mesmo tempo de ensaio. Na tabela 19, é possível verificar a média das velocidades de carbonização calculadas em cada corte, assim como a velocidade média ocorrida em cada célula.

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 e C2	1.56	1.64
	C7 e C8	1.72	
2	C3 e C4	1.18	1.21
	C9 e C10	1.24	
1	C5 e C6	1.47	1.60
	C11 e C12	1.72	

Como se pode observar, através da tabela 19, a velocidade de carbonização máxima que ocorre é na célula 3, seguida da célula 1 e posteriormente na célula 2, idêntico ao que acontece na velocidade de carbonização da laje 1. Estes resultados eram esperados uma vez que, a perfuração superior é na célula 3, seguida da célula 1 e posteriormente a célula 2 sem qualquer tipo de furação.

Capítulo 7

7 Modelo computacional

Neste capítulo apresenta-se um modelo computacional recorrendo ao método dos elementos finitos, utilizado na obtenção de soluções em problemas mecânicos, térmicos, entre outros, para análise e verificação da segurança e estabilidade estrutural. Neste estudo recorre-se a um programa comercial de elementos finitos denominado Ansys, utilizando-se o algoritmo de análise térmica transiente para a verificação da resistência ao fogo. Este modelo computacional será validado com os testes experimentais efetuados.

Para o desenvolvimento deste estudo, é fundamental haver um conhecimento prévio das propriedades do material, assim como, a ação térmica que irá atuar na estrutura. Para ser possível simular o comportamento da estrutura, foi necessário definir um modelo tridimensional com dimensões idênticas ao modelo físico (Figura 104).

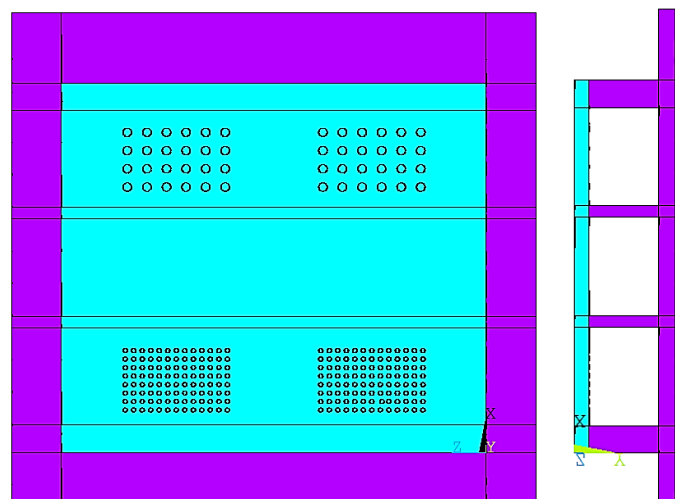


Figura 104 - Modelo tridimensional das lajes em estudo, Ansys.

A simulação numérica tem por base a evolução térmica ocorrida no interior das células e no interior do forno. Foi utilizada a mesma designação dos pontos de leitura do perfil de temperaturas e camada carbonizada conforme os ensaios experimentais, facilitando a leitura dos resultados.

7.1 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos é de acordo com o tipo de elemento utilizado. Neste estudo utiliza-se o elemento SOLID70 com 8 nós e 1 grau de liberdade por nó. Na figura 105 está representado o modelo numérico da laje em estudo, excluindo duas vigas da armadura exterior para possível visualização. A malha gerada é uniforme, com exceção dos locais perto das perfurações, devido à forma redonda. A malha gerada é constituída por 147128 elementos finitos e 187697 nós.

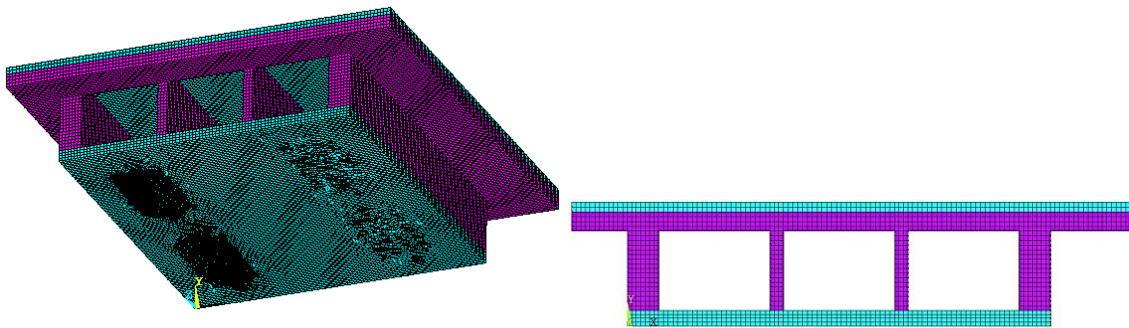


Figura 105 - Malha de elementos finitos, Ansys.

7.2 Condições de fronteira

Como é realizado o estudo de dois modelos numéricos, é determinado o perfil de temperaturas e a espessura de carbonização para cada um deles, para possível comparação com os resultados obtidos experimentalmente. O método utilizado na solução numérica é não linear e transiente devido às propriedades térmicas do material utilizado.

Segundo o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004), o perfil de temperaturas que decorre ao longo do tempo pode ser definido por curvas de incêndio parametrizadas. No caso em estudo, a curva parametrizada utilizada é a ISO834, aplicada na superfície de teto na parte exterior. Também são utilizadas curvas de temperatura no interior das células obtidas no ensaio experimental decorrido.

Para a análise numérica utilizam-se as curvas de temperatura provenientes dos dados dos ensaios experimentais, assim como, é imposto o tempo de análise numérico igual ao tempo de

análise experimental. Admitem-se as condições fronteiras de radiação e convecção na face exposta ao fogo e a temperatura inicial igual aos ensaios experimentais, igual a 20 [°C].

O coeficiente de convecção é igual a 25 [W/m²K] na superfície exposta ao fogo, 4 [W/m²K] na superfície não exposta ao fogo e 25 [W/m²K] nas paredes internas das células e nas perfurações (Figura 106). Segundo o Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004), considera-se um fator de emissividade igual a 1 para a ação do fogo e um fator de emissividade de 0,8 para a madeira.

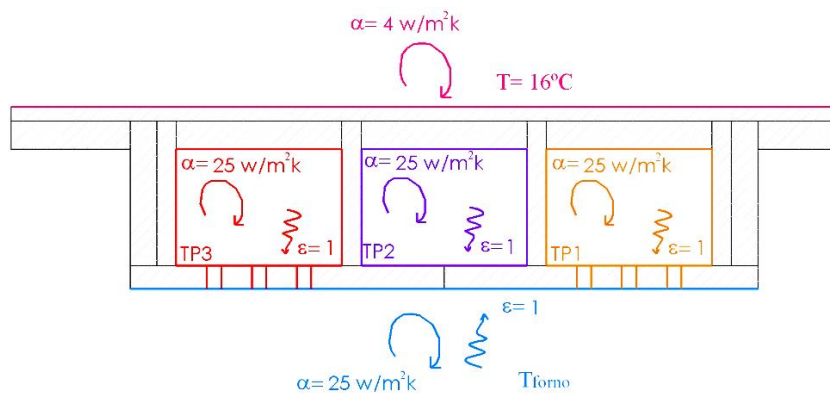


Figura 106 - Condições fronteira do modelo das lajes 1 e 2, (Meireles, 2014).

Na figura 107, estão apresentados as curvas da evolução da temperatura no interior do forno e nas células obtidas em ambos os ensaios experimentais (Laje 1 e 2). Estas curvas foram utilizadas na simulação numérica, conforme referido anteriormente.

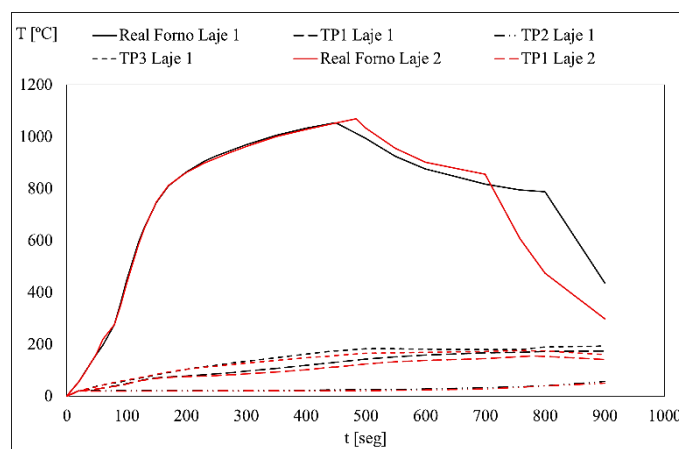


Figura 107 - Curvas de temperatura dos ensaios experimentais utilizadas nas análises numéricas das lajes 1 e 2.

7.3 Comportamento térmico da laje 1

A análise numérica em regime transiente não linear foi realizada durante 900 [s] conforme o tempo de ensaio experimental, com incremento de tempo máximo igual a 10 [s] e mínimo igual a 2 [s]. A figura seguinte, apresenta o perfil de temperaturas ocorrido no final do ensaio assim como, a camada carbonizada aos 900 [s]. Verifica-se que a face diretamente exposta ao fogo atinge temperaturas superiores e que o tamanho das furações está relacionado com a temperatura superior no interior da célula. A célula 3, que conte furações de diâmetro superior, apresenta as maiores temperaturas.

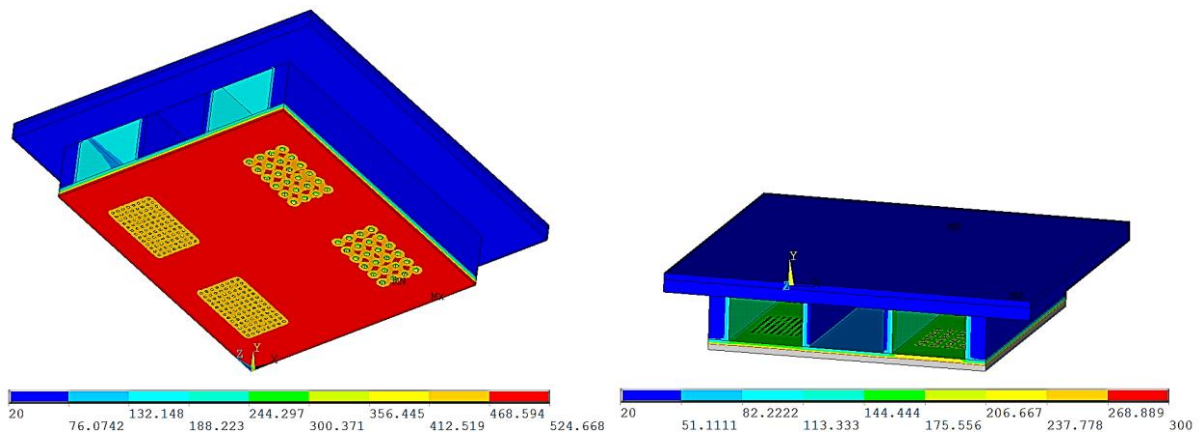


Figura 108 – Solução numérica da Laje 1, imagem esquerda – temperatura mínima 20 °C e temperatura máxima de 525 °C, imagem da direita – espessura carbonizada, variação da temperatura de 20 a 300 °C, Ansys.

Os resultados provenientes da simulação numérica são obtidos através dos pontos nodais, localizados num local semelhante aos termopares dos ensaios experimentais. Na figura 109, apresenta-se o perfil de temperaturas na face não exposta ao fogo, verifica-se uma simetria na estrutura entre o lado direito e esquerdo, e a influência das furações na variação da temperatura, sendo a célula 3 a que apresenta temperatura superior (T11, T21 e T31), seguida da célula 1 (T12 e T32) e a célula 2 com temperatura inferior (T22).

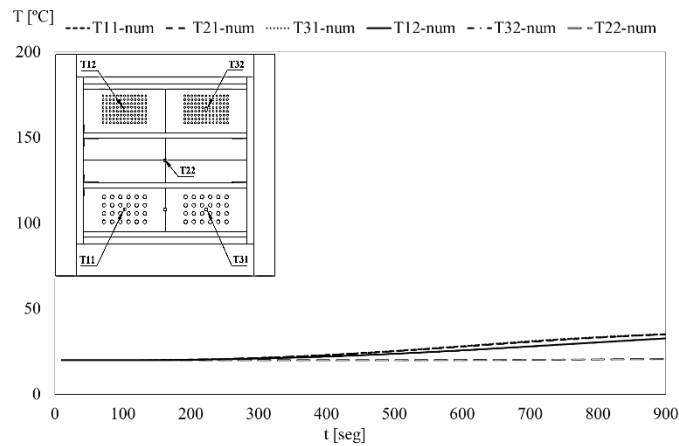


Figura 109 - Temperatura face não exposta, modelo numérico Laje 1.

Como os resultados obtidos do ensaio numérico apresentam simetria, nas figuras que se seguem apresentam-se os dados de um só lado da laje. Na figura 110, expõem-se os dados obtidos da simulação numérica da célula 1 registada nos pontos semelhantes aos termopares T15, T16, T25, T35 e T36, sendo os dados apresentados correspondentes aos termopares T25, T35 e T36. Verifica-se uma concordância entre os termopares localizados nas furações (T35 e T36) sendo que a temperatura mais baixa localiza-se no T25, pois já não apresenta a influência das furações, mas unicamente o aumento da temperatura na célula.

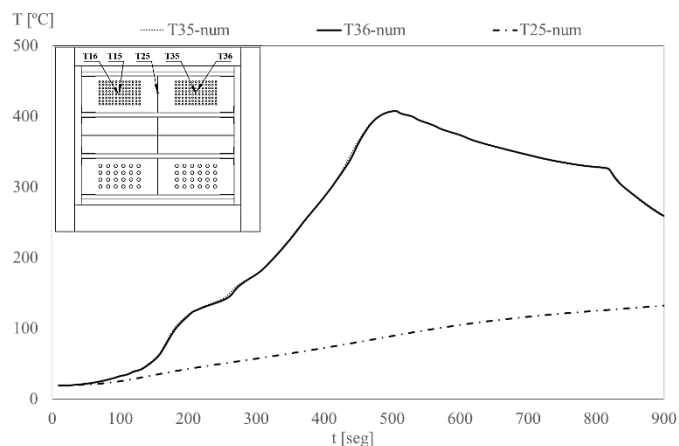


Figura 110 - Temperaturas célula 1, modelo numérica Laje 1.

A figura 111 apresenta a variação das temperaturas na célula 2, cujos pontos nodais correspondem aos termopares T13, T14, T24, T33 e T34, sendo apresentado os dados dos pontos T24, T33 e T34. Tal como anteriormente, a célula 1 apresenta dados semelhantes para

os termopares localizados nas furações, e o termopar localizado a meio (T24), apresenta uma variação ao longo do ensaio numérico, sendo no final uma temperatura inferior.

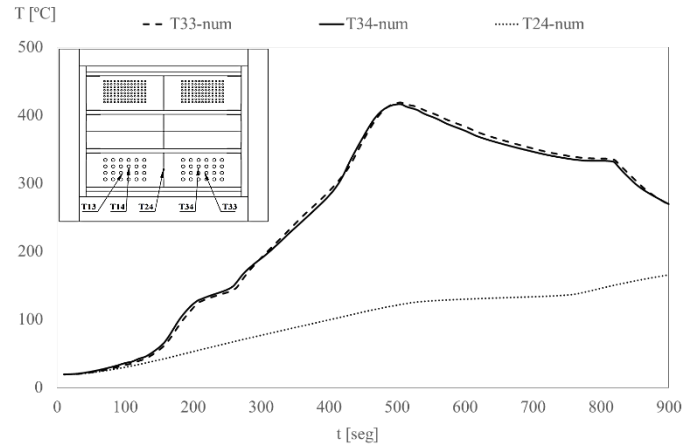


Figura 111 - Temperaturas célula 3, modelo numérico Laje 1.

Na figura seguinte, verifica-se o perfil de temperaturas ocorridas na célula 2, para os pontos T17 e T37. Como se pode verificar, as temperaturas apresentadas são inferiores às células 1 e 3, pois a célula 2 não apresenta nenhum tipo de furação. A temperatura registada no ponto T17 é idêntica ao T37 devido à simetria de resultados ocorrida no modelo computacional.

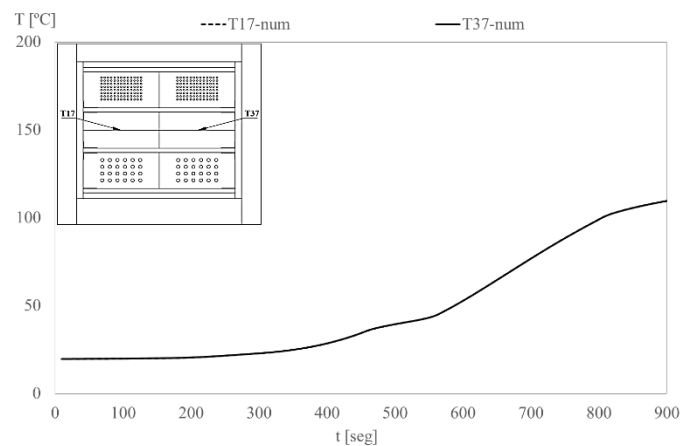


Figura 112 - Temperaturas célula 2, modelo numérico Laje 1.

Por fim, na figura 113, verifica-se a evolução das temperaturas nos pontos T26 e T27, localizados na face inferior das vigas que separam as células. Verifica-se uma evolução semelhante entre ambos, mas no final da análise constata-se que a temperatura superior localiza-

se no termopar que separa a célula 3 da célula 2, ou seja, a que apresenta furações superiores. A diferença de temperatura não é acentuada devido à diferença mínima da área de furação entre as células.

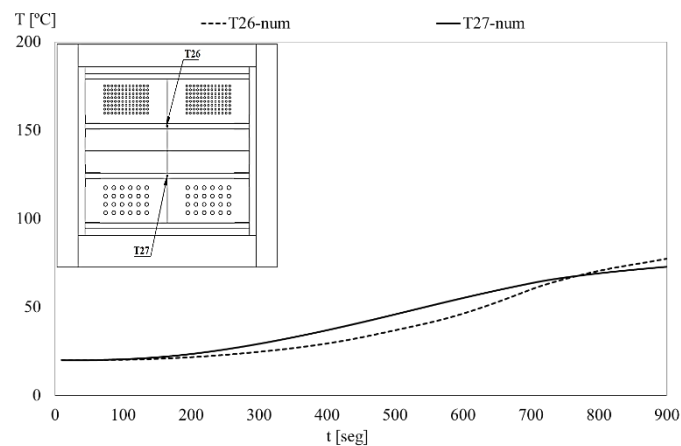


Figura 113 - Temperaturas nas vigas, modelo numérico Laje 1.

7.4 Velocidade de carbonização da laje 1

Para determinar a velocidade de carbonização computacionalmente, recorre-se ao mesmo cálculo efetuado experimentalmente. Foram realizadas medições nos mesmos pontos nodais próximos do ensaio experimental da camada carbonizada.

O limite de temperatura para a qual se considera que a madeira está totalmente carbonizada é aos 300 [°C], (EN1995-1-2, 2004). Toda a madeira com temperatura igual ou superior a 300 [°C], está completamente carbonizada e toda a madeira abaixo dessa temperatura encontra-se intacta.

As medições efetuadas foram para o tempo total de ensaio, 900 [s], sendo este o tempo considerado para o cálculo da velocidade de carbonização.

Tal como acontece no ensaio experimental, os cortes que correspondem à célula 3, são com perfurações superiores. Para o cálculo da espessura carbonizada nesta célula utilizam-se os cortes C1, C2, C7 e C8. Os cortes que correspondem à célula 2 são os C3, C4, C9 e C10, e os cortes que correspondem à célula 1 são os C5, C6, C11 e C12. Em cada corte foi realizada a medição da camada carbonizada em 5 pontos, dois em cada lado, um no meio e dois a 2/5 e 4/5 da distância de medição (250 mm).

Na tabela 20, é possível verificar a espessura da camada carbonizada da célula 3 para os cortes C1 e C2, lado esquerdo da placa de teto. Na tabela 21 os resultados são correspondentes aos cortes C7 e C8, do lado direito da placa de teto.

Tabela 20 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C1 e C2.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C1	17.6	8.0	16.8	8.0	17.6
C2	16.0	8.0	16.0	16.0	16.8
Média	16.8	8.0	16.4	12.0	17.2
D. Padrão	0.8	0.0	0.4	4.0	0.4

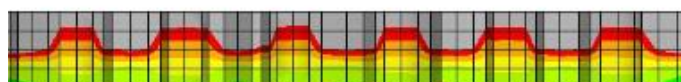


Figura 114 - Representação do corte 1 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 21 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C7 e C8.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C7	16.0	8.0	16.0	8.0	16.0
C8	16.0	8.0	16.0	8.0	16.0
Média	16.0	8.0	16.0	8.0	16.0
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

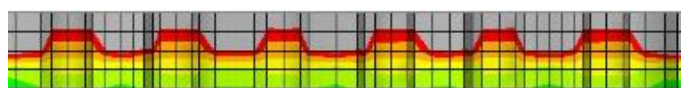


Figura 115 - Representação do corte 7 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Na tabela 22, verifica-se a espessura carbonizada da célula 2 para os cortes C3 e C4, e na tabela 23 aos cortes C9 e C10, respetivamente do lado esquerdo e direito da placa de teto.

Tabela 22 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C3 e C4.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C3	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
C4	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
Média	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

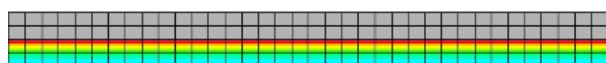


Figura 116 - Representação do corte 3 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 23 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C9 e C10.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C9	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
C10	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
Média	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

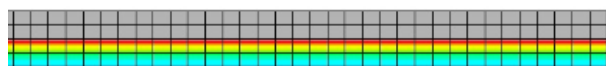


Figura 117 - Representação do corte 9 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Por fim, nas tabelas 24 e 25, apresenta-se a espessura da camada carbonizada da célula 1 para os cortes descrito anteriormente.

Tabela 24 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C5 e C6.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C5	16.8	8.0	14.4	16.0	16.8
C6	16.0	7.2	15.2	7.2	16.0
Média	16.4	7.6	14.8	11.6	16.4
D. Padrão	0.4	0.4	0.4	4.4	0.4

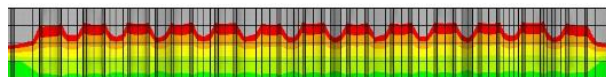


Figura 118 - Representação do corte 5 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 25 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C11 e C12.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C11	16.0	8.0	12.0	8.0	16.0
C12	16.8	7.2	14.4	7.2	16.0
Média	16.4	7.6	13.2	7.6	16.0
D. Padrão	0.4	0.4	1.2	0.4	0.0

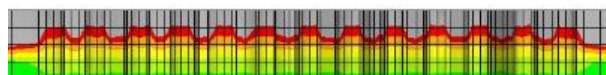


Figura 119 - Representação do corte 11 da Laje 1 (20-300 °C), Ansys.

Através das medições anteriores, e com a utilização do tempo de ensaio decorrido na medição (900 s), determina-se a velocidade de carbonização em cada célula. A velocidade ocorrida na célula 1 foi 0.90 [mm/min], na célula 2 foi de 1.12 [mm/min] e na célula 3 foi 0.85 [mm/min]. Os valores apresentados na tabela 26 são os valores médios da velocidade de carbonização dos cortes correspondentes a cada célula.

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

Células Identificação	Cortes Identificação	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	C1 e C2	0.94	0.90
	C7 e C8	0.85	
2	C3 e C4	1.12	1.12
	C9 e C10	1.12	
1	C5 e C6	0.89	0.85
	C11 e C12	0.81	

Como se pode observar pela tabela 26, a velocidade de carbonização não apresenta valores esperados, ocorre uma velocidade de carbonização superior na célula 2 e posteriormente na célula 3 e 1.

7.5 Comportamento térmico da laje 2

A análise numérica realizada na Laje 2 é idêntica ao ensaio numérico da Laje 1. Trata-se do mesmo problema em regime transiente não linear durante 900 [s], conforme o tempo de ensaio experimental, com incremento de tempo máximo igual a 10 [s] e mínimo de 2 [s]. As condições de fronteira são idênticas, sendo que neste problema a alteração reside na introdução das curvas de aquecimento obtidas experimentalmente na laje 2. A figura 120, apresenta o perfil de temperaturas no instante final do ensaio, assim como a camada carbonizada aos 900 [s]. Tal como na Laje 1, a face diretamente exposta ao fogo atinge temperaturas superiores e o tamanho das furações impõe temperatura superior no interior da célula.

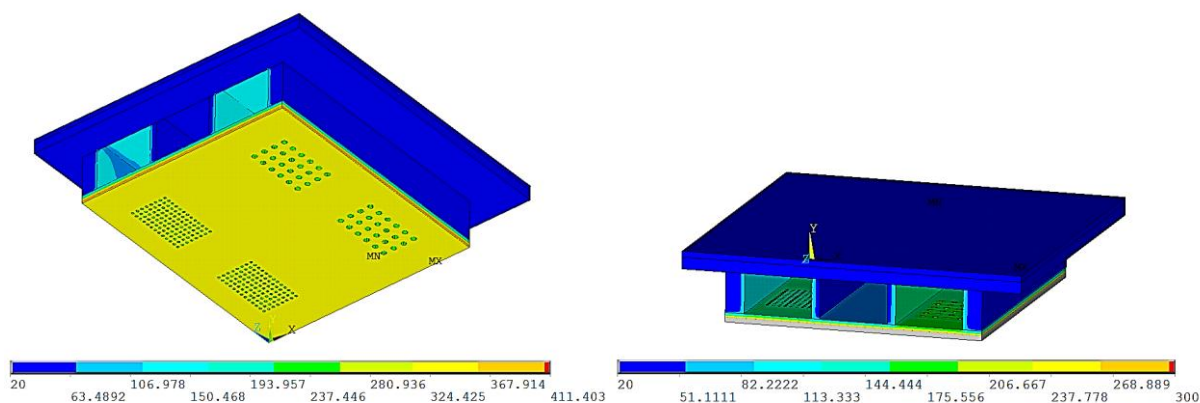


Figura 120 - Solução numérica da Laje 2, imagem esquerda – temperatura mínima 20 °C e temperatura máxima de 411 °C, imagem da direita – espessura carbonizada, variação da temperatura de 20 a 300 °C, Ansys.

A localização dos pontos para registo do campo de temperaturas é idêntico à simulação experimental da Laje 2. Na figura 121 apresenta-se o gráfico da evolução das temperaturas na face não exposta ao fogo. Tal como acontece no ensaio numérico da Laje 1, existe uma simetria na estrutura entre o lado direito e esquerdo e a variação da temperatura de acordo com a furação associada, ou seja, a célula 3 (T11, T21 e T31), apresenta temperatura superior, seguida da célula 1 (T12 e T32), encontrando-se a célula 2 com temperatura inferior (T22).

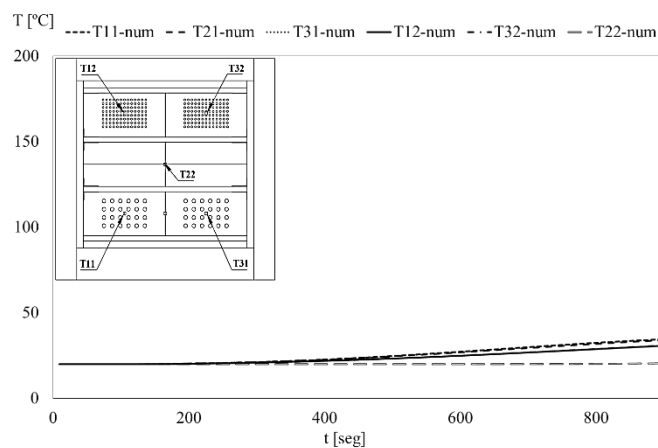


Figura 121 - Perfil de temperaturas na face não exposta.

Nos gráficos da evolução de temperatura nos diferentes pontos nodais, como a evolução de temperaturas é simétrica, apresenta-se unicamente os resultados relativos a um dos lados da laje.

Na figura 122, verifica-se o perfil de temperaturas obtido na análise numérica da célula 1, sendo apresentado os resultados para o ponto de medição T25, T35 e T36. Como era de esperar, os pontos localizados na furação (T35 e T36), devido à sua proximidade e devido à furação, apresentam temperatura superior semelhantes. No caso do ponto T25, não ocorre a influência da perfuração, sendo a temperatura inferior.

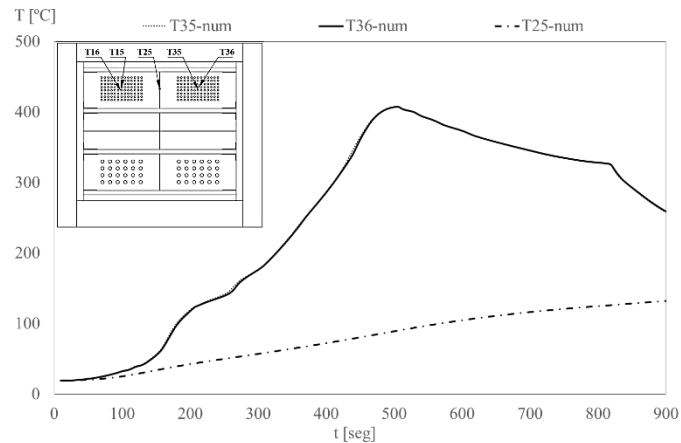


Figura 122 - Perfil de temperaturas registadas na célula 1.

A figura 123 representa o perfil de temperatura ocorrido na célula 3. Como se pode observar, ocorre o mesmo que na célula 1, os pontos localizados na furação registam temperaturas superiores (T33 e T34) devido à influência da furação e o ponto nodal externo à furação regista temperaturas inferiores (T24).

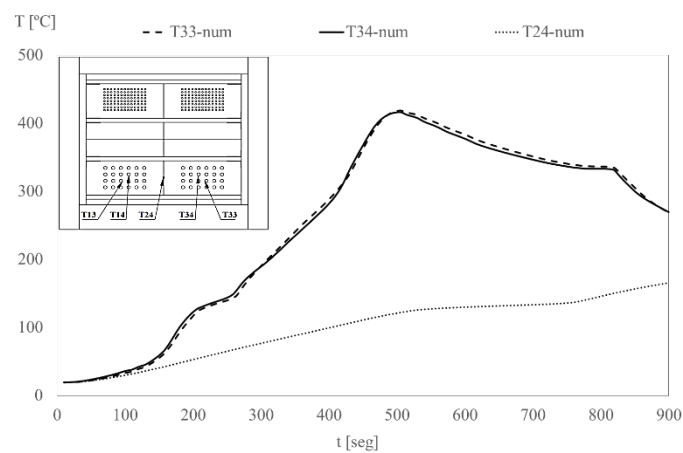


Figura 123 - Perfil de temperaturas registadas na célula 3.

A evolução da temperatura na célula 2 (Figura 124) é registada através dos pontos T17 e T37. Como se pode visualizar, esta célula apresenta temperaturas inferiores devido à inexistência de qualquer tipo de furação, tornando a área mais resistente face à penetração da temperatura.

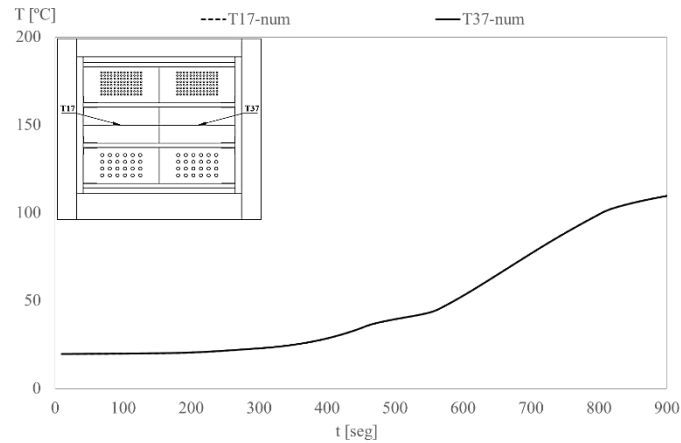


Figura 124 - Perfil de temperaturas registadas na célula 2.

Por fim, na figura 125, apresenta-se a temperatura ocorrida na interface das vigas com a placa de teto. Neste caso, verifica-se uma evolução semelhante ao longo do ensaio, sendo que o perfil de temperaturas é idêntico na divisão de ambas as células, isto ocorre devido à área de furação semelhante entre a célula 1 e a célula 3 e devido à malha de elementos finitos não uniforme.

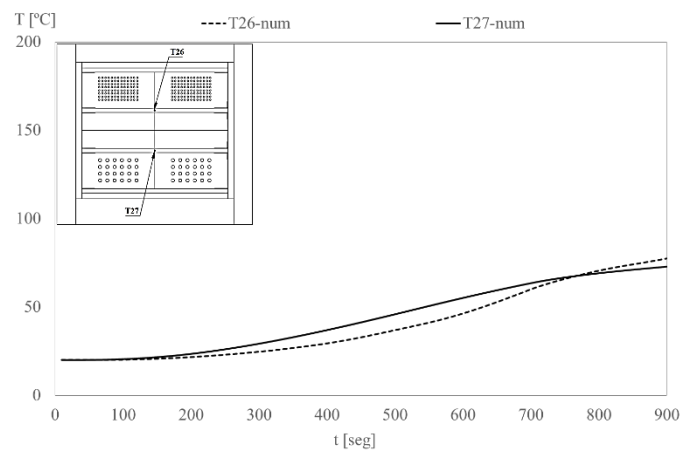


Figura 125 - Perfil de temperaturas registadas nas vigas.

7.6 Velocidade de carbonização da laje 2

Para determinar a velocidade de carbonização obtida numericamente na Laje 2, recorre-se ao método experimental realizado, considerando-se os dados da espessura carbonizada nos mesmos pontos nodais.

As condições de medição são as utilizadas na Laje 1, ou seja, o limite de carbonização ocorre aos 300 [°C] e num tempo total de 900 [s].

Foram atribuídos os mesmos nomes aos cortes de medição, entre as análises experimentais e numéricas da Laje 1 e 2. Os cortes C1, C2, C7 e C8 correspondem à célula 3, os cortes C3, C4, C9 e C10 à célula 2 e os cortes que correspondem à célula 1 são os C5, C6, C11 e C12. Mais uma vez em cada corte foi realizada a medição da camada carbonizada em 5 pontos, dois em cada lado, um no meio e dois a 2/5 e 4/5 da distância de medição (250 mm).

Nas tabelas 27 e 28, é possível verificar a espessura da camada carbonizada da célula 3 para os cortes C1 e C2, do lado esquerdo e dos cortes C7 e C8 do lado direito da placa de teto.

Tabela 27 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C1 e C2.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C1	16.8	0.0	14.4	0.0	16.0
C2	15.2	0.0	15.2	0.0	15.2
Média	16.0	0.0	14.8	0.0	15.6
D. Padrão	0.8	0.0	0.4	0.0	0.4

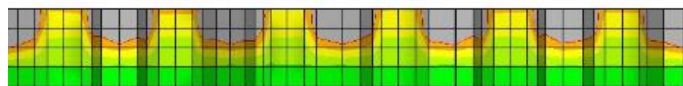


Figura 126 - Representação do corte 1 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 28 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C7 e C8.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C7	15.2	0.0	13.6	0.0	15.2
C8	15.2	0.0	14.4	0.0	15.2
Média	15.2	0.0	14.0	0.0	15.2
D. Padrão	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0

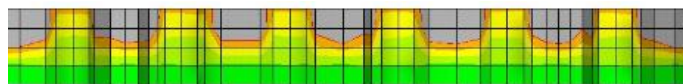


Figura 127 - Representação do corte 7 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Na tabela 29, verifica-se a espessura carbonizada da célula 2 para os cortes C3 e C4, e na tabela 30 aos cortes C9 e C10, respetivamente do lado esquerdo e direito da placa de teto.

Tabela 29 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C3 e C4.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C3	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
C4	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
Média	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Figura 128 - Representação do corte 3 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 30 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C9 e C10.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C9	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
C10	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
Média	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

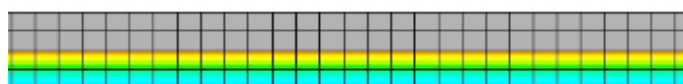


Figura 129 - Representação do corte 9 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Por fim, nas tabelas 31 e 32 apresenta-se a espessura da camada carbonizada da célula 1 para os cortes descritos anteriormente.

Tabela 31 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C5 e C6.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C5	16.0	2.4	2.4	2.4	16.0
C6	16.0	1.6	4.0	1.6	16.0
Média	16.0	2.0	3.2	2.0	16.0
D. Padrão	0.0	0.4	0.8	0.4	0.0

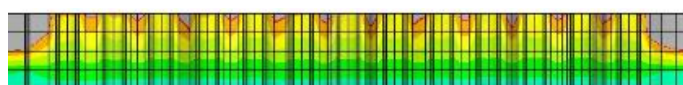


Figura 130 - Representação do corte 5 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Tabela 32 - Espessura de madeira carbonizada nos cortes C11 e C12.

Corte Identificação	Madeira carbonizada [mm]				
	a	b	c	d	e
C11	16.0	1.6	2.4	1.6	16.0
C12	16.0	1.6	2.4	1.6	16.0
Média	16.0	1.6	2.4	1.6	16.0
D. Padrão	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

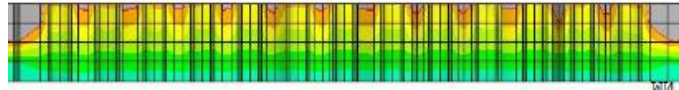


Figura 131 - Representação do corte 11 da Laje 2 (20-300 °C), Ansys.

Através das medições anteriores, e com a utilização do tempo de ensaio decorrido na medição (900 s), determina-se a velocidade de carbonização em cada célula. A velocidade ocorrida na célula 1 foi 0.61 [mm/min], na célula 2 foi 1.07 [mm/min] e na célula 3 foi 0.51 [mm/min]. Os valores apresentados na tabela 33 são os valores médios dos cortes correspondentes a cada célula.

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 e C2	0.62	0.61
	C7 e C8	0.59	
2	C3 e C4	1.07	1.07
	C9 e C10	1.07	
1	C5 e C6	0.52	0.51
	C11 e C12	0.50	

Através da tabela 33, verificasse que ocorre o mesmo efeito da laje 1, a velocidade de carbonização é superior na célula 2, seguida da célula 3 e posteriormente a célula 1.

7.7 Velocidade de Carbonização Laje 1 e 2

Como se pode verificar anteriormente, o resultado obtido não foi o esperado, pois a velocidade de carbonização de ambas as lajes, deveria ser superior de acordo com a furação, ou seja, seria superior na célula 3, seguida da célula 1 e posteriormente da célula 2 mas, o que ocorre é que a célula 2 apresenta uma velocidade de carbonização superior.

O erro no cálculo da velocidade de carbonização pode ser ocorrido devido à malha de elementos finitos nas perfurações circulares se tornar menos homogênea e de difícil identificação nodal pelo número de nós gerados, traduzindo-se na dificuldade da seleção dos pontos mais adequados na medição do perfil de temperatura (Figuras 132 e 133).

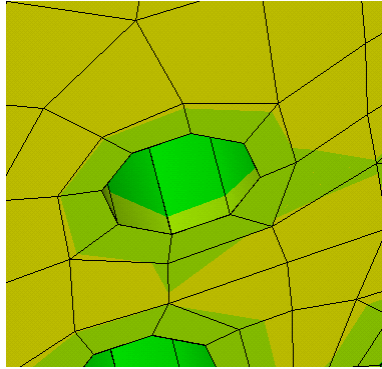


Figura 132 - Temperaturas Laje 2 na furação (T 20-412 °C), Ansys.

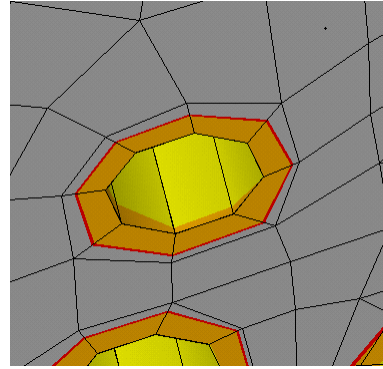


Figura 133 - Temperaturas Laje 2 na furação (T 20-300 °C), Ansys.

Para melhorar os resultados, foram realizados novos pontos de medição da espessura carbonizada, localizados no interior de cada célula,

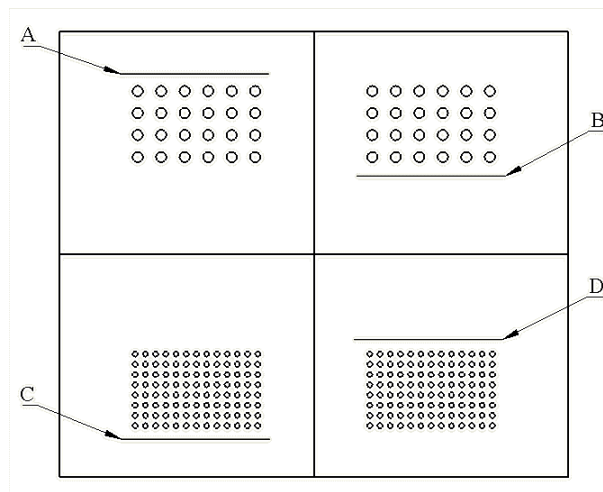


Figura 134 - Localização dos novos pontos de medição.

Nas tabelas 34 e 35, verifica-se a camada carbonizada da Laje 1, célula 3 (Cortes A e B) e célula 1 (Cortes C e D). Na tabela 36 verifica-se a velocidade de carbonização calculada.

Tabela 34 - Espessura carbonizada cortes A e B, Laje 1.

Corte		Madeira carbonizada [mm]				
Identificação	a	b	c	d	e	
A	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	
B	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	
Média	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	

Tabela 35 - Espessura carbonizada cortes C e D, Laje 1.

Corte		Madeira carbonizada [mm]				
Identificação	a	b	c	d	E	
C	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	
D	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	
Média	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	

Tabela 36 - Velocidade de carbonização, Laje 1.

Células	Cortes	Velocidade de carbonização		
		Identificação	Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	A		1.17	1.17
	B		1.17	
2	C3 e C4		1.12	1.12
	C9 e C10		1.12	
1	C		1.12	1.12
	D		1.12	

As tabelas 37 e 38, representam os valores registados para a camada carbonizada da Laje 2. Na tabela 39 apresenta-se a velocidade de carbonização calculada.

Tabela 37 - Espessura carbonizada cortes A e B, Laje 2.

Corte		Madeira carbonizada [mm]				
Identificação	a	b	c	d	e	
A	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	
B	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	
Média	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	

Tabela 38 - Espessura carbonizada cortes C e D, Laje 2.

Corte		Madeira carbonizada [mm]				
Identificação	a	b	c	d	E	
C	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	
D	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	
Média	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	

Tabela 39 - Velocidade de carbonização, Laje 2.

Células Identificação	Cortes Identificação	Velocidade de carbonização	
		Nos cortes [mm/min]	Média Final [mm/min]
3	A	1.12	1.12
	B	1.12	
2	C3 e C4	1.07	1.07
	C9 e C10	1.07	
1	C	1.07	1.07
	D	1.07	

Com a utilização de novos cortes para medição, fora da furação, foi possível obter valores para a velocidade de carbonização aceitáveis, uma vez que, a velocidade de carbonização é superior na célula 3 para ambas as lajes estudadas, e a célula 1 e 2 apresentam a mesmas velocidade.

Capítulo 8

8 Comparação dos resultados entre modelo experimental e computacional

Neste capítulo, é efetuada a comparação entre os modelos experimental e computacional das lajes em estudo. A designação atribuída aos resultados provenientes dos ensaios experimentais é “**exp**”, e os resultados provenientes do modelo computacional é “**num**”.

8.1 Comportamento térmico da laje 1

Na figura 135, é efetuada a comparação do perfil de temperaturas da face não exposta ao fogo (placa de pavimento) entre os modelos computacional e experimental. Verifica-se que na análise numérica, a laje apresenta resultados simétricos, sendo o perfil de temperaturas dos pontos T11 e T31, T12 e T32 idênticos.

Ao longo do estudo, a temperatura obtida numericamente é ligeiramente inferior ao ensaio experimental verificando-se que, a temperatura superior corresponde aos pontos localizados na célula de perfurações superiores (célula 3), seguida da célula 1 e posteriormente a célula 2 com temperaturas inferiores.

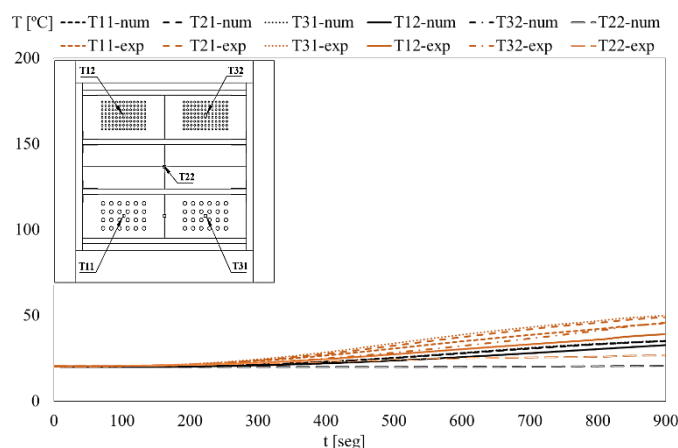


Figura 135 - Perfil de temperatura, face não exposta, modelo computacional e experimental, Laje 1.

Na figura seguinte, compararam-se os resultados dos pontos localizados na base das vigas que separam as células. No caso do modelo computacional, verifica-se que o resultado é

uniforme, enquanto no ensaio experimental ocorrem variações bruscas da temperatura, devido à união no conjunto das placas de teto não estar completamente estanque.

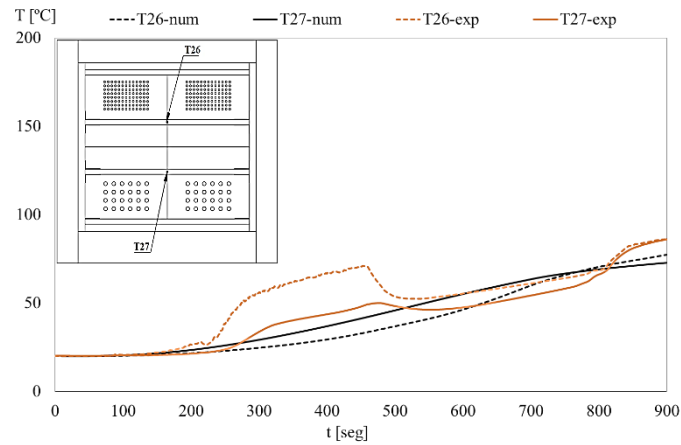


Figura 136 - Perfil de temperatura nas vigas, modelo computacional e experimental, Laje 1.

A figura 137 representa a evolução do perfil de temperaturas da célula 1. Verifica-se tendência em acompanhar a evolução da curva de incêndio imposta, para ambos os ensaios nos pontos de medição localizados juntos às furações. Verifica-se uma concordância de resultados ao longo do ensaio.

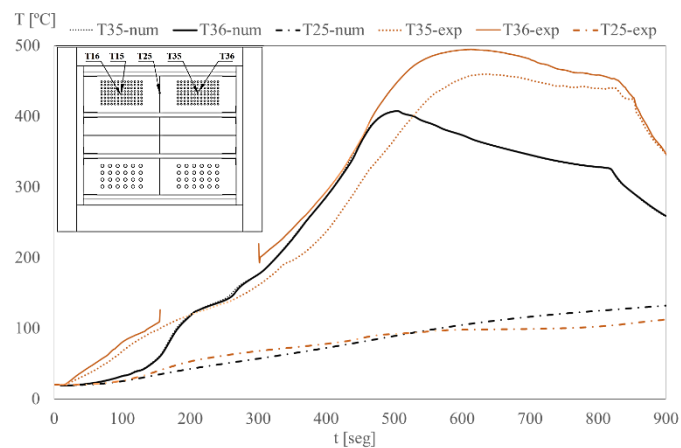


Figura 137 - Perfil de temperatura na célula 1, modelo computacional e experimental, Laje 1.

Nos resultados referentes à célula 2 (Figura 138), verifica-se que o modelo computacional é uniforme seguindo a tendência da evolução da temperatura no interior da célula, enquanto no

ensaio experimental a evolução não é uniforme, tal como no perfil das vigas, ocorrendo a influência da curva de aquecimento e a má união das placas de teto.

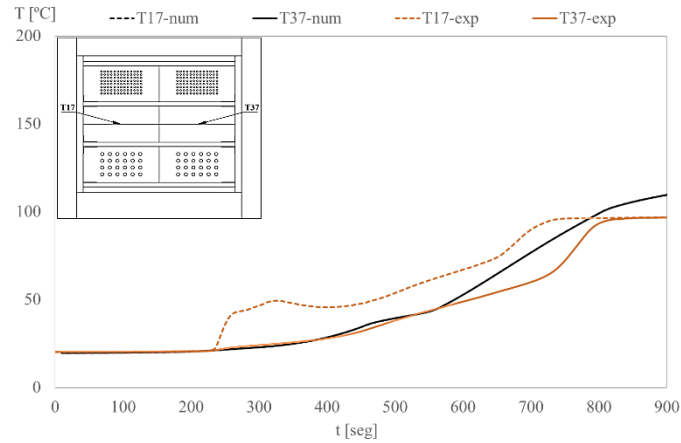


Figura 138 - Perfil de temperatura na célula 2, modelo computacional e experimental, Laje 1.

Na figura 139, visualiza-se o perfil de temperaturas da célula 3, para o modelo computacional e experimental. O perfil de temperatura segue a curva de incêndio em ambos os ensaios. Verifica-se a influência das furações nos pontos (T33 e T34) no perfil de temperaturas de ambos os métodos.

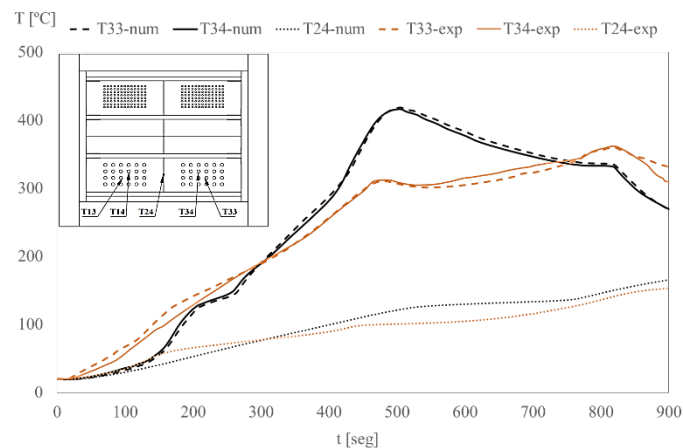


Figura 139 - Perfil de temperatura na célula 3, modelo computacional e experimental, Laje 1.

8.2 Comportamento térmico da laje 2

Nas figuras seguintes é possível verificar a comparação entre o modelo computacional e o modelo experimental, relativamente à Laje 2. Mais uma vez apresentam-se os resultados apenas de um lado da laje devido à simetria geométrica.

Na figura 140, apresenta-se a comparação das temperaturas ocorridas na face não exposta da laje, ou seja, na placa de pavimento. Verifica-se uma evolução idêntica ao longo do ensaio e uma ligeira diferença das temperaturas ocorridas do modelo computacional, em relação ao modelo experimental. Neste caso o modelo computacional apresenta temperaturas inferiores. Nas curvas de temperatura verifica-se a influência das perfurações, os termopares localizados acima da célula 3 (T11, T21 e T31), apresentam temperaturas superiores e o termopar localizado na célula 2 (T22), apresenta temperaturas inferiores.

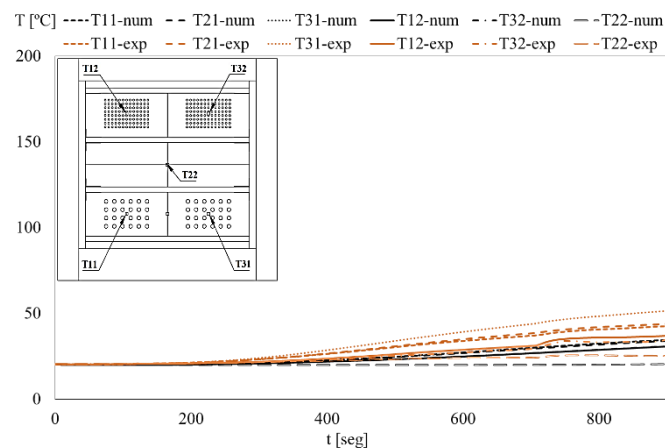


Figura 140 - Perfil de temperatura, face não exposta, modelo computacional e experimental, Laje 2.

Nas curvas de temperatura localizadas na base das vigas (Figura 141), verifica-se uma maior concordância dos resultados computacionais e experimentais, em relação ao ensaio da laje 1, e uma evolução relacionada com o aumento da temperatura ao longo do ensaio.

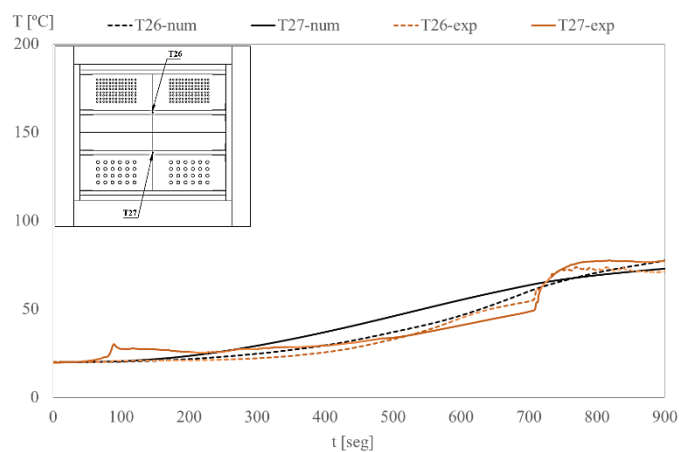


Figura 141 - Perfil de temperatura nas vigas, modelo computacional e experimental, Laje 2.

Na figura 142, compara-se o perfil de temperaturas nos pontos de medição da célula 1, sendo verificada uma evolução semelhante à laje 1.

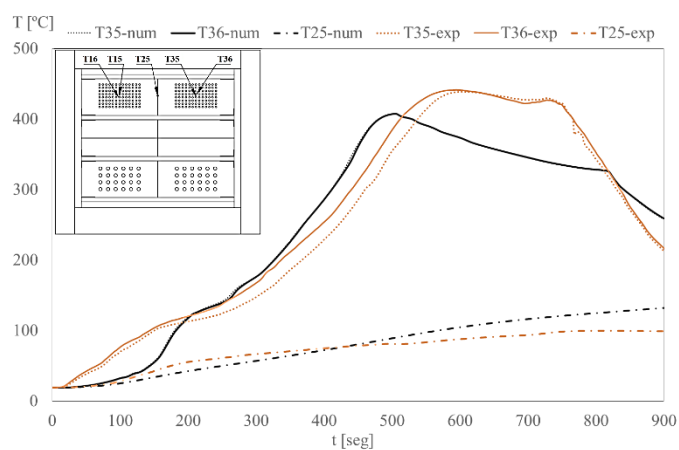


Figura 142 - Perfil de temperatura na célula 1, modelo computacional e experimental, Laje 2.

Comparando o resultado obtido na célula 2 (Figura 143), verifica-se que ambos os modelos apresentam valores semelhantes ao longo do tempo e seguem a mesma.

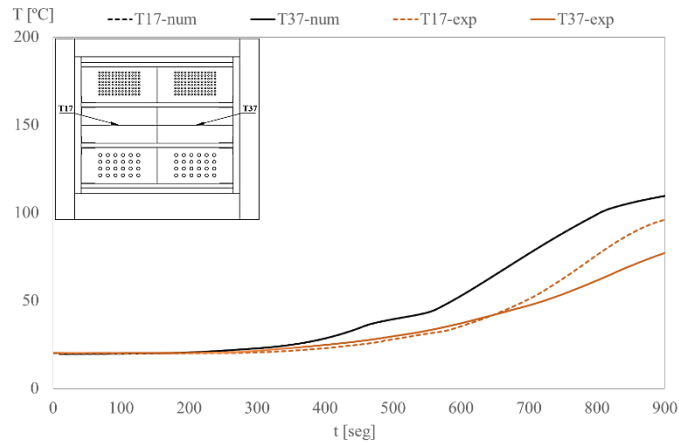


Figura 143 - Perfil de temperatura na célula 2, modelo computacional e experimental, Laje 2.

Comparando as temperaturas obtidas na célula 3 (Figura 144), verifica-se que as curvas dos modelos computacionais e experimentais apresentam evolução semelhante ao longo do tempo. Verifica-se ainda que os pontos localizados próximos da furação, têm temperaturas superiores ao ponto localizado fora da furação, isto devido à influência da perfuração e maior penetração da temperatura para o interior da laje.

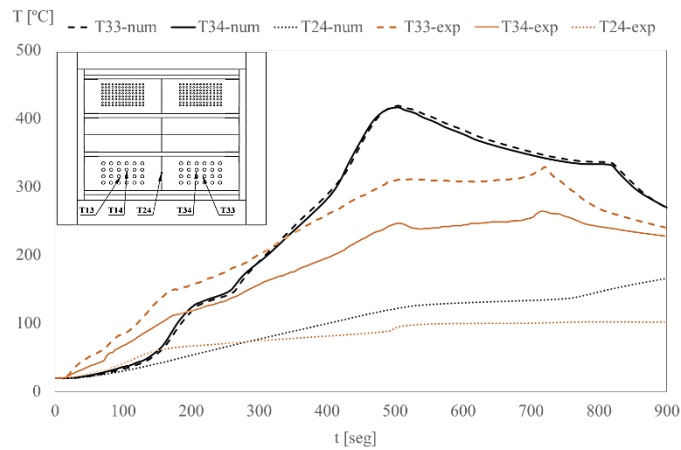


Figura 144 - Perfil de temperatura na célula 3, modelo computacional e experimental, Laje 2.

8.3 Velocidade de carbonização

O fator mais importante a ter em conta neste tipo de estruturas é a segurança. Para garantir esse efeito é necessário determinar o tempo antes de colapso da estrutura, podendo avaliar-se a velocidade de carbonização e assim calcular o tempo que uma estrutura mantém uma secção residual. Nas tabelas 40 e 41 é possível verificar as diferenças entre a velocidade de carbonização calculada segundo os dados experimentais e computacionais. No cálculo da velocidade de carbonização computacional apresenta-se ainda a velocidade obtida através da utilização dos cortes A, B, C e D, valores apresentados dentro de parênteses na célula associada.

Tabela 40 - Comparação das velocidades de carbonização, Laje 1.

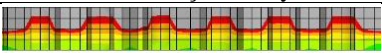

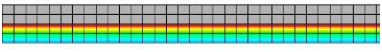

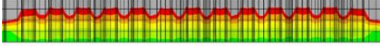

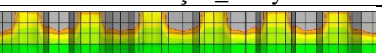

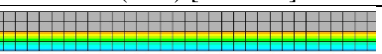

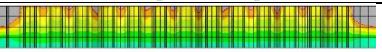

Cortes	Carbonização_Ansys	Carbonização_Experimental
Célula 3 - C1, C2, C7 e C8	 0.90 (1.17) [mm/min]	 1,80 [mm/min]
Célula 2 - C3, C4, C9 e C10	 1.12 [mm/min]	 1.30 [mm/min]
Célula 1 - C5, C6, C11 e C12	 0.85 (1.12) [mm/min]	 1.67 [mm/min]

Tabela 41 - Comparação das velocidades de carbonização, Laje 2.

Cortes	Carbonização_Ansys	Carbonização_Experimental
Célula 3 - C1, C2, C7 e C8	 0.61 (1.12) [mm/min]	 1.64 [mm/min]
Célula 2 - C3, C4, C9 e C10	 1.07 [mm/min]	 1.21 [mm/min]
Célula 1 - C5, C6, C11 e C12	 0.51 (1.07) [mm/min]	 1.60 [mm/min]

Capítulo 9

9 Comparação de resultados entre lajes com furação retangular e circular

Neste capítulo apresenta-se a comparação dos resultados entre dois modelos de laje distintos, com furações circulares e furações quadrangulares (Meireles, 2014). É possível comparar os dois modelos, porque ambos apresentam pontos idênticos de medição e dimensões da estrutura iguais, com exceção da furação (Figura 145).

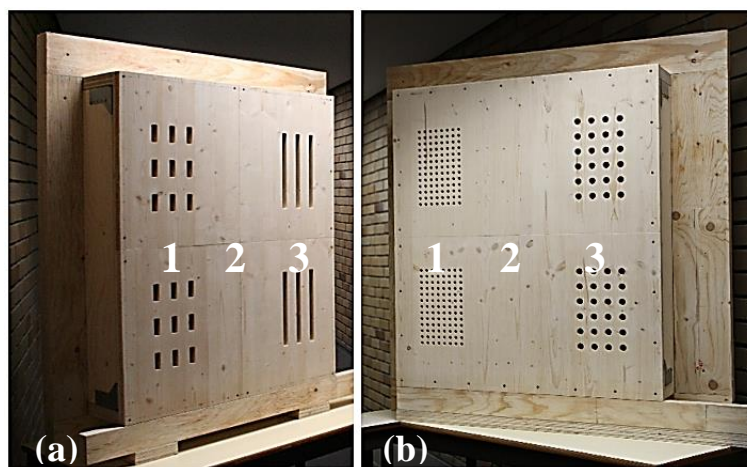


Figura 145 - Modelos de laje retangular e circular, IPB-ESTIG.

- As lajes apresentadas têm 3 células diferentes denominadas por célula 1, 2 e 3, a célula 1 corresponde à furação inferior, a célula 2 corresponde à parte sem furação e a célula 3 corresponde à furação superior.

- A área de furação da laje retangular (a), na célula 1 apresenta dimensão de $50 \times 20 \times 9 \times 2$ [mm], correspondendo a $18\,000$ [mm²], na célula 3 apresenta dimensão de $250 \times 20 \times 3 \times 2$ [mm], correspondendo a $30\,000$ [mm²].

Na laje de furação circular (b), a furação da célula 1 tem dimensões de $\text{Ø}10 \times 13 \times 8 \times 2$ [mm], correspondendo a $16\,328$ [mm²] e na célula 3 dimensões de $\text{Ø}20 \times 6 \times 4 \times 2$ [mm], correspondendo a $15\,072$ [mm²].

Os modelos com perfurações distintas foram ensaiados nas mesmas condições. Os resultados apresentados de seguida demonstram a evolução térmica ocorrida nos modelos

computacionais e experimentais de cada laje. No lado esquerdo apresentam-se os resultados da laje com furações retangulares e no lado direito a laje em estudo com perfurações circulares.

Nas figuras 146 e 147, é possível comparar o perfil de temperaturas ocorrido na face não exposta ao fogo, verifica-se que ambas as lajes apresentam uma evolução idêntica ao longo do ensaio, apresentando apenas mudanças na temperatura devido às diferentes perfurações.

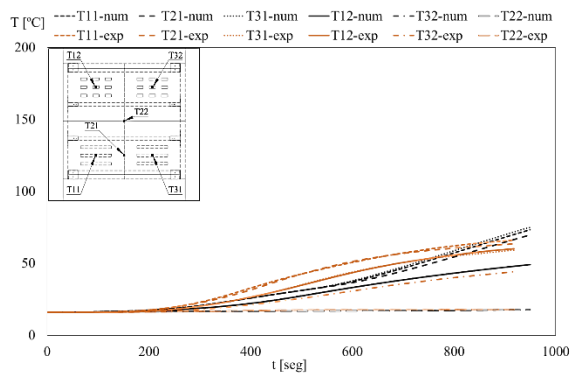


Figura 146 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, face não exposta.

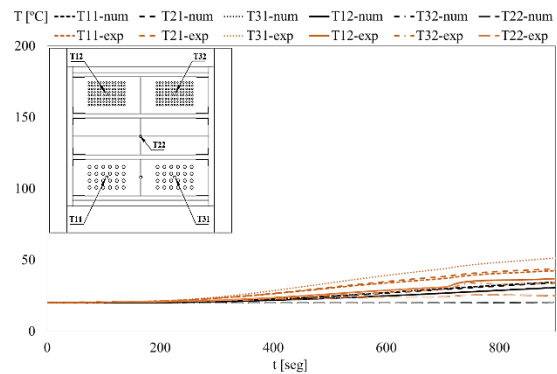


Figura 147 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, face não exposta.

Pelas figuras 148 e 149, o perfil de temperaturas ocorrido em ambas as lajes é semelhante à exceção da temperatura atingida. Mais uma vez, a área de furação da laje com perfurações retangulares é superior à laje em estudo, o que implica que a penetração do fogo é superior e consequentemente o aumento da temperatura mais acentuado, tornando o interior das células com maior temperatura.

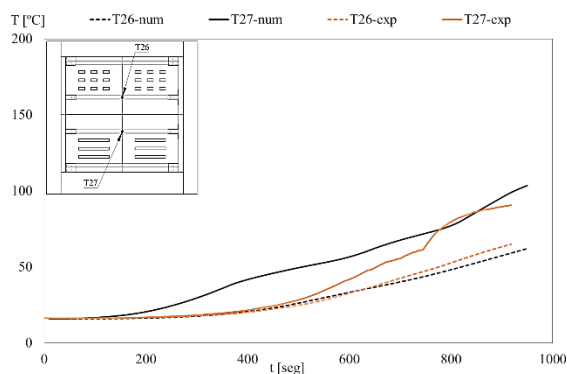


Figura 148 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, na face das vigas.

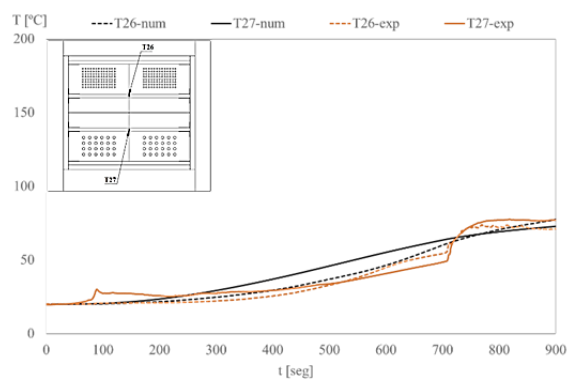


Figura 149 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, na face das vigas.

Nas figuras 150 e 151, é possível comparar o perfil de temperaturas ocorridas na célula 1. Verifica-se uma temperatura superior na laje de perfurações circulares, isto ocorre porque o espaço existente entre as furações é menor do que no caso da laje com perfurações retangulares, logo a carbonização é mais rápida e conseqüentemente aumenta a temperatura.

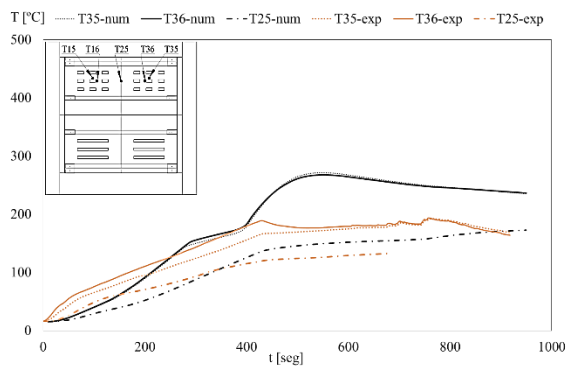


Figura 150 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 1.

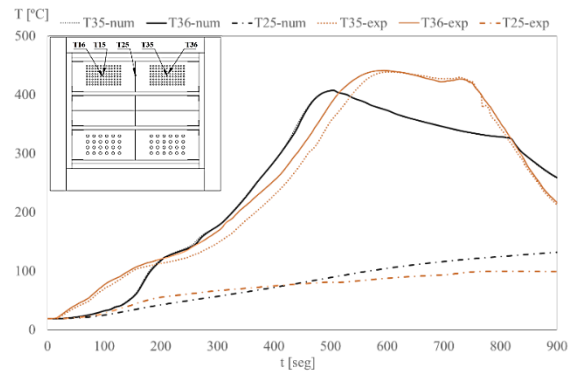


Figura 151 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 1.

Através das figuras 152 e 153, compara-se o perfil de temperaturas ocorrido na célula 2. Há uma uniformidade geral em ambas as lajes. Isto mostra que os ensaios correram de forma idêntica uma vez que as lajes foram submetidas às mesmas condições.

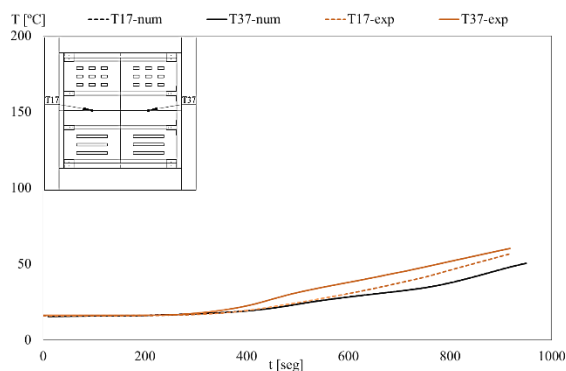


Figura 152 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 2.

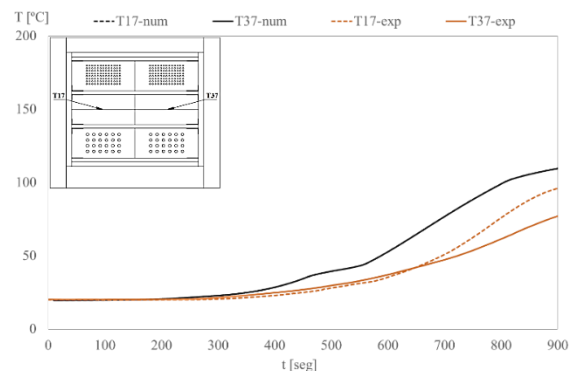


Figura 153 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 2.

Na célula 3 (Figura 154 e 155), verifica-se uma semelhança entre resultados das lajes, sendo que, no ensaio numérico a temperatura máxima atingida ocorre na laje de furação circular e no caso experimental é na laje de furação retangular.

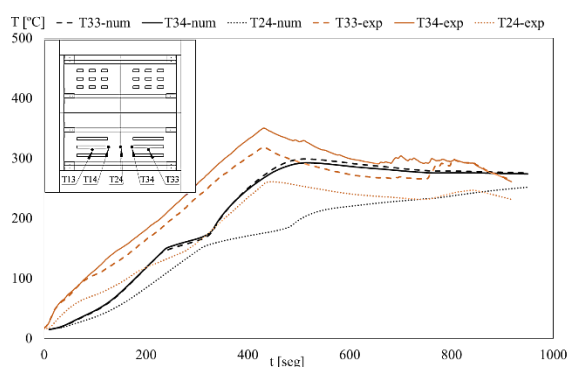


Figura 154 - Perfil de temperatura, perfurações retangulares, célula 3.

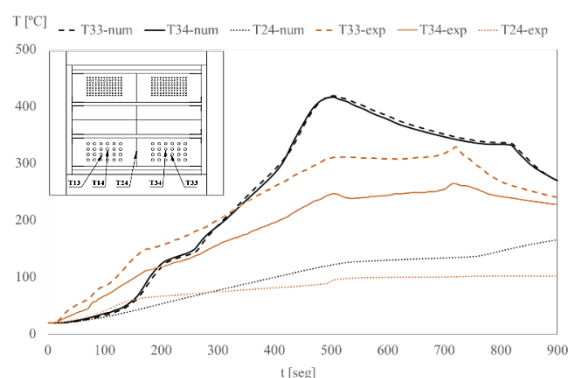


Figura 155 - Perfil de temperatura, perfurações circulares, célula 3.

Por fim, comparando a velocidade de carbonização ocorrido a nível experimental e computacional de ambas as lajes (Figuras 156 e 157), verifica-se que ocorre uma velocidade de carbonização média superior na laje com perfuração circular. Apesar das pequenas diferenças no ensaio, a velocidade de carbonização da célula 2, laje circular, é de 1.21 [mm/min] e na laje retangular de 0.80 [mm/min]. Verifica-se que a velocidade de carbonização varia não só com a área de furação ou tamanho de furação, mas também com a distância existente entre as furações. Teoricamente, a laje retangular deveria apresentar uma velocidade de carbonização superior, mas na realidade o que acontece é o oposto, isto ocorre devido à proximidade das furações da laje circular, pois a carbonização do material existente é superior.

Nas figuras seguintes, verifica-se que a velocidade de carbonização é superior em ambas as lajes na célula 3, verificando-se que a velocidade de carbonização é superior na laje retangular do que na circular. Neste caso, a distância entre as furações não influencia o resultado pois, verifica-se que o aumento da temperatura da célula e a carbonização ocorre devido à penetração da chama para o interior, resultado da área de furação superior.

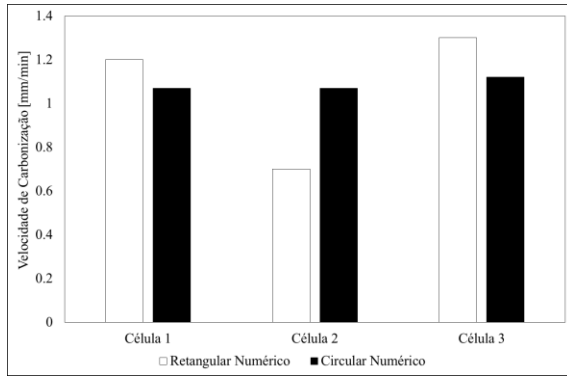


Figura 156 - Velocidade de carbonização dos ensaios computacionais.

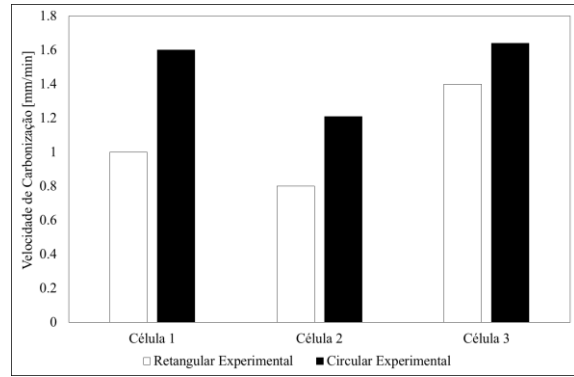


Figura 157 - Velocidade de carbonização dos ensaios experimentais.

Capítulo 10

10 Conclusões e trabalhos futuros

O trabalho realizado incide na análise de modelos de laje com perfuração circular submetidas ao fogo. Foram efetuados ensaios experimentais e computacionais em duas lajes de madeira, com diferentes perfurações na placa de teto. As lajes são sujeitas a uma situação de incêndio, permitindo analisar a evolução das temperaturas, determinar a espessura de camada carbonizada e a velocidade de carbonização. Os resultados obtidos através da análise computacional são validados com o ensaio experimental e ainda com estudos realizados anteriormente.

A realização de estudos experimentais com o intuito de validar os estudos computacionais é vantajoso, devido à importância da concordância de resultados. Se o método computacional apresentar boa concordância de resultados, podem ser utilizados esses modelos para verificação de estruturas submetidas à ação do fogo ainda em fase de projeto e realizar possíveis correções de forma a maximizar a sua segurança.

No cálculo da velocidade de carbonização, efetuado à área e o tipo de furação, obtém-se um resultado não esperado. No caso da laje de perfuração retangulares, aumentando a área de furação da célula 1 para a célula 3 ocorre um aumento de 40 % da área perfurada, e conseqüentemente, aumenta a velocidade de carbonização cerca de 28.6 %. No caso da laje com perfurações circulares, a área de furação da célula 1 para a célula 3 diminui cerca de 7.7 % devido ao diâmetro e quantidade de furos. Neste caso, a velocidade de carbonização aumenta cerca de 2,4 %, ou seja, a área de furação diminui mas a velocidade de carbonização aumenta. É de realçar ainda, que apesar de na célula 1 a área de furação ser inferior e o diâmetro da furação menor, a carbonização do material foi superior do que na célula com furações superiores, isto ocorreu devido à distância mínima entre as perfurações da célula 1.

Comparando a velocidade de carbonização com valores de referência do Eurocódigo 5, verifica-se que ocorre uma velocidade superior. Este resultado era esperado, devido à temperatura de aquecimento imposta na laje, com temperaturas superiores à curva de incêndio padrão (ISO834).

Para terminar, é de salientar que apesar da velocidade de carbonização ser superior, as lajes estudadas apresentaram boas características de isolamento e estanqueidade, garantindo

assim, os critérios impostos pela norma de ensaios (EN1363-1, 1999), para a duração dos ensaios.

10.1 Perspetivas de trabalhos futuros

Após a realização deste estudo seria uma mais valia dar continuidade ao desenvolvimento de novos projetos similares, explorando diferentes furações nas células e utilizando diferentes materiais.

Seria vantajoso, verificar a influência da diminuição do espaço entre furações no cálculo da velocidade de carbonização e temperatura. Utilizar também diferentes dimensões e geometrias nas perfurações das lajes projetadas.

Também a introdução de material isolante no interior das cavidades celulares, nomeadamente o MDF, poderia ser objetivo de estudos futuros.

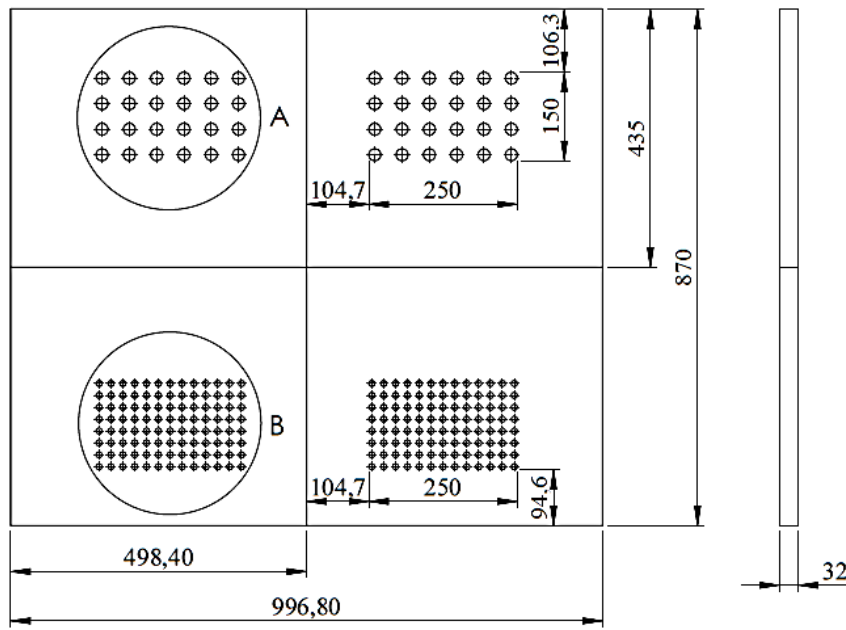
Capítulo 11

11 Bibliografia

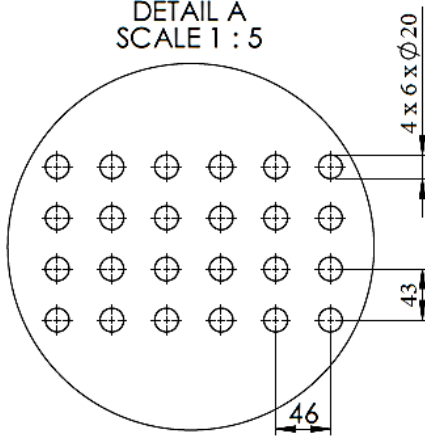
- Andrea, Frangi, Mario Fontana, e Carsten Erchinger. “Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities” *Fire Safety Journal*, volume 43, pp.551-564, 2008.
- Andrea, Frangi, Markus, Knobloch, Fontana, Mario. “Fire design of timber slabs made of hollow core elements” *Fire Safety Journal*, volume 31, pp.150-157, 2009.
- ASTME119. “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials” American Society for testing and Materials, 2008.
- Barreira L. “Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira”, Tese de Mestrado, Bragança, 2008.
- Barreira L. e Fonseca, E. M. M. “Método experimental para determinação da espessura carbonizada na madeira quando submetida a altas temperaturas”, Bragança, 2010.
- 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.
- Couto D. “Modelação numérica de um pavimento/cobertura em madeira com e sem isolamento sob ação do fogo”, Projeto de Licenciatura, Bragança, 2013.
- EN1363-1. “Fire resistance tests. Part 1, general requirements” August de 2012.
- EN1365-2. “Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 2: Floors and roofs” December de 2012.
- 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 2012.
- EN1995-1-2. “Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design. Brussels: CEN - Comité Européen de Normalisation” 2004.
- 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.
- Frangi A, Fontana M., Untersuchungen zum Brandverhalten von Holzdecken aus Hohlkastenelementen. Institut für Baustatik und Konstruktion, Zurich, 2004.

- Fresadora tipo Ram, página consultada em 04/11/2015. <http://machinerychina.com.pt/>
- 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.
- 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.
- ISO 834-1. “Fire resistance test - Elements of building construction. Part 1: General requirements” September de 1999.
- 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.
- Meireles J. “Comportamento ao fogo de lajes celulares com perfurações”, Tese de Mestrado, Bragança, 2014.
- Özisik, 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 Tecnológica, Minerva, volume 3(2), pp.131-140, São Paulo Brazil, 2004.
- 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
- Silve H. e Ramos H. “Thermal analysis of wood-steel hybrid construction”, Projeto de Licenciatura, Bragança, 2013.
- Simpson Strong-Tie “Conexões e Fixações”, Catálogo C-2013, pp. 68-74, 20013
- Washington B. F. “Transmissão de Calor”, São Paulo, Editora Thonsom Learning, 2004.
- White R. H., Dietenberger M. A. Fire Safety, Chap. 17, Wood Handbook. “Wood as an Engineering Material” 1999.
- White R. H., Erik V., Nordheim E. V. “Charring rate of wood for ASTM E119 exposure” Fire Technol, volume 28 (1). 1992.

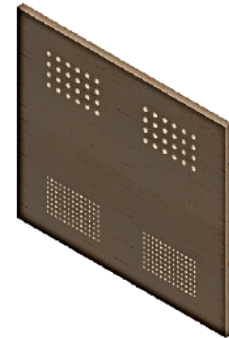
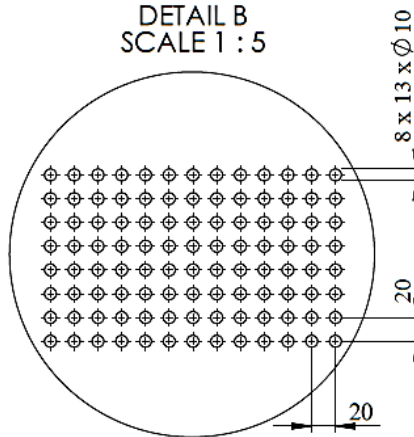
Anexos



DETAIL A
SCALE 1 : 5



DETAIL B
SCALE 1 : 5

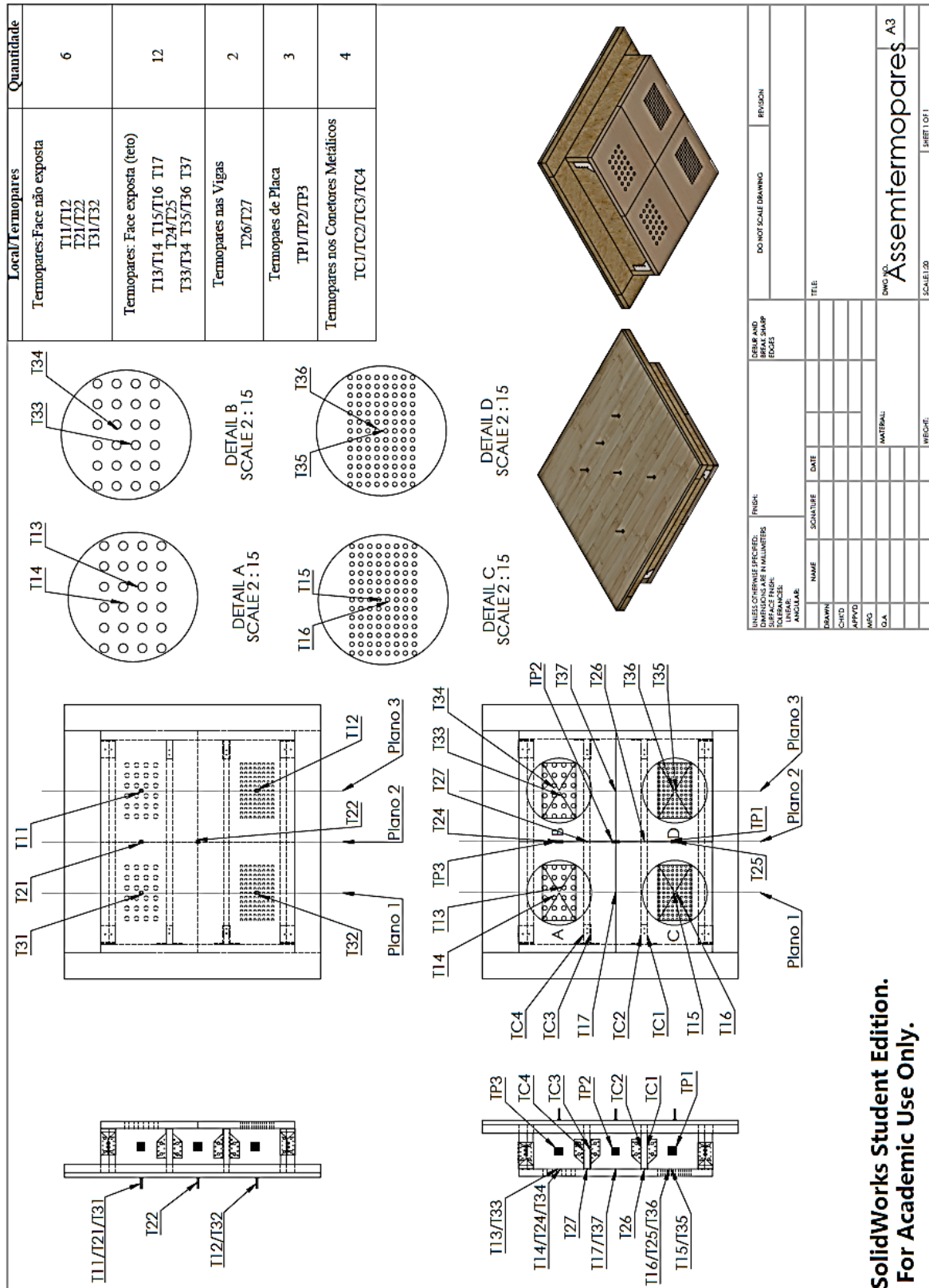


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN						
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A					DWG NO.	A4
			WEIGHT:		SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

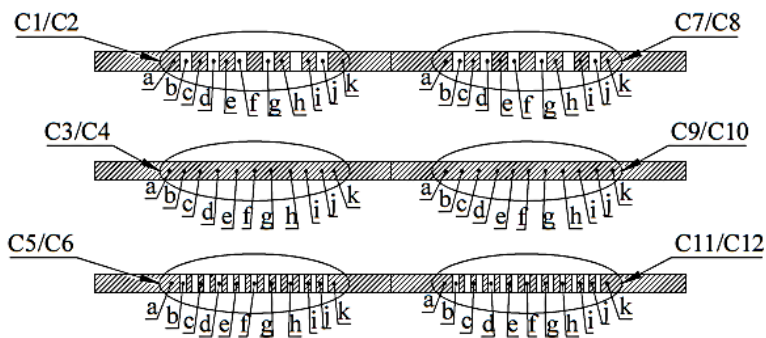
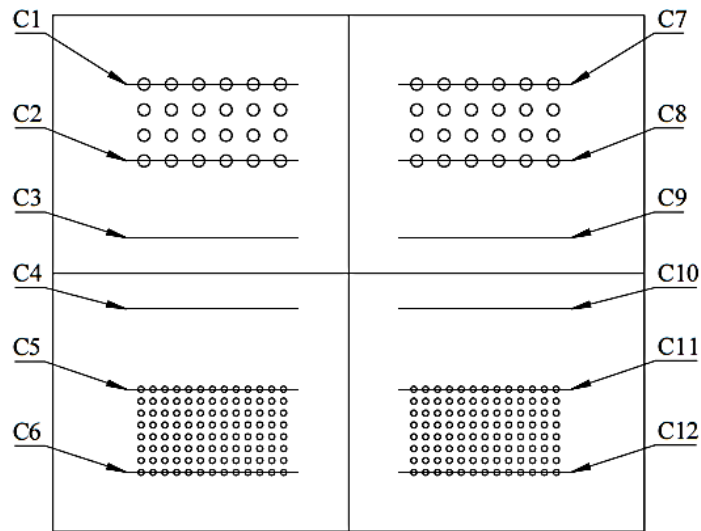
Placas Teto

1.2 A 2 - Desenhos definição da localização dos termopares

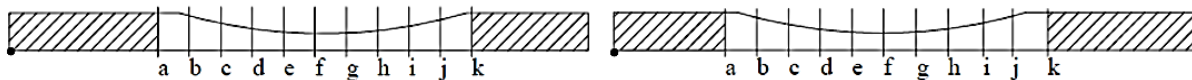


**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

1.3 A 3 - Pontos de medição da espessura de carbonização



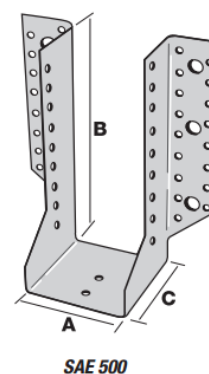
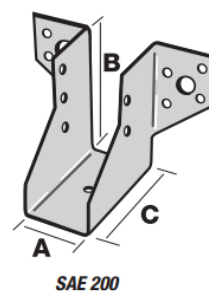
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN					area de furacao	
CHK'D						
APP'V'D						
MFG						
Q.A	SolidWorks Student Edition. For Academic Use Only.		MATERIAL:	DWG NO.	A4	
			WEIGHT:	SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1	



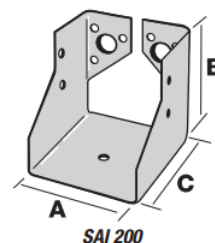
Letra	Lado Esquerdo [mm]	Lado Direito [mm]
a	128	95
b	155	122
c	182	149
d	209	176
e	236	203
f	263	230
g	290	258
h	317	285
i	344	315
j	371	340
k	398	370

1.4 A 4 - Conectores Simpson Strong-Tie

MODELO	Dimensões em mm				Fixações	
					Portador	Suportado
	A	B	C	Esp.	N.º - Pregos canelados	
SAE200/32/2	32	84	84	2	4 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE250/32/2	32	109	84	2	6 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE300/32/2	32	134	84	2	10 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE200/38/2	38	81	84	2	4 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE250/38/2	38	106	84	2	6 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE300/38/2	38	131	84	2	10 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE340/38/2	38	151	84	2	12 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE440/38/2	38	201	84	2	14 - Ø4,0 x 35	8 - Ø4,0 x 35
SAE200/40/2	40	80	84	2	4 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE250/40/2	40	105	84	2	6 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE300/40/2	40	130	84	2	10 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE340/40/2	40	150	84	2	12 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE200/46/2	46	77	84	2	4 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE250/46/2	46	102	84	2	6 - Ø4,0 x 35	4 - Ø4,0 x 35
SAE340/46/2	46	147	84	2	12 - Ø4,0 x 35	6 - Ø4,0 x 35
SAE500/46/2	46	227	84	2	18 - Ø4,0 x 35	10 - Ø4,0 x 35



MODELO	Dimensões em mm				Fixações		
					Número		Tipo
	A	B	C	Esp.	Portador	Suportado	Pregos canelados
SAI200/38/2	38	81	76	2	4	4	Ø4,0 x 35
SAI250/38/2	38	106	76	2	6	6	Ø4,0 x 35
SAI300/38/2	38	131	84	2	8	8	Ø4,0 x 35
SAI200/60/2	60	70	76	2	4	4	Ø4,0 x 50
SAI250/60/2	60	95	76	2	6	6	Ø4,0 x 50



SAI200/64/2	64	68	76	2	6	4	Ø4,0 x 50
SAI250/64/2	64	93	76	2	10	6	Ø4,0 x 50
SAI300/64/2	64	118	76	2	16	9	Ø4,0 x 50
SAI340/64/2	64	138	76	2	16	10	Ø4,0 x 50
SAI380/64/2	64	158	76	2	20	12	Ø4,0 x 50
SAI200/70/2	70	65	76	2	6	4	Ø4,0 x 50
SAI250/70/2	70	90	76	2	10	6	Ø4,0 x 50

