



**ANÁLISE DA DURABILIDADE DA REAÇÃO AO
FOGO DA MADEIRA E PAINÉIS DERIVADOS DE
MADEIRA**

Lídia Ana Araújo de França

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia da Construção

Julho de 2019

ANÁLISE DA DURABILIDADE DA REAÇÃO AO FOGO DA MADEIRA E PAINÉIS DERIVADOS DE MADEIRA

Lídia Ana Araújo de França

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia da Construção

No âmbito da Dupla Diplomação com a

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por:

Professor Doutor Luís Manuel Ribeiro de Mesquita (IPB)

Professor Doutor Jorge Luís Nunes de Góes (UTFPR)

Julho 2019

*A Jesus, o Cristo, e Arlinda, minha mãe,
pelo apoio e amor incondicional.*

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus por desde o ventre de minha mãe me mostrar tão grande amor e cuidado e também, por conceder a oportunidade de realizar este trabalho. À minha mãe, Arlinda Gonçalves de Araújo, guerreira e corajosa, que nunca mediou esforços para que eu tivesse melhor cuidado e educação. À minha família, Amélia, Robson e Gabriel, pelo apoio, incentivo e sorrisos em todos esses anos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Luís Mesquita, por todo apoio e ensinamentos nos últimos meses, sempre presente e paciente para me orientar. Ao meu coorientador, Professor Doutor Jorge Góes, pelo incentivo e ensino, não apenas na tese, mas durante a graduação.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no Brasil, que desde meus quatorze anos tem proporcionado crescimento intelectual, social e agora, cultural. À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, em Portugal, a qual teve papel fundamental na concepção desta pesquisa. Agradeço ambas pelo acordo realizado de Dupla Diplomação.

À Carla Carolina da Cunha e Thales Sbroglia Abrão, pela terna amizade que ativamente tornaram essa etapa de minha vida mais leve. À Camilla Oda e Matheus Breve por me incentivarem estar aqui. As minhas irmãs, Camila, Nadine, Nathalia e Stephanie, obrigada por me darem um lar em seus corações.

O meu agradecimento à Engenheira responsável pelo Laboratório de Resistência dos Materiais, Luiza Barreira, pelo auxílio e alegria durante os ensaios. Ao Engenheiro Jorge, responsável pelo FabLab, e ao Luiz Lopes, pela gentil cooperação para cortar todas as amostras. E por fim, a todos que contribuíram para a realização desta tese, o meu muito obrigada.

Resumo

A segurança contra incêndio é um assunto de grande relevância no setor da construção, a qual deve-se aplicar desde o projeto até a manutenção da vida útil das obras. Para conciliar um bom desempenho ao fogo, ou seja, menor contribuição ao sinistro, e um bom comportamento sustentável, o estudo sobre a reação ao fogo da madeira e seus painéis derivados tem ampliado, assim como o de tintas e vernizes ignífugas para esses materiais. Entretanto, ainda é preciso conhecer a durabilidade da reação ao fogo da madeira e painéis derivados de madeira, com ou sem retardantes.

Em decorrência disso, este trabalho tem por objetivo analisar a durabilidade da reação ao fogo da Madeira Laminada Colada (Glulam) e Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT), como representantes de madeira sólida, e do painel de *Oriented Strand Board* (OSB), como exemplo de painéis derivados de madeira, aplicados em ambientes internos. Também tem por objetivo avaliar a reação ao fogo dos mesmos materiais com o tratamento de um verniz ignífugo.

Para análise da durabilidade, foi realizado o Envelhecimento Artificial das amostras, o qual foi adotado a partir de modelos estatísticos do *Design of Experiments*, com o Método Fracionado Fatorial, onde definiu-se como base três fatores de degradação da madeira: temperatura, umidade relativa e tempo. Para cada fator foram definidos três níveis de atuação, 21,1 [°C], 32,2 [°C] e 87,8 [°C] para temperatura, 20%, 50% e 90% de umidade relativa e 7, 14 e 21 dias de exposição. A partir do método fracionado fatorial, chegou-se a nove combinações entre os fatores e níveis, das quais foram executadas três. Para correlacionar a umidade relativa do ar com o teor de umidade do material, a priori foi realizado o teste de secagem de acordo com a norma EN 322/1993. Em paralelo, três amostras de cada material foram aplicadas 1 [mm] de espessura de verniz ignífugo. Por fim, nas amostras envelhecidas e nas amostras com retardante foram realizados o Teste de

Calorímetro de Cone, de acordo com a ISO 5660, para avaliar sua reação ao fogo. Para comparação, amostras não envelhecidas e sem retardantes também foram submetidas ao mesmo teste. Os parâmetros de reação ao fogo analisados foram Taxa de Libertação de Calor (HRR), Calor Total Libertado (THR), Perda de Massa (ML) e Tempo de Ignição (Ti) das amostras.

Pode-se então concluir que, o comportamento ao fogo da madeira Glulam com retardante teve maior HRR, e menor THR em relação ao material sem o tratamento. Em seguida o CLT com retardante apresentou, em geral, maior pico de HRR, porém menor THR. E o OSB com retardante, em geral, demonstrou um comportamento similar ao OSB sem retardante. No caso dos materiais com Envelhecimento Acelerado, em geral, apresentaram menor HRR e THR em relação as amostras sem envelhecimento, com exceção do OSB que teve um acréscimo no HRR das amostras envelhecidas.

Palavras Chave: Segurança Contra Incêndio; Madeira; Glulam; CLT; OSB; Envelhecimento Acelerado, Modelo de Previsão; Reação ao Fogo; Calorímetro de Cone;

Abstract

The fire safety verification is a matter of great relevance in building construction which must be applied since the project during construction lifetime. For combine a good fire performance that is, less contribution to the fire accident and good sustainable behavior, the knowledge about wood and wood panels' reaction to fire has been increased as well as paints and flame retardant for these materials. However, it is still necessary to know the durability of the wood fire reaction and its wood panels, with or without retarders.

This research aims to analyze the durability of Glued Laminated Timber (Glulam) and Cross Laminated Timber (CLT) to fire reaction to represent solid timber, and Oriented Strand Board (OSB) as wood panels. It also aims to evaluate the fire reaction of the same materials with flame retardant treatment.

For durability analysis was done Accelerated Weathering to the samples, which was adopted from statistical models of the Design of Experiments, with the Fractional Factor Method, where three factors of wood degradation were defined: temperature, relative humidity and time. For each parameter was defined three different levels, 21,1 [°C], 32,2 [°C] e 87,8 [°C] to temperature, 20%, 50% e 90% to relative humidity and 7, 14 e 21 exposition days. From the Fractional Factor Method there were nine combinations between the factors and levels, of which three were executed. To correlate the relative humidity of the air with moisture content, was conducted to drying test according to EN 322/1993. In addition, in three samples of each material were applied 1 [mm] thickness of flame retardant. Finally, the aged samples and the samples with flame retardant were tested in the Calorimeter Cone following ISO 5660 to examine the fire reaction. To compare, samples without ageing process and flame retardant were submitted to the same test. The fire reaction parameters analyzed were Heat Release Rate, Total Heat Released, Mass Loss and Ignition Time of the samples.

It can be concluded that, in general, the fire behavior of Glulam wood with retardant had higher HRR, and lower THR in relation to the material without the treatment. Then, the

CLT samples with flame retardant presented, in general, higher peak HRR, but lower THR. And the OSB samples with flame retardant, in overall, showed a similar behavior to the OSB without retardant. In the case of materials with Accelerated Aging, in general, presented lower HRR and THR in relation to the samples without aging, with the exception of the OSB that had an increase in the HRR of the aged samples.

Keywords: Fire Safety; Wood; CLT; Glulam; OSB; Accelerated Aging; Design of Experiments; reaction to fire; Calorimeter Cone Test;

Índice

AGRADECIMENTOS.....	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS.....	XVII
NOMENCLATURA.....	1
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	4
1.2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	14
2. MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	15
2.1. MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO E SEU PAPEL SUSTENTÁVEL.....	15
2.2. MADEIRA SÓLIDA.....	17
2.3. PAINÉIS DERIVADOS DE MADEIRA.....	22
2.4. CLASSES DE USO.....	24
3. REAÇÃO AO FOGO DA MADEIRA.....	27
3.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	28
3.2. CURVAS DE INCÊNDIO PADRÃO.....	30
3.3. CLASSIFICAÇÃO NORMATIVA.....	32
3.4. RESINAS E RETARDANTES DE CHAMA.....	33
4. DURABILIDADE DA MADEIRA.....	36
4.1. O QUE É DURABILIDADE	36
4.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DURABILIDADE.....	36
4.2.1. <i>Propriedades e anisotropia da madeira.....</i>	<i>37</i>
4.2.2. <i>Fases de degradação térmica da madeira</i>	<i>39</i>
4.2.3. <i>Teor de umidade da madeira.....</i>	<i>41</i>

4.3.	ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO	48
5.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PREVISÃO PARA A DURABILIDADE DA REAÇÃO AO FOGO.....	50
5.1.	MODELO DE PREVISÃO.....	50
5.2.	PROJETO DE EXPERIMENTOS	52
6.	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA DURABILIDADE DA REAÇÃO AO FOGO	58
6.1.	VERIFICAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	58
6.2.	ANÁLISE DO EFEITO DO RETARDANTE	60
6.2.1.	<i>Caracterização das amostras.....</i>	<i>60</i>
6.2.2.	<i>Materiais e equipamentos utilizados.....</i>	<i>62</i>
6.2.3.	<i>Método de aplicação.....</i>	<i>63</i>
6.1.	ENVELHECIMENTO ACELERADO.....	64
6.1.1.	<i>Ensaio de Envelhecimento acelerado</i>	<i>64</i>
6.1.2.	<i>Câmaras Climáticas.....</i>	<i>65</i>
6.1.3.	<i>Caracterização das amostras para o Envelhecimento Acelerado</i>	<i>66</i>
6.1.1.	<i>Procedimento do ensaio de Envelhecimento Acelerado</i>	<i>68</i>
6.2.	ESTUDO DA REAÇÃO AO FOGO.....	72
6.2.1.	<i>Ensaio do Calorímetro de Cone.....</i>	<i>72</i>
6.2.2.	<i>Caracterização das amostras e procedimento do ensaio.....</i>	<i>74</i>
6.2.3.	<i>Resultados dos testes realizados no Calorímetro de Cone para o tratamento com retardante.....</i>	<i>78</i>
6.2.4.	<i>Resultados dos testes realizados no Calorímetro de Cone para o Envelhecimento Acelerado.....</i>	<i>82</i>
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
7.1.	CONCLUSÕES GERAIS	87
7.2.	LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	ANEXOS.....	97
A1.	RESULTADOS DO ENSAIO CALORÍMETRO DE CONE PARA TAXA DE LIBERTAÇÃO DE CALOR DO GLULAM, CLT E OSB.....	97
A2.	RESULTADOS DO ENSAIO CALORÍMETRO DE CONE PARA CALOR TOTAL LIBERTADO DO GLULAM, CLT E OSB.....	103
A3.	RESULTADOS DO ENSAIO CALORÍMETRO DE CONE PARA PERDA DE MASSA DO GLULAM, CLT E OSB	109

Lista de figuras

Figura 1 a Teste de um item único em combustão; b Teste de chamas; c Teste de painel radiante para pavimentos, [4].	7
Figura 2 Teste de envelhecimento natural em Estocolmo, [11].	11
Figura 3 Medindo a seção residual do CLT, [13].	12
Figura 4 Templo budista Horyu-ji, construção registrada mais antiga de madeira, [16].	15
Figura 5 <i>Brock Commons Tallwood House</i> , em Vancouver, Canadá, [18].	16
Figura 6 Shopping Iguatemi, em Fortaleza, Brasil, estrutura em MLC curva, [24].	18
Figura 7 Processo de produção do Glulam, [25].	19
Figura 8 Glulam utilizado nesta pesquisa.	20
Figura 9 Edifício Multi-familiar em construção situado em Judenburg, Áustria. [27].	21
Figura 10 Material CLT utilizado.	21
Figura 11 Exemplo de uma parede pré fabricada em CLT, [29].	22
Figura 12 Exemplo de aplicação de painéis de OSB, [34].	23
Figura 13 Esquema do processo de produção do OSB, [33].	24
Figura 14 Painel de OSB utilizado nesta pesquisa.	24
Figura 15 Amostra de madeira após sofrer combustão.	28
Figura 16 Efeito da carbonização em uma amostra exposta ao teste de Calorímetro de Cone.	29
Figura 17 Curva temperatura-tempo de um incêndio real, [44].	31
Figura 18 Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão, [44].	31
Figura 19 Curvas de <i>HRR</i> em função do tempo para o material <i>Plywood</i> , uma amostra com o tratamento de retardante de chamas (<i>FRT treated</i>) e outra sem o tratamento (<i>Untreated</i>), [42].	34
Figura 20 Nível macro (a) e sub-macro da madeira (b), [53].	37

Figura 21 Divisão do tronco de um árvore, [17].	38
Figura 22 Nível micro estrutural da parede celular e suas direções, [53].	38
Figura 23 Nível sub-micro da madeira, [53].	39
Figura 24 Curva termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) da madeira de <i>Cenostigma macrophyllum</i> e da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp, [55].	40
Figura 25. Representação dos estados da água na estrutura celular da madeira, a ação da água vinculada (<i>bound water</i>) e da água livre (<i>free water</i>). [57]	42
Figura 26. Máxima tensão de compressão (N/mm ²) em função do teor de umidade (%). Destaca-se a ação da água vinculada (<i>bound water</i>) e da água livre (<i>free water</i>), [57].	43
Figura 27 Gradiente do Teor de água, [58].	44
Figura 28. Curva típica da relação Umidade Relativa (<i>Relative humidity</i>) com o Teor de Umidade presente na madeira (<i>Moisture Content</i>), todos em porcentagem, [38].	45
Figura 29 Valores do Teor de Umidade na madeira em relação a Umidade Relativa do ar e a temperatura, [38].	46
Figura 30 Madeira conífera envelhecida naturalmente.	48
Figura 31 Exemplo de <i>Lk</i> , projeto de experimento Fracionado Completo. [69].	53
Figura 32 Exemplo do método Fracionado Fatorial. [69]	53
Figura 33 Representação gráfica das combinações dos fatores realizada de acordo com...	56
Figura 34 Amostras de OSB3 utilizadas para o teste de secagem.	59
Figura 35 Amostras de GL utilizadas para o teste de secagem.	59
Figura 36 Amostras de CLT utilizadas para o teste de secagem.	59
Figura 37. Forno, dessecador e balança analítica utilizados.	60
Figura 38 Amostras de CLT antes de receberem o tratamento com o verniz.	61
Figura 39 Amostras de GL antes de receberem o tratamento com o verniz.	61
Figura 40 Amostras de OSB antes de receberem o tratamento com o verniz.	62
Figura 41 Verniz ignífugo utilizado, à esquerda, e o calibre de 1 [mm] utilizada, à direita.	62
Figura 42 Materiais utilizados para a passagem de veriz.	63
Figura 43 Exemplo de amostras com o verniz ainda molhado, à esquerda, e seco, à direita.	63

Figura 44 Resultados da espessura de 1 [mm] nos materiais.	64
Figura 45 Combinações realizadas neste trabalho.	65
Figura 46 Os valores possíveis de temperatura e umidade relativa do ar para a ACS DM600 da Discovery [71].....	66
Figura 47 Os valores possíveis de umidade relativa do ar e temperatura para a HCP 108 da Memmert, [72].....	66
Figura 48 Câmara Climática, HCP 108 da Memmert, utilizada a esquerda. Câmara Climática, DM600 da Discovery, utilizada a direita.	66
Figura 49 Exemplo de amostras preparadas para o Envelhecimento Acelerado.	68
Figura 50 Exemplo das amostras de OSB utilizada no Envelhecimento Acelerado.....	68
Figura 51 Exemplo das amostras de CLT utilizada no Envelhecimento Acelerado.....	68
Figura 52 Amostras dentro da câmara DM600 da Discovery.....	69
Figura 53 Amostras dentro da câmara HCP 108 da Memmert.....	69
Figura 54 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 1.....	70
Figura 55 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 8.....	70
Figura 56 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 6.....	70
Figura 57 Equipamento Calorímetro de Cone utilizado nos ensaios.	73
Figura 58 Amostras de Glulam, CLT e OSB, respectivamente, ensaiadas no Calorímetro de Cone.....	74
Figura 59 Etapas da amostra no teste de Calorímetro de Cone.....	77
Figura 60 Desenho esquemático do material com retardante na porta amostra durante o ensaio.....	77
Figura 61 Desenho esquemático do material sem tratamento ou com Envelhecimento Acelerado, na porta amostra durante o ensaio.....	78
Figura 62 Taxa de Libertação de Calor das amostras de Glulam sem e com retardante.	80
Figura 63 Taxa de Libertação de Calor das amostras de CLT sem e com retardante.	80
Figura 64 Taxa de Libertação de Calor das amostras de OSB com e sem retardante.....	81
Figura 65 Calor Total Libertado (THR) das amostras de OSB sem e com retardante.....	81
Figura 66 Fração de perda de massa das amostras de OSB sem e com retardante.	82

Figura 67 Taxa de Libertação de Calor das amostras de CLT sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 1.	84
Figura 68 Taxa de Libertação de Calor das amostras de GL sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 6.	85
Figura 69 Taxa de Libertação de Calor das amostras de OSB sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 8.	85
Figura 70 Calor Total Libertado do OSB sem envelhecimento e com envelhecimento pela combinação 6.	86
Figura 71 Taxa de Libertação de Calor do Glulam sem tratamento.....	97
Figura 72 Taxa de Libertação de Calor do Glulam com retardante.	97
Figura 73 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 1.....	98
Figura 74 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 6.....	98
Figura 75 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 8.....	98
Figura 76 Taxa de Libertação de Calor do CLT sem tratamento.	99
Figura 77 Taxa de Libertação de Calor do CLT com retardante.....	99
Figura 78 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 1.....	100
Figura 79 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 6.....	100
Figura 80 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 8.....	100
Figura 81 Taxa de Libertação de Calor do OSB sem tratamento.....	101
Figura 82 Taxa de Libertação de Calor do OSB com retardante.	101
Figura 83 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 1.....	102
Figura 84 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 6.....	102
Figura 85 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 8.....	102
Figura 86 Calor Total Liberado do Glulam sem tratamento.	103
Figura 87 Calor Total Liberado do Glulam com retardante.	103
Figura 88 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 1.	104
Figura 89 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 6.	104
Figura 90 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 8.	104
Figura 91 Calor Total Liberado do CLT sem tratamento.....	105

Figura 92 Calor Total Liberado do CLT com retardante.	105
Figura 93 Calor Total Liberado do CLT após combinação 1.	106
Figura 94 Calor Total Liberado do CLT após combinação 6.	106
Figura 95 Calor Total Liberado do CLT após combinação 8.	106
Figura 96 Calor Total Liberado do OSB sem tratamento.	107
Figura 97 Calor Total Liberado do OSB com retardante.	107
Figura 98 Calor Total Liberado do OSB após combinação 1.	108
Figura 99 Calor Total Liberado do OSB após combinação 6.	108
Figura 100 Calor Total Liberado do OSB após combinação 8.	108
Figura 101 Perda de Massa do Glulam sem tratamento.	109
Figura 102 Perda de Massa do Glulam com retardante.	109
Figura 103 Perda de Massa do Glulam após combinação 1.	110
Figura 104 Perda de Massa do Glulam após combinação 6.	110
Figura 105 Perda de Massa do Glulam após combinação 8.	110
Figura 106 Perda de Massa do CLT sem tratamento.	111
Figura 107 Perda de Massa do CLT com retardante.	111
Figura 108 Perda de Massa do CLT após combinação 1.	112
Figura 109 Perda de Massa do CLT após combinação 6.	112
Figura 110 Perda de Massa do CLT após combinação 8.	112
Figura 111 Perda de Massa do OSB sem tratamento.	113
Figura 112 Perda de Massa do OSB com retardante.	113
Figura 113 Perda de Massa do OSB após combinação 1.	114
Figura 114 Perda de Massa do OSB após combinação 6.	114
Figura 115 Perda de Massa do OSB após combinação 8.	114

Lista de tabelas

Tabela 1 Requerimentos para a classe de Durabilidade da Reação ao Fogo (DRF) para produtos de madeira com retardantes ao fogo em aplicações finais em ambientes interiores e exteriores.[2]	5
Tabela 2 Classes de uso de acordo com a EN 335/2013, [36].....	25
Tabela 3 Classes de serviço de acordo com Eurocódigo 5-1-1/2004, [37].	26
Tabela 4 Variáveis e níveis do experimento escolhidos para aplicar ao método Fracionado Fatorial.....	54
Tabela 5 Combinações realizadas pelos princípios do Projeto de Experimentos.....	55
Tabela 6 Comparação entre os métodos de envelhecimento artificial.	57
Tabela 7 Resultados do Teste de Secagem.....	60
Tabela 8 Descrição da nomenclatura utilizada nas amostras	61
Tabela 9 Combinações realizadas.....	64
Tabela 10 Caracterização das amostras de Glulam utilizadas no Envelhecimento Acelerado.....	67
Tabela 11 Caracterização das amostras de CLT utilizadas no Envelhecimento Acelerado.	67
Tabela 12 Caracterização das amostras de OSB utilizadas no Envelhecimento Acelerado.	67
Tabela 13 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 1.....	71
Tabela 14 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 8.....	71
Tabela 15 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 6.....	71
Tabela 16 Teor de umidade efetivo nas amostras durante o envelhecimento acelerado.	72
Tabela 17 Caracterização das amostras de Glulam usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.....	75

Tabela 18 Caracterização das amostras de CLT usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.....	75
Tabela 19 Caracterização das amostras de OSB usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.....	76
Tabela 20 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de Glulam, sem e com retardante.....	78
Tabela 21 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de CLT, sem e com retardante.....	79
Tabela 22 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de OSB, sem e com retardante.....	79
Tabela 23 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de GL, sem e com Envelhecimento Acelerado.....	82
Tabela 24 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de CLT, sem e com Envelhecimento Acelerado.....	83
Tabela 25 Resultado do Tempo de ignição, <i>HRR</i> _{máx} , <i>THR</i> _{máx} e Perda de Massa das amostras de OSB, sem e com Envelhecimento Acelerado.....	83

Nomenclatura

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

A	Fator pré-exponencial ligado à característica do material
L	Número de níveis
M	Teor de Umidade da madeira
R	Constante de gás universal
T	Temperatura
T_m	Temperatura limite para o bom funcionamento do material
U_0	Energia de ativação para a reação
W	Teor de umidade do material
W_e	Umidade efetiva
W_m	Teor de umidade limite para o bom funcionamento do material

Letras minúsculas do alfabeto latino

h	Umidade relativa do ar
k	Número de variáveis
k_{ARR}	Taxa de Reação de <i>Arrhenius</i>
m_1	Massa da madeira úmida
m_2	Massa da madeira seca
t	Tempo de exposição do material;
q	Fluxo de calor

Letras maiúsculas do alfabeto grego

Letras minúsculas do alfabeto grego

α	Fator que considera o impacto da umidade na durabilidade do material
γ	Coefficiente de transformação do estresse mecânico em energia
σ	Carga
τ	Durabilidade do material após envelhecimento acelerado
τ_m	Durabilidade mínima esperada do material
ω	Teor de Umidade da madeira no ensaio

Siglas

<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>CLT</i>	<i>Cross Laminated Timber</i>
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>DRF</i>	Durabilidade da Reação ao Fogo
<i>DOE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>EN</i>	<i>European Normalization</i>
<i>FRT</i>	<i>Fire Retardant Treatment</i>
<i>GL</i>	Glulam
<i>HRR</i>	<i>Heat Release Rate</i>
<i>IARC</i>	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
<i>LOI</i>	Índice de Oxigênio Limitante
<i>LVL</i>	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>MEV</i>	Microscopia Eletrônica de Varredura

<i>MLC</i>	Madeira Laminada Colada
<i>MLCC</i>	Madeira Laminada Colada Cruzada
<i>MUF</i>	Melamina Ureia-Formaldeído
<i>ML</i>	Perda de Massa
<i>OSB</i>	<i>Oriented Strand Board</i>
<i>PRF</i>	Fenol Resorcinol Formaldeído
<i>PUR</i>	Poliuretano
<i>PDM</i>	Painéis Derivados de Madeira
<i>pH</i>	Potencial Hidrogeniônico
<i>SBI</i>	<i>Single Burning Item Test</i>
<i>SCIE</i>	Segurança Contra Incêndio em Edifícios
<i>SRR</i>	Taxa de Libertação de Fumaça
<i>TLC</i>	Taxa de libertação de calor
<i>TTS</i>	<i>Time and Temperature Superposition</i>
<i>TTMS</i>	<i>Time Temperature and Moisture Superposition</i>
<i>THR</i>	Calor Total Libertado
<i>T_{ing}</i>	Tempo de ignição
<i>UF</i>	Ureia Formaldeído
<i>UR</i>	Umidade Relativa
<i>UV</i>	Ultravioleta

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

Nos últimos anos ocorre um crescente interesse em ampliar o conhecimento a respeito de prevenção de incêndio em edificações, isso devido ao grande risco a vida humana e aos patrimônios que esses eventos causam. Visto isso, pesquisas sobre o uso da madeira na Construção Civil e sua reação ao fogo se faz necessária. Normas e leis foram e continuam a ser estabelecidas a fim de evitar maiores danos as pessoas e as estruturas, como por exemplo, o Eurocodigo 2-1-2.

A madeira se destaca como um material sustentável e renovável, e torna-se alvo de arquitetos e engenheiros para inovação atualmente. Este material possui boas qualidades quando se refere ao seu desempenho estrutural e térmico-acústico, além da beleza e conforto estético. A respeito de como comporta-se ao fogo, há preconceitos por se tratar de um material combustível, entretanto ela possui uma reação ao fogo chamada carbonização, resultado da pirólise, em que a madeira entra em combustão em uma camada externa e protege a camada interna do fogo, assim mantém suas características e resistência na parte central da seção. Além disso, foram desenvolvidos painéis a base de madeira com produtos ignífugos incrementados a eles, além de tintas e vernizes que reduz a transmissão de calor por meio do material, [1].

A respeito de construções que se utiliza produtos feitos com madeira, sendo estes estruturais ou de revestimento, há cuidados específicos para assegurar o correto desempenho deles quando expostos ao fogo. Para tal, em 2017 a Comissão Europeia de Normatização publicou a EN 16755, que determina as diretrizes para classificação dos produtos feitos com material de madeira para aplicações em ambientes internos e externos, em como comporta-se à reação ao fogo e sua durabilidade.[2]

Tabela 1 Requerimentos para a classe de Durabilidade da Reação ao Fogo (DRF) para produtos de madeira com retardantes ao fogo em aplicações finais em ambientes interiores e exteriores.[2]

Classe DRF		Requisitos de Fogo existentes	Requisitos adicionais de desempenho em diferentes usos finais de produtos de madeira retardantes de fogo	
	Uso pretendido	Classe de reação ao fogo inicial	Propriedades higroscópicas	Desempenho da reação ao fogo após exposição climática
INT1	Aplicação em interiores secos	Classe ao fogo relevante		-
INT2	Aplicação em interiores úmidos	Classe ao fogo relevante	Teor de umidade < 28% Sem exsudação de líquido Mínimo de sal visível sem aumento na superfície	-
EXT	Aplicações exteriores	Classe ao fogo relevante	Teor de umidade < 28% Sem exsudação de líquido Mínimo de sal visível sem aumento na superfície	Manter reação ao fogo com o desempenho considerado ^{1,2} Envelhecimento acelerado ou Envelhecimento natural Aplicação de manutenção específica pode ser incluída

¹ Classificação de acordo com a EN 13501-1 deve ser usada. No mínimo a mesma classificação inicial é requerida.

² Critério para o Teste de Reação ao Fogo de pequena escala, de acordo com EN 13501-1.

Ao utilizar os produtos nas edificações, é necessário pensar em qual classificação ele se encontra e seu desempenho em situação de incêndio, que deve ser garantido pelo fornecedor de tais produtos. Entretanto, com o passar do tempo, através de seu envelhecimento natural, deve-se garantir que ainda possuem as mesmas classificações quando ainda aplicados, ou no mínimo a classificação exigente na norma para tal fim, porém tal exigência em relação a durabilidade encontra-se na EN 16755/2017, Tabela 1, apenas para ambientes externos, onde indica quais testes e resultados devem ser esperados após a exposição climática, mas, o que deve ser feito em ambientes internos não é exposto, como demonstrado acima na Tabela 1. Contudo, existe a necessidade de conhecer o comportamento

dos materiais ao fogo, ao longo do tempo, expostos em ambientes internos, pois os mesmos estão propícios a variações de temperatura e umidade relativa, o que com o passar dos anos, pode causar sua degradação e então, perda da função inicial projetada, [2].

1.2. Revisão do Estado da Arte

Ao longo dos anos, os estudos e pesquisas a respeito da madeira, tratada ou não, com retardantes de fogo, vem se desenvolvendo, ampliando o conhecimento desse comportamento, trazendo inovação na construção civil e na engenharia de proteção contra incêndio. Segue-se um breve relato de alguns destes.

Em 2001, B. Östman *et al.* sabendo a importância de conhecer a durabilidade dos retardantes ao fogo na madeira e a ausência de estudos aprofundados na Europa, realizaram uma revisão literária analisando o conhecimento e experiência sobre o assunto dos EUA, principalmente os impregnados a pressão em ambientes externos, com o objetivo de incentivar o crescimento da pesquisa. No trabalho, os autores citam que alguns laboratórios especiais de testes e procedimentos para a durabilidade dos tratamentos retardantes ao fogo em madeira, têm sido desenvolvidos no Estados Unidos desde a década de 1960, disponíveis na *American Society* para testes e materiais. Na revisão, foi analisado o comportamento químico dos retardantes, os métodos de aceleradores artificiais usados pelos autores pesquisados, para caracterizar a durabilidade, assim como os outros experimentos que eles realizaram e seus resultados. [De acordo com os autores, os retardantes ao fogo não apresentam o mesmo desempenho ao longo dos anos, após expostos ao clima, do que quando aplicados, sendo assim necessário a realização de testes e pesquisas sobre sua durabilidade, [3].

Em 2006, B. Östman *et al.*, fizeram uma exposição a respeito da então nova norma de classificação da reação ao fogo dos produtos de madeira. Os produtos testados para o sistema de classificação são painéis à base de madeira, madeira estrutural, madeira laminada colada, revestimento madeira maciça e revestimento de painéis de madeira. Também o sistema é dividido em 2 grupos conforme a aplicação: todos exceto para pavimentos e de pavimentos. O estudo leva em consideração as propriedades da madeira, como espessura, densidade, juntas e outros. Os testes realizados para classificação dos produtos foram, Teste de chamas (*Small Flame Test*, EN ISO 11925-2/2002), Teste de um item único em combustão (*Single Burning Item Test*, SBI EN 13823/2002) e Teste de painel radiante para pavimentos (*Radiant Panel Test*, EN ISO 9239-1/2002), Figura 1. Mais de cem produtos foram analisados e

classificados. Em geral, os produtos de madeira se classificam em D-s2, d0 ou Dfl-s1 (para pavimentos). Assim, tabelas de classificação da reação ao fogo dos produtos foram desenvolvidas, respeitando suas aplicações finais, [4].

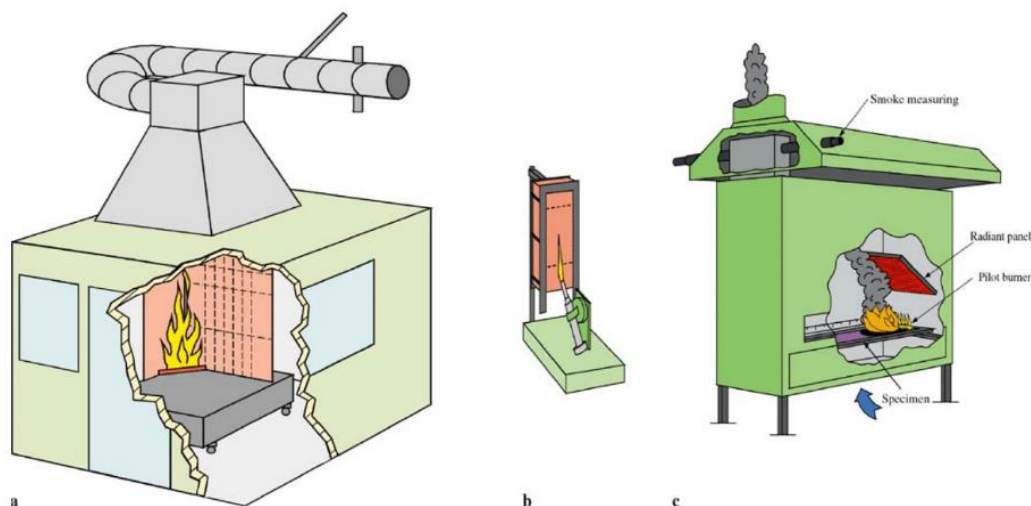


Figura 1 **a** Teste de um item único em combustão; **b** Teste de chamas; **c** Teste de painel radiante para pavimentos, [4].

Em 2009, M. García *et al* realizaram um estudo a respeito de compostos de madeira-plástico com melhores retardadores ao fogo e comportamento a durabilidade. Com o intuito de desenvolver um material economicamente competitivo para a construção civil, eles observaram que a introdução de fibras de madeira no plástico, o material apresenta melhor isolamento termo acústico, resistência e menor manutenção que a madeira, em um preço menor que os plásticos puros. Porém seu ponto fraco é a exposição externa, ao clima devido a exposição ao UV e também a exposição ao fogo, sendo a pesquisa focada em encontrar uma melhor solução para esses fatores. Após realizarem os testes de aceleração artificial, obtiveram que, para as intempéries, o melhor resultado foi com o desenvolvimento de estabilizadores de luz não pigmentados, e para o comportamento ao fogo, foram obtidos pela adição de compostos a base de fósforo, hidróxido e melamina, [5].

Em 2013, B. Östman *et al* analisaram o comportamento ao fogo de várias fachadas em madeira. Realizaram testes com a utilização de *Sprinklers*, demonstrando a importância de seu uso para auxiliar o desempenho ao fogo das fachadas de madeira tratadas ou não com retardadores, sendo que as tratadas, mesmo parcialmente, apresentam melhor

comportamento do que as não tratadas. Um dos testes utilizados para avaliar o comportamento ao fogo foi o *SP Fire 105*, em grande escala para avaliar a propagação da chama. Concluiu-se que a quantidade de produtos químicos dos retardadores são essências para cumprir com os critérios de prevenção de incêndio, também que apenas alguns tratamentos com retardantes são capazes de manter as propriedades ao fogo ao longo do tempo, sendo uma camada protetora necessária, e que impeditores de incêndio nas cavidades das fachadas são necessários para evitar a propagação da chama, [6].

Após, em 2014, B. Östman *et al.* publicaram um trabalho sobre a capacidade de proteção a incêndios das coberturas de madeira, analisando a resistência que esses materiais apresentaram após expostos ao fogo. Para tal utilizaram a EN 13501-2, que classifica os produtos de madeira em função do seu desempenho de resistência ao fogo, chamada classificação K. Os testes foram feitos em forno de escala real, de acordo com a EN 14135, com os materiais: painéis de madeira, painéis de partículas, compensados, OSB e madeira maciça, principalmente para fins de revestimento de teto e paredes. Foi avaliado qual parâmetro, espessura ou densidade, é mais significativo para a resistência dos produtos em situação de incêndio. Os autores concluíram que a densidade tem um papel pouco significativo nesse aspecto, sendo assim, a espessura do elemento da madeira maciça ou painel de madeira é relevante para a resistência ao fogo. Através do resultado dos testes encontraram as espessuras de cada material mínimas para suportarem o fogo em determinado tempo e em qual classificação K elas se encontram, [7].

Em 2015, N. Bal analisou os últimos 40 anos de estudo a respeito da inflamabilidade do material, avaliando seu papel, os testes de determinação e modelagem. A inflamabilidade é uma propriedade do material trivial para a análise de segurança contra incêndio nos materiais utilizados na construção civil. Segundo o autor, esse conceito evoluiu durante esse período, assim como em seu desenvolvimento experimental e numérico. Apesar disso, ainda há grandes incertezas no ramo. A taxa de liberação de calor (HRR), principal parâmetro para o estudo, ainda é provavelmente a “propriedade ao fogo” com maior incerteza. De acordo com o estudo, isso se dá devido ao fato de os modelos de testes experimentais e numéricos mais utilizados terem dificuldades em estimar com maior precisão a propriedade estudada. Sendo assim, é mencionada a importância dos profissionais, quer engenheiros, quer autoridades com jurisdição, terem ciência que as conclusões a respeito do nível de segurança contra incêndio encontradas, é limitada pela incerteza global que os ensaios e resultados nas modelagens e caracterizações experimentais ao comportamento ao fogo do material

apresentam, assumindo com a apropriada sensatez os riscos. O pesquisador complementa que, mesmo com tais dificuldades, é necessário progredir a inovação e construção civil, e ainda sugere uma padronização de uma metodologia para avaliar a incerteza da inflamabilidade do material, isso não fará uma caracterização de um nível de segurança absoluto, mas, pode melhorar a caracterização do fator de segurança relativo, [8].

Em 2016, M. Giraldo *et al.* pesquisaram sobre o comportamento ao fogo de espécies de madeiras tropicais para o uso na indústria da construção. De acordo com os pesquisadores, as madeiras de lei (madeiras folhosas) tendem a ter um melhor comportamento ao fogo em comparação com as madeiras coníferas, isto devido à sua estrutura física, densidade e também seu teor de umidade. Mas em alguns casos a composição química da madeira pode ser mais relevante. Para os ensaios, as madeiras utilizadas foram sete espécies comuns no México e com morfologia bem diferentes. Os testes realizados para avaliar melhor a reação ao fogo das madeiras utilizadas foram: Análise térmica, Teste Limitando o índice de oxigênio (LOI), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e o Teste de inflamabilidade. Os resultados foram interessantes, pois mostraram que a densidade da madeira é, de fato, um fator importante para um bom desempenho ao fogo, como se espera, porém, em algumas espécies do material estudado, a composição, o conteúdo de minerais e a morfologia podem exercer mais influência. Também, com o aumento da densidade juntamente com as diferenças nos constituintes inorgânico, está relacionado o atraso na ignição, o que pode afetar, de maneira significativa, o processo de combustão da madeira. Sendo assim, na análise do comportamento ao incêndio na madeira, é importante ter atenção na estrutura química da espécie utilizada, além dos parâmetros mais comuns ao seu estudo, [9].

Em 2016, J. C. Elvira-Léon *et al.* realizaram testes para avaliar o comportamento da Epsomite como um retardador de chamas para madeira. Epsomite é um sal de sulfato hidratado com uma alta solubilidade em água à temperatura ambiente. Para comparar o comportamento do novo retardador, foi utilizado também outro comercialmente mais aceito, o retardador a base de sal do boro. Os dois foram introduzidos nas amostras de madeira por impregnação à vácuo. As madeiras utilizadas foram duas espécies: *Pinus Sylvestris L.* (pinheiros silvestres) e *Pinus Nigra* (Pinheiro-preto). Para analisar o comportamento ao fogo das amostras foi utilizado três testes: teste de gotejamento, índice de oxigênio limitante (LOI) e o teste de Bunsen. Os autores, através dos resultados, chegaram à conclusão que o efeito da Epsomite é satisfatório, pois aumenta o índice de oxigênio limitante, que atrasa o tempo de ignição da chama, a evolução das temperaturas na madeira quando exposta ao

incêndio, auxiliando o processo de carbonização. É importante ressaltar que nesse trabalho não foi investigado a durabilidade desse retardador em seu comportamento ao fogo após as intempéries, [10].

Em 2016, S. Vallerent, et al. em uma conferência na Suécia, fizeram um relatório sobre as principais pesquisas nos últimos dez anos, analisando a durabilidade do comportamento a reação ao fogo para produtos de madeira tratados com retardante de fogo (*Fire Retardant Treatment - FRT*) em ambientes externos. De acordo com os pesquisadores, dois riscos da durabilidade do tratamento retardador podem ser identificados, o primeiro trata-se das propriedades higroscópicas da madeira, com o risco de mudança do alto teor de umidade e migração dos produtos químicos retardadores de fogo dentro do produto de madeira além da cristalização de sal na superfície do produto. O segundo risco é de redução no desempenho ao fogo devido à perda de produtos químicos dos retardadores de fogo, isso devido a lixiviação ou outros mecanismos, que pode ocorrer principalmente quando aplicado em ambientes externos, pela exposição as intempéries. Para avaliar a durabilidade, foi utilizado o método A e método B de aceleração artificial, de acordo com a NT *Fire* 053, e outras amostras com o envelhecimento natural de 10 anos, Figura 2. Estas amostras foram realizadas com painéis de madeira, tanto na vertical, 90°, quanto no plano de 45° voltados para o sul, em Estocolmo, na Suécia. Foram utilizadas madeiras sem e com o tratamento com retardantes, tanto produtos com os agentes retardantes em sua composição quanto painéis cobertos com camadas de tintas ignífugas. Também foi analisado a perda de massa ao longo do tempo, o que se mostrou como um indicador do desempenho a reação ao fogo. As conclusões obtidas da pesquisa foram: de fato o sistema europeu desenvolvido para avaliar o desempenho da durabilidade da reação ao fogo dos retardadores em ambientes úmidos e externos, fornece um bom embasamento para garantir a segurança dos produtos de madeira em situação de incêndio; as propriedades higroscópicas da madeira tratada e não tratada, ao longo do tempo, permanecem com poucas alterações; é possível manter o bom desempenho dos FRT ao longo do tempo, se os níveis de retenção do produto forem altos o suficiente, mas na maior parte das amostras, a durabilidade do comportamento a reação ao fogo, diante do intemperismo (artificial e natural), não foram satisfatórias para os produtos e condições usados; e por fim, que é necessário maior experiência entre a relação de testes de campo natural e métodos de envelhecimento acelerado, [11].



Figura 2 Teste de envelhecimento natural em Estocolmo, [11].

Em 2017, B. Östman *et al.* publicaram uma revisão de literatura a respeito dos principais desafios e oportunidades para o uso da madeira em edifícios, com a adequada segurança contra incêndio. Os autores buscaram possíveis soluções para reduzir os obstáculos ainda existentes ao comércio dentro da Europa, e para facilitar também, um mercado mais globalizado, disseminando o uso da madeira na construção civil, inclusive em edifícios, visto que é um material sustentável. As conclusões mais importantes que chegaram foi: garantir a qualidade na construção e inspeção da segurança contra incêndios durante a construção, sendo que o detalhamento do projeto é um dos principais desafios para a segurança contra incêndio; desenvolver estratégias para prevenção da perda de propriedade, em relações a outros tipos de edifícios; controlar as estratégias para evitar o colapso da estrutura quando exposta ao incêndio, caso esse não seja extinto pelos bombeiros ou por um sistema ativo. Com esse estudo, é possível perceber que durante a história de pesquisa sobre o uso da madeira como material de construção foi evoluindo, chegando, nesse momento, ao desejo de construir edifícios com o material, devido suas excelentes qualidades estruturais e acústicas, necessitando então, cada vez mais do avanço ao conhecimento do comportamento

da madeira quando exposta ao fogo, assim como um estudo mais detalhado, para um projeto mais completo e seguro. Vê-se então, mais uma vez, a importância desta abordagem, [12].

Em 2018, B. Östman *et al.* Realizaram uma pesquisa a respeito do Projeto de Prevenção de Incêndio do CLT na Europa. Os requisitos para o projeto de segurança contra incêndio são redigidos pelo Regulamento de Produtos de Construção, além de ter que cumprir com os pré-requisitos do Eurocodigo 5. A classificação do CLT quanto ao seu desempenho na reação ao fogo é especificada e é possível atingir classes mais altas com o tratamento químico, mas deve-se assegurar a sua durabilidade. Em relação ao comportamento ao fogo, o material é feito para cumprir os requisitos de classificação D-s2, d0 ou Dfl-s1 para pisos. Através dos testes e experimentos realizados nos últimos anos que os autores observaram, puderam concluir que, para avaliar a capacidade de carga do material, pode-se seguir o modelo para elementos estruturais de madeira, contido no Eurocodigo 5, podendo determinar assim a seção residual, Figura 3, levando em consideração possíveis as camadas carbonizadas do CLT quando no incêndio. Entretanto, no caso dos painéis protegidos com gesso, a norma europeia se torna muito conservadora. Também foi concluído que, quanto maior a área de CLT exposta ao fogo, menor a espessura de carbonização. Foi destacado a importância de desenvolver pesquisas sobre a camada de resistência zero, citado no Eurocodigo 5, assim como mais estudos sobre as articulações, conexões e instalações de serviço. A respeito da durabilidade ao comportamento ao fogo do CLT, cita-se que deve cumprir com o estabelecido na EN 16755/2017, [13].

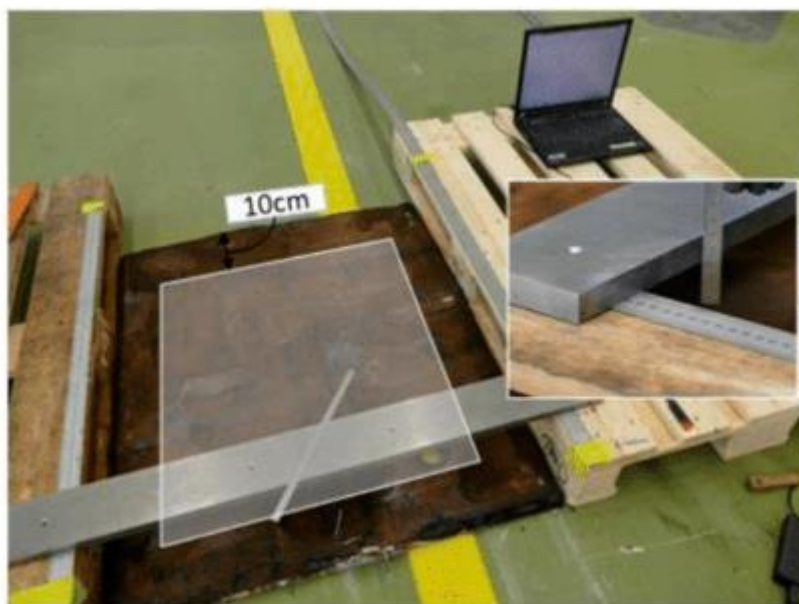


Figura 3 Medindo a seção residual do CLT, [13].

Ainda em 2018, F. Richter *et al.* percebendo o crescimento do interesse em se construir edifícios de madeira e as restrições na regulamentação para tal, devido ao pouco conhecimento do seu comportamento ao fogo, realizaram um estudo sobre o efeito da composição química na carbonização da madeira. Esse comportamento e a perda da capacidade da madeira são controlados pela carbonização, entretanto a cinética química pouco foi estudada. Usando dois modelos, em microescala e em mesoescala, analisou-se os componentes celulose, hemiceluloses e lignina. Para a escolha das madeiras, foi copilado um banco de dados com mais 600 combinações, simulando assim diversas espécies. Todos os parâmetros cinéticos, reações e propriedades físicas foram retirados da literatura. Com as simulações, provou-se que, a variação da cinética tem influência insignificante em relação ao aumento da temperatura no material. Sendo assim, esse estudo comprova que, um modelo cinético de carbonização de uma espécie de madeira, é de fato, válida para todas as outras, tanto madeira macia, como madeira dura. Os autores sugerem que, durante a modelagem para futuros estudos, seja analisado diferentes propriedades físicas e não cinética, devido sua fraca influência com variação de temperatura, [14]

1.3. Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo observar como a madeira tratada ou não com retardantes ao fogo se comporta, quanto à exposição ao incêndio, e após estar envelhecida artificialmente. Para tal pretende-se utilizar *Cross Laminated Timber* (CLT), e Glulam (Glued-Laminated), como exemplos de madeira maciça e *Oriented Strand Board* (OSB), como modelo de um painel derivado da madeira. As amostras sem retardantes serão submetidas a diferentes temperaturas, teores de umidade e tempo de forma a provocar o estresse em sua estrutura químico-física, e assim simular seu envelhecimento natural de maneira artificial e acelerada adequado a ambientes internos. Como complemento, outras amostras de cada material serão tratadas com um verniz ignífugo. Após será realizado o teste de calorímetro de cone para avaliação da reação ao fogo. Estes resultados serão utilizados como parâmetros de input num modelo de previsão a desenvolver. A partir destes resultados, pretende-se diagnosticar e prever a durabilidade da reação ao fogo da madeira e dos painéis derivados de madeira com retardantes de chama, em ambientes internos.

1.4. Organização da tese

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. No capítulo 1 está presente a introdução ao tema que está sendo abordado, a revisão do estado da arte sobre o assunto, assim como os objetivos e organização da tese.

No capítulo 2, denominado Madeira na Construção Civil, é descrito sua história e seu papel na engenharia civil, sobre a madeira sólida, os painéis derivados de madeira e apresenta-se os materiais utilizados na pesquisa, sua história, processo de fabricação, características e classes de uso.

No capítulo 3, denominado Reação ao Fogo da Madeira, é apresentado os conceitos fundamentais sobre o assunto, as curvas de incêndio padrão, as classificações normativas, e por fim, um breve relato sobre resinas e retardantes de chama.

No capítulo 4, intitulado Durabilidade da Madeira, é abordado o que é durabilidade, os principais fatores que influenciam a durabilidade da madeira, como suas propriedades anisotrópicas, e ainda sobre o conceito e diferenças entre o envelhecimento natural para o artificial.

No capítulo 5, é apresentado o Desenvolvimento do Modelo de Previsão da Durabilidade da Reação ao Fogo. Nele é discutido o que é Modelo de previsão, o desenvolvimento de uma equação para a previsão, e a aplicação do Projeto de Experimentos (*Design of Experiments*), através de um modelo estatístico para o Método de Envelhecimento Acelerado proposto.

No capítulo 6, denominado Avaliação Experimental da Durabilidade da Reação ao Fogo, contém a descrição dos ensaios realizados: a Verificação do Teor de Umidade da madeira, o Envelhecimento Acelerado, a Análise do efeito do Retardante e então, os ensaios no Calorímetro de Cone.

No último capítulo, apresenta-se as Conclusões e propostas de Trabalhos Futuros sobre o tema. E por fim, em Anexo, contém os gráficos com os resultados obtidos.

2. Madeira na Construção Civil

2.1. Madeira como material de construção e seu papel sustentável

A madeira está presente na história da humanidade e da construção desde o início, utilizada de diversas formas como ferramentas, pilares e fonte de calor. Ainda hoje, ela encontra-se em abundância, comumente utilizada desde acabamentos, móveis, até em estruturas de prédios e pontes. Observa-se também que algumas construções antigas que estão em boas condições desse material, como o templo budista Horyu-ji, em Ikaruga na cidade de Nara, no Japão, com três torres, sendo uma delas de 5 andares, construída no ano de 700 d.C., Figura 4. Ainda hoje, 20% de sua estrutura é da madeira original, então intitulada como construção de madeira mais antiga do mundo, [15, 16].



Figura 4 Templo budista Horyu-ji, construção registrada mais antiga de madeira, [16].

Responsável por cerca de 90% das construções habitacionais em países desenvolvidos como Suécia, Noruega, Canadá e Austrália, ela destaca-se por diversas vantagens, inclusive por ser reciclável, reutilizável e biodegradável. Recentemente, o maior prédio construído em estrutura de madeira (com *Cross Laminated Timber*) encontra-se no Canadá, com 18 andares, cerca de 53 metros de altura, na Universidade da Colúmbia Britânica em Vancouver, Figura 5, [17, 18].



Figura 5 *Brock Commons Tallwood House*, em Vancouver, Canadá, [18].

As características mecânicas da madeira a torna ainda mais vantajosa, é um material leve quando em comparação aos tradicionais usados na construção. Entretanto, seu peso específico possui elevada resistência, de forma que, a relação entre a resistência e o peso específico chega a ser superior, por vezes, ao do aço. Para o dimensionamento das estruturas em madeira, é preciso atentar-se a sua anisotropia, pois sua resistência pode variar de acordo com a orientação da ação solicitante relativamente às fibras longitudinais da madeira. Além disso, a madeira transmite um conforto visual, possui um bom isolamento térmico, acústico e elétrico. Em relação ao fogo, ao contrário do senso comum, tem um bom desempenho graças a sua reação de carbonização, discutida na seção 3.1, [19, 20].

Ser sustentável envolve cumprir aspectos ambientais, econômicos, sociais e culturais, de forma a buscar o equilíbrio e a eficiência entres eles. Para os produtos da construção civil, torna-se ainda necessário a busca por materiais de baixo consumo energético, que sejam de fontes renováveis, e não poluentes. Para mais, a durabilidade destes

materiais é relevante, pois quanto maior seu ciclo de vida, menor a procura por novos e consequentemente, reduz o impacto ambiental, [17].

Nesses aspectos, a madeira apresenta-se com um bom desempenho sustentável, destacando seu baixo consumo energético e alta durabilidade. Um outro fator sustentável desse material, além dos citados acima, é o fato de consumir dióxido de carbono e liberar oxigênio, e não o contrário como a maioria dos materiais concorrentes na construção. Estima-se que um metro cúbico de madeira pode armazenar cerca de 200 quilos de carbono. Quanto aos receios em relação ao desmatamento florestal, devido à utilização da madeira na construção civil, existem florestas dedicadas a cultivar madeira como material de edificações, as quais seguem a rigor as políticas da indústria florestal, que entre outras, encontra-se a renovação da floresta, como plantar duas árvores após o abatimento de uma. Na Suécia, o número de árvores existentes duplicou em relação ao século passado, pois desde o século XX ela está a aplicar este conceito, [17].

Portanto, o uso da madeira na construção civil traz consigo vantagens e desafios. Neste ramo, encontra-se dois produtos: a madeira sólida e os painéis derivados de madeira. Cada um possui características distintas e devem ser utilizados em funções adequadas a maneira como comporta-se.

2.2. Madeira Sólida

Madeira sólida ou maciça consiste na madeira utilizada como se encontra na natureza, sem modificações em sua estrutura física, como toras, mais aplicadas como vigas e pilares. Há ainda painéis feitos com madeira maciça, como *Glulam*, LVL (*Laminated Veneer Lumber*) e CLT, [21].

Dentro desta categoria em uma análise transversal, tem-se a madeira redonda (em toros a variar de diâmetro entre 0,15m e 0,25m, em geral) e a madeira serrada (em vigas, pranchas, tábuas, etc.). Este grupo de madeiras apresenta o principal inconveniente de estar limitada transversalmente e a nível de comprimento, quando em sua forma original.

O *Glulam*, ou, **Madeira Laminada Colada** (MLC), foi usado pela primeira vez na Europa no início da década de 1890, porém apenas houve uma patente em 1901 da Suíça, que sinalizou o verdadeiro começo da construção de madeira laminada colada. Com a Segunda Guerra Mundial, os adesivos existentes foram aprimorados, o que permitiu o uso do material não só mais como acessório, mas como elemento estrutural, como por exemplo,

a introdução dos adesivos fenol-resorcinol resistentes à água em 1942. Isso permitiu que o glulam fosse usado em ambientes externos, expostos sem preocupação com a degradação da cola como havia antes, ampliando assim, sua industrialização, [22, 23].

O MLC é formado por camadas de laminas de madeira, as quais podem ser feitas de madeira em tamanho real sem juntas, ou articulados a partir de segmentos de madeira de comprimento curto, que assim podem ser limpas de defeitos que afetem a resistência, pois a maioria dos defeitos naturais presentes na madeira são considerados deterioradores mecânicos. Portanto, quando esses defeitos são removidos e a madeira remanescente é reconstruída usando adesivos, o desempenho mecânico do produto laminado está, presumivelmente, em desempenho semelhante ao do membro em tamanho maior, ou ainda, pode estar melhor. As peças de MLC podem ser fabricadas em diversas formas, como uma peça linear ou como uma peça curva, Figura 6. Podem ser usados em edifícios, pontes, viadutos, entre outros, [23].



Figura 6 Shopping Iguatemi, em Fortaleza, Brasil, estrutura em MLC curva, [24].

As fabricas dos elementos de madeira laminada colada com seção transversal retangular devem seguir a norma EN 14080 para confeccionar os elementos. Nesta norma também se encontra as espécies de madeira que devem ser utilizadas, bem como o desempenho esperado do produto final, [21]. Os adesivos sintéticos mais comuns na

indústria de glulam são fenol resorcinol formaldeído (PRF) e poliuretano (PUR), para os elementos de fins estruturais, e ureia formaldeído (UF), para fins não estruturais, [23].

A fabricação do MLC, segue, em geral, o seguinte processo: após a retirada das lamelas de madeira do tronco da árvore, elas são secas dentro de uma faixa de umidade especificada por fornecedores dos adesivos, que podem ser secos ao ar ou secados artificialmente para reduzir o teor de umidade entre 8% e 14%; passa-se por uma avaliação e separação das que apresentam melhor aspecto estrutural, incluindo o corte das partes com defeitos, resultando em lamelas de menor comprimento; são levadas para aplinar as lamelas, o que melhora seu desempenho na próxima fase; inicia-se a colagem com os adesivos, podem ser com pistolas de pulverização ou distribuidor de cola, respeitando as orientações dos fabricantes e levadas a pressão para fixar os elementos até a secagem da cola, a pressão para PRF em espécies locais de madeira dura geralmente é de 1000 - 1400 kPa; deixa-se para cura durante alguns dias; finalmente, o corte dos adesivos em excesso e dos elementos de glulam no formato final desejado. A Figura 7 ilustra o ciclo de produção do glulam descrito, [23].

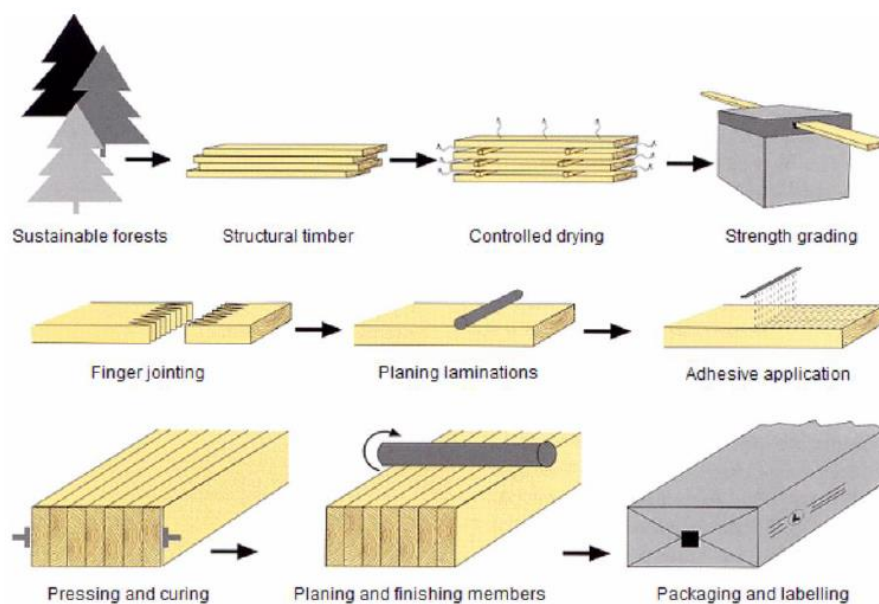


Figure 2: Sketch of the manufacturing process ([8], reproduced in www.glulambeams.co.uk).

Figura 7 Processo de produção do Glulam, [25].

O Glulam utilizado nesta pesquisa tem sua madeira de origem nórdica, o abeto/pinus, com 5 camadas coladas, classificado como GL24, Figura 8, relativo ao seu desempenho mecânico, D-s2,d0 é sua classificação relativa à relação ao fogo, discutida na seção 3.3 deste

trabalho. O adesivo utilizado para colagem de suas camadas é o Melamina Ureia-Formaldeído, com classe de formaldeído E1. Segundo o fabricante, pode ser usado nas classes de uso 1, 2 e 3, com classe de durabilidade 4, [26].



Figura 8 Glulam utilizado nesta pesquisa.

O *Cross-Laminated Timber*, ou **Madeira Laminada Colada Cruzada** (MLCC), foi desenvolvido na Áustria e Alemanha, e em meados de 1990 foi patenteado na Áustria. Contudo, o material só se tornou mais conhecido e utilizado mais de 10 anos depois, principalmente devido ao movimento construções verdes. Hoje já há construções com o material em outros países da Europa, Figura 9, e ainda também no Canadá (exemplificado na Figura 5), Estados Unidos da América e Brasil. Existem muitas vantagens em utilizá-lo na construção, como alta tecnologia na pré-fabricação, o que reduz o nível de desperdício, poluição durante sua fabricação e tempo de montagem no canteiro de obras, e ainda bom desempenho em situação de incêndio e sismos, grande conforto térmico e acústico, [27, 28]. Com esse material é possível obter paredes inteiras, com as aberturas previstas, em uma única peça. Visto que somente após o ano de 2004 houve um rápido crescimento e desenvolvimento do CLT, não há uma seção particular para ele no Eurocodigo 5. Entretanto, em 2015 foi publicado a EN 16351 que define os requerimentos para estruturas de madeira com o CLT [21].



Figura 9 Edifício Multi-familiar em construção situado em Judenburg, Áustria. [27]

O painel de CLT é formado a partir de camadas de tábuas sobrepostas, normalmente essas camadas são em número ímpar, coladas cruzadas uma relação à outra, em 90°. Sua fabricação é semelhante ao MLC, segue, simplificadamente, os seguintes passos: a madeira é serrada em tábuas, depois são selecionadas, agrupadas e planificadas, aplica-se o adesivo entre as camadas de lamelas, sendo elas com uma camada perpendicular a próxima (cruzada), após leva-se a prensa, e então ao corte no formato planejado, Figura 11. Os adesivos mais utilizados são de fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e poliuretano (PUR), [27]. O CLT utilizado nesta pesquisa é o formado por três camadas,

Figura 10, com madeira de origem nórdica.



Figura 10 Material CLT utilizado.



Figura 11 Exemplo de uma parede pré fabricada em CLT, [29].

2.3. Painéis derivados de madeira

A grande variação de comportamento existente entre as espécies de madeira e até mesmo, a cada árvore de mesma espécie, gera dificuldades e incertezas no planeamento do uso do material. Ainda assim, a madeira maciça é um bem valorizado no mercado devido a sua ótima performance, isso alinhado as políticas ambientais, resultaram em aumento dos custos das toras de madeira. Tais fatores deram início a uma investigação para meios de usar as árvores de um modo mais eficiente, com um comportamento mais dominável. Desenvolveu-se então os Painéis Derivados de Madeira (PDM), que podem ser feitos a partir de madeiras mais econômicas e fracas, como por exemplo, troncos torcidos ou restos de serralherias, que após o processo tem sua resistência e durabilidade ampliadas, [30].

Eles podem ser formados a partir de pequenas partículas de madeira, como lascas ou pó, unidos por uma cola (resina), e prensados em placas. As dimensões e materiais usados para tal vão variar com o tipo de painel, hoje encontra-se vários tipos, como: MDF, Plywood, PB e OSB. Portanto, os PDM são uma maneira alternativa com um bom custo-benefício para o uso na construção civil, com propriedades físico-químicas mais controláveis e previsíveis. A EN 13986:2004 define os critérios harmonizados para placas de derivados de madeira utilizados na construção, com as características, avaliação da conformidade e marcação. Para representa-los nesta pesquisa, foi utilizado o modelo de painel OSB, [30-32].

O *Oriented Strand Board* (OSB) foi desenvolvido em 1935, nos Estados Unidos da América, porém iniciou a produção em larga escala em 1963. Na Europa, a primeira produção data-se de 1978 e 35 anos após, a aceitação no mercado já estava completa, o uso do OSB, Figura 12, tornou-se somente inferior ao do MDF. Ainda hoje, os EUA e o Canadá, possuem 85% da produção mundial. A norma europeia que especifica o painel é a EN 300, [30, 33].



Figura 12 Exemplo de aplicação de painéis de OSB, [34].

Os painéis de OSB são feitos a partir de pequenas lamelas de madeira, entre 75 a 150 [mm] de comprimento, 15 a 25 [mm] de largura e 0,3 a 0,7 [mm] de espessura, coladas sob pressão e calor. As lascas de madeira são orientadas aleatoriamente, ou alinhadas em ângulo reto com os fios das camadas da face, Figura 13. As resinas mais comuns utilizadas para colar são Ureia-Formaldeído (UF), Melamina Ureia-Formaldeído (MUF), resinas fenólicas (PF, MUPF) e isocianatos (PMDI). Ele é classificado pela norma em quatro classes: OSB1 é para usos gerais e ambientes internos (secos), o OSB2 é de suporte em condições secas, OSB3 é para estruturas em ambientes úmidos e o OSB4 também para condições úmidas, e com função estrutural. Estima-se que cerca de 75% desses painéis fabricados são usados na construção civil, [30, 33].

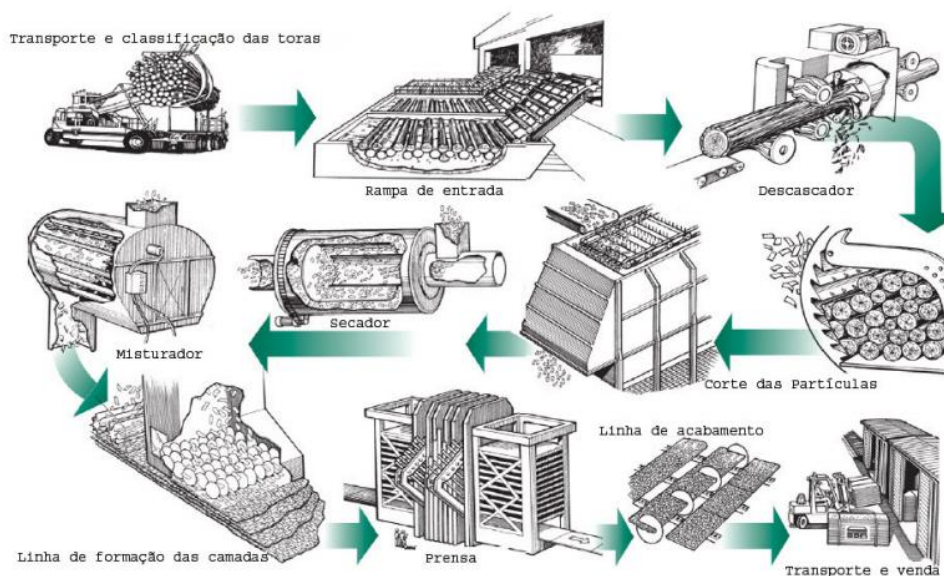


Figura 13 Esquema do processo de produção do OSB, [33].

O OSB utilizado nesta pesquisa é o OSB3 PUR, Figura 14, de 18 [mm] de espessura. O OSB 3, segundo a fabricante, é um painel derivado de madeira que oferece alta resistência, projetado para uso universal com requisitos de carga e estabilidade normais. Ainda de acordo com o fornecedor, para cumprir com os mais exigentes requisitos ambientais, as aparas de madeira do OSB 3 PUR são coladas com resina PMDI (Disocianato de difenilmetano polimérico), adesivo isento de formaldeído e notável pela sua elevada resistência à humidade, [35].



Figura 14 Painel de OSB utilizado nesta pesquisa.

2.4. Classes de uso

A classificação da madeira e produtos à base de madeira, definida pela EN 335/2013, visa separar o material de acordo com a suscetibilidade à biodegradação no ambiente em que ele será exposto. São elas cinco classes, [36]:

Tabela 2 Classes de uso de acordo com a EN 335/2013, [36].

EN 335/2013 – Durabilidade da madeira e produtos à base de madeira	
Classe de uso	Descrição
1	Situações onde a madeira, ou os produtos derivados de madeira, estão aplicados no ambiente interno da construção, sem estar exposto diretamente ao clima e a umidade. Os ataques de fungos e insetos são considerados insignificantes.
2	Neste caso, continuam expostas em um ambiente interno (não diretamente expostas ao clima nem a chuva), entretanto podem ser submetidas a umidade ocasionalmente. Sendo assim a superfície da madeira ou produto derivado da madeira pode permanecer molhado por um curto tempo. Neste caso, ataques de fungos e insetos já são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles dependem da região da construção.
3	A madeira ou o produto à base de madeira está acima do solo e exposto ao clima, principalmente à chuva. Neste caso, ataques de fungos e insetos já são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles também dependem da região da construção. Ela está dividida em duas subclasses: Subclasse 3.1, quando a exposição a água (chuva) é por um curto tempo, sendo que a água não irá acumular. Subclasse 3.2 é para as situações onde o escoamento é lento, sendo a madeira ou o produto à base de madeira submetido a água acumulada por um longo período.
4	A madeira e os produtos derivados da madeira estão em contato direto com o solo e/ou água doce. Ataques de fungos e insetos são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles também dependem da região da construção. Caso esteja completamente submersa no solo e/ou saturadas, o ataque de fungos é desconsiderado, porém é suscetível ao decaimento bacteriano.
5	Situação onde o material encontra-se permanente ou regularmente submerso em água salgada/salobra. Pode ocorrer ataques de fungos e insetos na superfície de contato da água com o ar, mas os principais agentes deterioradores nesta classe são organismos marinhos.

Além da classificação acima existe a classificação de acordo com o Eurocódigo 5-1-1/2004, para construção de estruturas de madeira. Nela existem 3 classes de serviço [37]:

Tabela 3 Classes de serviço de acordo com Eurocódigo 5-1-1/2004, [37].

Eurocódigo 5-1-1/2004 – Projeto de estruturas em madeira	
Classes de serviço	Descrição
1	É caracterizada pelo teor de água do material, correspondente para a temperatura de 20 [°C] e que a Umidade Relativa ao seu redor só exceda a 65 [%] por poucas semanas no ano, de no máximo 12 [%].
2	Por sua vez, é caracterizada pelo teor de água do material, correspondente para a temperatura de 20 [°C] e que a Umidade Relativa ao seu redor só exceda a 85 [%] por poucas semanas no ano, de no máximo 20 [%].
3	Nesta classe, a madeira está exposta a condições climáticas que elevam o teor de umidade além da classe de serviço 2

É importante destacar que, recomenda-se que o teor de água máximo no material seja de 20%. Isso deve-se ao fato de que a probabilidade (para porcentagens acima de 20%) de ocorrência de proliferação de fungos é alta, passa-se então a tratar de problemas como a biodegradação, [36].

3. Reação ao fogo da madeira

O projeto de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE) desempenha um papel de suma importância e para ser eficiente deve conter um planejamento que engloba a prevenção, contenção, detecção e evacuação no edifício. Na prevenção, o projeto ocupa-se de evitar a ignição dos materiais combustíveis, através do controle da fonte de calor no ambiente e dos materiais utilizados no edifício. A contenção ocupa-se em evitar a propagação, caso haja o início do incêndio. A detecção também exerce um papel significativo, pois quanto mais rápido o fogo for detectado, maiores consequências podem ser evitadas, além de proporcionar que as pessoas deixem o ambiente o mais rápido possível, por isso também, o projeto de evacuação em caso de emergência, da edificação, tem um papel igualmente importante, [38].

Para integrar a fase de prevenção, a União Europeia formulou em 2007 a norma EN 13501-1, que nivelou as classificações de desempenho ao fogo dos produtos e elementos para construção civil, entre os países da união, que permite fabricantes produzir ou importar produtos, com a garantia de um determinado desempenho, através dos testes de reação ao fogo, [39].

Em 2008, em Portugal, o Ministério da Administração Interna aprovou o Decreto-Lei n°220 que contém o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios, com disposições técnicas gerais e específicas de SCIE referentes às condições exteriores comuns, às condições de comportamento ao fogo, isolamento e proteção, evacuação, instalações técnicas, equipamentos, sistemas de segurança e às condições de autoproteção do edifício, [40].

Além desta, em 2017, foi publicada a norma EN 16755, como referido na seção 1.1 deste trabalho, que define critérios para a análise da durabilidade da classificação desses materiais, com aplicações em ambientes internos e externos. Portanto, não só classificar, como construir corretamente e garantir a durabilidade dos produtos é de fato necessário para o Projeto de Segurança Contra Incêndio nos Edifícios, [2].

3.1. Conceitos fundamentais

A **Pirólise** é um processo químico de decomposição da matéria orgânica por meio de altas temperaturas no material. Quando a madeira está exposta a um fluxo de calor externo constante e uma fonte de ignição, é induzida a pirólise, liberando gases voláteis, que tendem a sair do material para o meio ambiente, pelo fato de a resistência do ar, ou ainda, da camada carbonizada, ser menor do que a resistência da camada ainda virgem da madeira. Esta é a camada mais interna da seção que ainda não teve início a combustão. Pode-se dizer então, que durante a combustão da madeira, existem três camadas básicas, a carbonosa, a de pirólise e a virgem, Figura 15, da mais externa a mais interna respectivamente. Entretanto, a camada da pirólise é muito fina, quase imperceptível, e existe exclusivamente durante a combustão, [39, 41].



Figura 15 Amostra de madeira após sofrer combustão.

A **Ignição** ocorre quando há uma combustão visual e contínua, vista pelas chamas, que é alimentada pela pirólise no material, ela marca o início do sinistro pela ocorrência de combustível, calor e comburente. Por isso, para que a ignição ocorra é necessário antes ter um fluxo de calor radiando para a face do material, que em situação de incêndio real, pode ser pela combustão de outro material próximo a madeira, ou em um experimento, através da

temperatura de um resistor elétrico, que fornecerá o fluxo necessário que induzirá a pirólise. O tempo desde o fornecimento do calor, até a ignição do material, é chamado de **Tempo de Ignição**, um parâmetro importante para a análise do comportamento ao fogo do material. Enquanto houver combustível próximo, haverá a ignição contínua do material, fase conhecida como propagação do incêndio, [39, 41, 42].

A **Taxa de libertação de calor (TLC)** é a quantidade de energia libertada pelo material em combustão por unidade de superfície dele. Conhecida também como *Heat Release Rate (HRR)*, é um importante parâmetro, pois indica o risco potencial ao fogo e a combustibilidade de um determinado material. Quanto menor for essa taxa, menor o risco ao incêndio o material oferece. A TLC de um produto pode ser determinado pelo teste Calorímetro de Cone, exposto no item 6.2.1, [41, 42].

A **carbonização** é um fenômeno que ocorre em sólidos orgânicos quando expostos a combustão. Ela consiste em um processo químico, que por meio da combustão há o consumo de oxigênio, liberação de hidrogênio pelos gases tendo como produto final essencialmente o carbono, origem de seu nome. Portanto é considerada o resultado da pirólise na madeira. Na direção longitudinal deste material ela é supostamente o dobro da direção transversal devido sua estrutura celular, Figura 16. Visto isso, a quantidade de carbonização da seção transversal é o principal fator para o cálculo de resistência ao fogo em estruturas de madeira, já que a camada carbonizada dificulta a combustão no interior do elemento, devido a condutividade térmica desta camada ser menor que da madeira em seu estado natural, servindo então como uma camada protetora, e o interior da estrutura ainda não carbonizada pode manter seu desempenho estrutural, [39, 41, 42].



Figura 16 Efeito da carbonização em uma amostra exposta ao teste de Calorímetro de Cone.

A **produção de fumo** é outro fator relevante a respeito do comportamento ao fogo da madeira, pois a fumaça liberada pela combustão pode ser densa e opaca, de modo a dificultar a saída das pessoas do local. Além disso, o fumo pode conter elementos tóxicos nocivos à saúde humana. Por isso deve-se conhecer o que contém na fumaça produzida pelo material e um dos principais meios para tal é também o teste do Calorímetro de Cone, que consegue obter além da taxa de libertação de calor, parâmetros como a libertação de monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2) por unidade de massa e a área específica de extinção ou produção de fumo (SEA). A SEA é o produto da Taxa de Libertação de Fumaça (SRR) e da área da amostra, mais utilizada por ser linearmente correlacionada com a HRR. A SRR é a densidade ótica multiplicada pela taxa de fluxo de ar no tubo de escape do calorímetro, dividida pelo produto da área de superfície exposta da amostra e o comprimento do caminho ótico. Portanto a norma europeia EN 13501-1 também classifica o material quanto a produção de fumo, [39, 41-43].

3.2. Curvas de incêndio padrão

Em busca de facilitar a determinação da ação do fogo nos materiais, foi formulado, através de modelos matemáticos, curvas típicas do desenvolvimento e comportamento de um incêndio, que relacionam a temperatura com o tempo decorrido da ação acidental.

A curva de incêndio real, Figura 17, com a temperatura em função do tempo, contempla os três estágios básicos que ocorrem durante o evento. A primeira fase é o tempo de ignição, com o crescimento gradual da temperatura, sem risco de haver colapso da estrutura, conhecida também como *pré-flashover*, justamente por terminar quando há a ocorrência do *flashover*, ou seja, o instante onde há a inflamação generalizada, o critério visual para o *flashover* é quando há o envolvimento total do compartimento, possível de observar pelas chamas saindo para fora das portas e janelas. A segunda fase é de aquecimento, pois há um crescimento rápido da temperatura em um curto período de tempo, pois todo o material combustível entra em combustão, a temperatura nessa fase geralmente é superior a 300 [°C], e se desenvolve até atingir a temperatura máxima do incêndio, que pode até ultrapassar 1000 [°C] em alguns casos. A terceira e última fase é a de resfriamento, pois inicia-se a redução da temperatura do material e gases no ambiente, pois houve a combustão total do material combustível disponível. É possível que haja um pequeno

aumento da temperatura por pouco tempo, devido a um atraso do resfriamento causado pela inércia térmica, [42, 44].

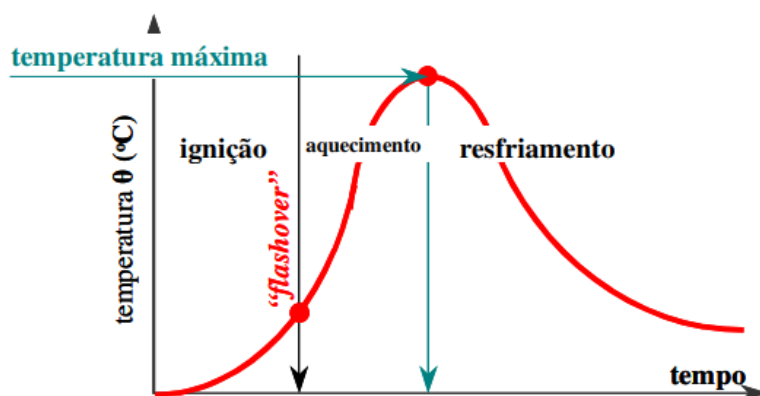


Figura 17 Curva temperatura-tempo de um incêndio real, [44].

A norma ISO 834:1975 apresenta a curva padrão de incêndio, um modelo idealizado para análises experimentais. Nela, a temperatura sofre um crescimento gradual em relação ao tempo, independente da carga de incêndio, propriedades térmicas dos materiais, entre outros. Serve, portanto, para facilitar o estudo em ensaios em série, e não para descrever a situação real do sinistro. Pesquisadores estudaram métodos de relacionar a curva padrão com a curva de incêndio real, e a resposta mais aceita, é de o início da curva padrão ser no instante do *flashover*, Figura 18, [44].

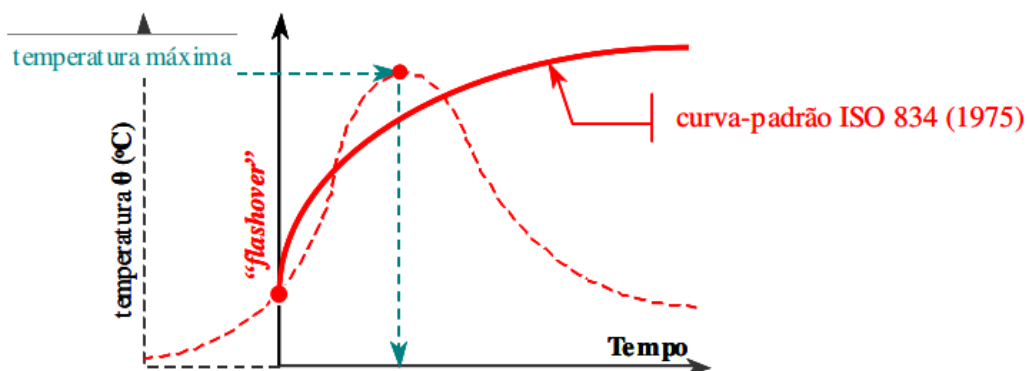


Figura 18 Curva temperatura-tempo de um incêndio padrão, [44].

3.3. Classificação normativa

A norma EN 13501-1, que define a classificação da reação e resistência ao fogo dos produtos de construção, especifica cinco testes para classificar os materiais, são eles: Teste de Incombustibilidade (ISO 1182) que determina o quanto um produto contribui ou não, para o incêndio; Teste de calor de combustão (ISO 1716) que determina o poder calorífico superior e inferior do material, bem como o calor total máximo que ele poderá liberar, caso haja combustão; Teste do elemento isolado (ISO 13823), utilizado nesta pesquisa, que determina a reação do produto ao fogo, quando exposto a um objeto isolado em combustão. Nele que é determinado características físicas do incêndio através da observação do comportamento da amostra durante o ensaio, a Taxa de Libertação de Calor e Fumo; Teste de Inflamabilidade (ISO 11925-2) que determina a facilidade que o elemento entra em ignição, sob a influência de uma chama piloto; Teste do comportamento em relação ao fogo através de uma fonte de calor radiante (ISO 9239-1) que determina a reação ao fogo apenas de elementos utilizado em pavimentos e revestimentos, [39, 45].

Para classificar os materiais e elementos da construção, a norma separa em sete classes, e ainda diferencia em um primeiro grupo, os que são aplicados em revestimentos de pisos, e segundo grupo com todos os outros casos de aplicação, com exceção do primeiro. As sete classes são:

- F, quando o material possui um comportamento ao fogo não conhecido;
- E, para materiais que contribuem significativamente para a propagação do fogo, devem resistir à chama apenas por um curto período de tempo. Deve-se realizar o Teste de inflamabilidade, com uma exposição de 15 [s] e obter requisitos mínimos para seus resultados;
- D, para materiais em que sua contribuição para a propagação do fogo é relativamente significativa, cumpre os requisitos da classe E. Consegue resistir ao ataque térmico de um elemento isolado em combustão com uma taxa de libertação de calor limitada. Deve-se realizar os testes ISO 11925-2 com exposição de 30s e EN 13823, com requisitos mínimos para seus resultados;
- C, para essa classe, a contribuição para a propagação do fogo é mais restrita. Cumpre os requisitos da classe D com maior rigor. A propagação lateral da chama também é limitada. Realiza-se os testes da EN ISO 11925-2 e a EN 13823, com requisitos mínimos para seus resultados;

- B, a contribuição para a propagação do fogo é limitada. Cumpre os requisitos da classe C. Realiza-se também os testes da EN ISO 11925-2 e a EN 13823, com requisitos mínimos mais exigentes para seus resultados;
- A2, não contribuem para a carga e nem desenvolvimento do incêndio, satisfaz os requisitos da classe B. Os testes da EN 13823, EN ISO 1716 e EN ISO 1182 devem ser realizados, com requisitos mínimos mais exigentes para seus resultados;
- A1, materiais que não contribuem para nenhuma fase do incêndio, mesmo quando totalmente desenvolvido. Cumpre os requisitos da classe A2. Os resultados dos testes EN ISO 1716 e EN ISO 1182 são ainda mais rigorosos;

Os requisitos dos resultados dos ensaios das classes acima, estão descritos na Tabela 1 da norma EN 13501-1. Ainda há a classificação conforme a produção de fumo do material, representado pela letra *s* e conforme a libertação de partículas/gotas inflamadas, pela letra *d*.

Para a produção de fumo classifica-se como **s3**, quando não há limite requerido para a produção de fumo, em **s2** quando há um limite tanto para a produção total de fumo quanto para a taxa de produção de fumo e **s1** que contempla requisitos mais rigorosos para os mesmos da classe *s2*. Para a classificação de acordo com a libertação de partículas/gotas inflamadas aplica-se **d0**, quando não ocorre a produção delas, **d1** quando não há a produção por um determinado período de tempo e **d2** quando não há restrições para a libertação das gotas inflamadas.

Essas são as classificações dos materiais, no que diz respeito ao seu comportamento ao fogo, descritas na norma europeia. A classificação mais comum dos materiais de madeira são de D, porém, podem ser melhorados, através de processos e produtos ignífugos, e serem classificados, em geral, como B, [39, 45].

3.4. Resinas e Retardantes de chama

Existem diversos compostos que podem ser utilizados como adesivos para unir as lamelas, ou partículas, de madeira e formar painéis, vigas ou pilares, entre eles, os mais utilizados são: poliuretano (PUR), Ureia-Formaldeído (UF), Melamina Ureia-Formaldeído (MUF) e resinas fenólicas (PF, MUPF). É necessário conhecer a composição das resinas utilizadas nos materiais e seus respectivos comportamentos ao fogo, e ainda quais

substâncias, como gases, que liberam ao entrarem em contato com calor, pois em alguns casos, principalmente as que utilizam de formol, o fumo produzido pode ser altamente prejudicial à saúde, [30].

Retardantes de chama são materiais que provocam ignição retardada, taxa de liberação de calor reduzida e propagação mais lenta das chamas (Figura 19), ou seja, capazes de evitar que o fogo se propague às estruturas por um determinado tempo necessário para, no mínimo, a evacuação sem perigo das pessoas que estiver no ambiente em que se iniciou o incêndio, [42].

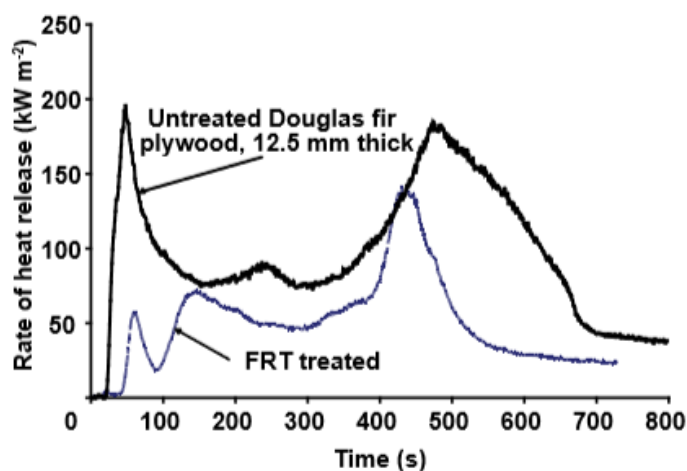


Figura 19 Curvas de *HRR* em função do tempo para o material *Plywood*, uma amostra com o tratamento de retardante de chamas (*FRT treated*) e outra sem o tratamento (*Untreated*), [42].

Os retardantes de chama devem ser materiais não inflamáveis, ou com baixa inflamabilidade, aplicados nos revestimentos de paredes, tetos e pavimentos. Também auxiliam na redução de fumo liberado no ambiente. Eles podem ser encontrados como produtos ignífugos e tintas intumescentes, considerados como proteção passiva ao sinistro. Alguns dos elementos mais utilizados nesses materiais são: sais de amônio fosfórico, ácido bórico, carbonatos, boratos de metais alcalinos e resinas de formaldeído, [42, 46, 47].

A melamina ($C_3H_6N_6$) é um composto químico alcalino que pode ser utilizada tanto na resina, para unir as peças de madeira, quanto como um dos componentes retardadores de chama que formam os vernizes e as tintas intumescentes. A medida que é exposta a elevadas temperaturas, há um aumento da perda de massa dessa resina, que em 300 [°C] costuma-se ter a maior taxa de perda de massa, sendo que, por volta de 375 [°C] já não há resíduo considerável. Isto deve-se ao fato de quando exposta a temperaturas por volta de 250-350

[°C], as reações químicas na melamina produzem sua degradação física e gases que consomem calor, como NH_3 , que são portanto reações endotérmicas, [48]. É comum encontra-la em adesivos de Melamina Ureia-Formaldeído, por ser mais resistente a umidade e ignífugo, [49].

O formaldeído (CH_2O), também conhecido como metanal, é um composto solúvel em água e considerado inflamável, está presente em diversos produtos devido sua versatilidade, como por exemplo, em tintas, lubrificantes e nas resinas. Quando utilizado em adesivos para madeira, é geralmente associado a ureia, sendo que a resina UF é fabricada na indústria empiricamente, ou seja, valores de pH, temperatura, proporção dos elementos, entre outros, são exclusivos de cada fabricante. Após recentes pesquisas sobre a agressividade do formol para a saúde, desde de menores a maiores concentrações, como problemas respiratórios e câncer (*International Agency for Research on Cancer*, IARC, reclassificou-o como agente carcinogênico em 2006, [50]), respectivamente, a utilização tornou-se menos frequente e mais restrita, como exemplo, a EN 717-1 que normatiza a taxa de formaldeído nos produtos de painéis de madeira. Entretanto, as resinas UF são produtos mais baratos e mais disponíveis com alta capacidade de cura rápida na presença de catalisadores, e também relativamente alta concentração a baixa viscosidade, o que proporciona baixo encolhimento durante a prensagem da placa de madeira e permite a obtenção de materiais com aceitáveis valores de resistência, por isso ainda continuam a ser utilizadas, [51].

4. Durabilidade da madeira

4.1. O que é durabilidade

Durabilidade é definida como a vida útil de certo material sob dadas condições ambientais. O projeto da vida útil de uma construção, de acordo com as normas europeias, pode variar de no mínimo 10 anos, no caso de estruturas provisórias, até 100 anos, como pontes e edifícios monumentais. Visto isso, é necessário garantir que sua deterioração ao longo do tempo não reduza seu desempenho previsto, tendo em conta o ambiente e o nível de manutenção pretendido, [52].

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em 2011, realizou um inquérito com as empresas de projeto, fabricação, construção e comercialização de casas de madeira, em Portugal, e constatou-se que 60% delas consideram a vida útil das construções acima de 100 anos, feitas as devidas manutenções, [39].

4.2. Fatores que influenciam a durabilidade

No caso da madeira, dos aspectos que exercem maior influência em sua durabilidade destacam-se principalmente sua estrutura química e outros fatores como temperatura, umidade, pH, radiação solar e microrganismos. Destes, os explorados nesta pesquisa são as diferenças entre tipos de madeira, fatores atmosféricos, com a temperatura e o teor de umidade. E ainda o fator temporal, onde analisa-se a relação entre eles em diferentes tempos de exposição, [53].

4.2.1. Propriedades e anisotropia da madeira

A madeira é composta basicamente três elementos químicos, carbono, com maior quantidade, cerca de 50%, oxigênio, com 44% e hidrogênio, 6%. Estes juntos formam os três polímeros naturais presente nas árvores, Figura 20, estes são: celulose, hemicelulose e lignina. A proporção de cada um varia conforme a espécie, sendo mais evidente a diferença, quando se trata de folhosa ou conífera, [17, 53, 54].

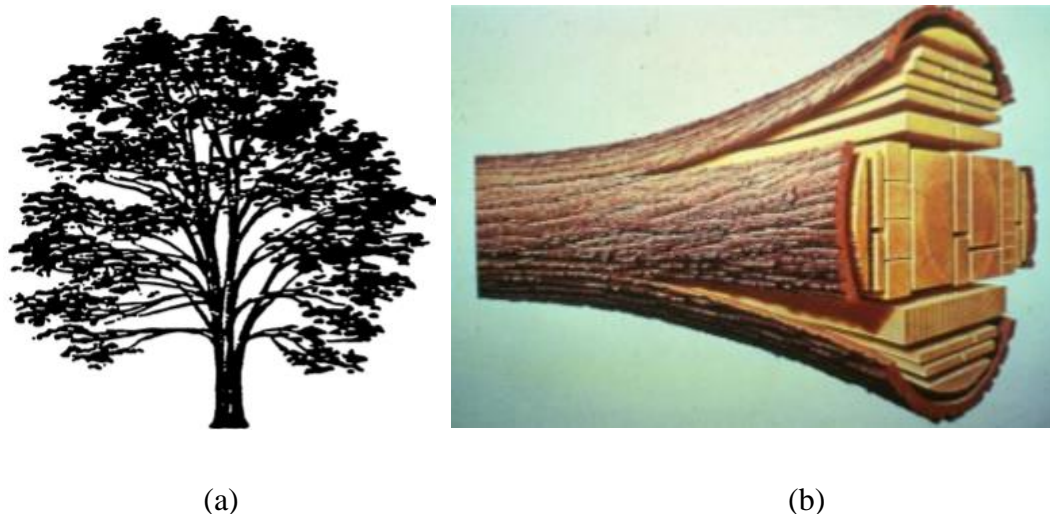


Figura 20 Nível macro (a) e sub-macro da madeira (b), [53].

As árvores folhosas é um tipo de dicotiledôneas que produz madeira, que por sua vez fazem parte das Angiospermas, que são consideradas mais evoluídas, produzem sementes com frutos. Já as coníferas fazem parte das Gimnospermas que produzem sementes sem frutos. Dentre as gimnospermas, as coníferas são as únicas que produz madeira. Essas diferenças são de importante consideração, devido ao fato de a proporção de celulose, hemicelulose e lignina serem consideravelmente diferentes para as duas, consequentemente, o comportamento as intempéries e aos esforços, como, compressão, tração e flexão. A Figura 21 representa a seção de um tronco de madeira, a parte que é utilizada para a produção de peças de madeira para a construção é o lenho, principalmente o borne e o cerne, [17].

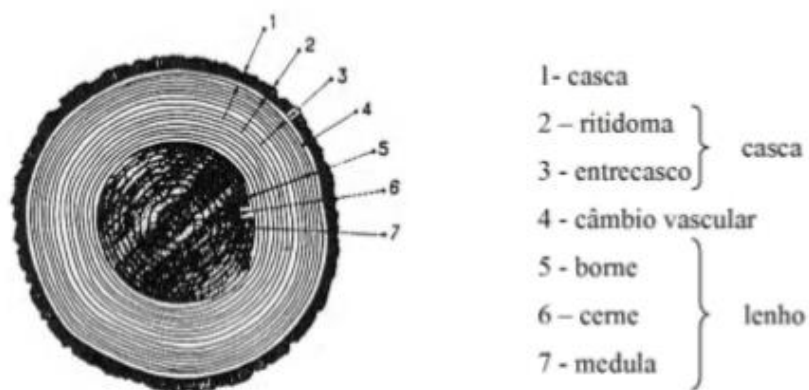


Figura 21 Divisão do tronco de um árvore, [17].

A madeira também é considerada um material anisotrópico, ou seja, suas propriedades se diferem nas três direções de crescimento: radial, longitudinal e tangencial, Figura 22. Isso ocorre principalmente devido a orientação longitudinal das fibras, o que provoca um aumento das propriedades de resistência neste plano, Figura 23. As variações dimensionais devido as trocas de umidade e temperatura são, do mesmo modo, diferentes, na direção longitudinal são pequenas, porém na tangencial e radial são consideráveis, [49].

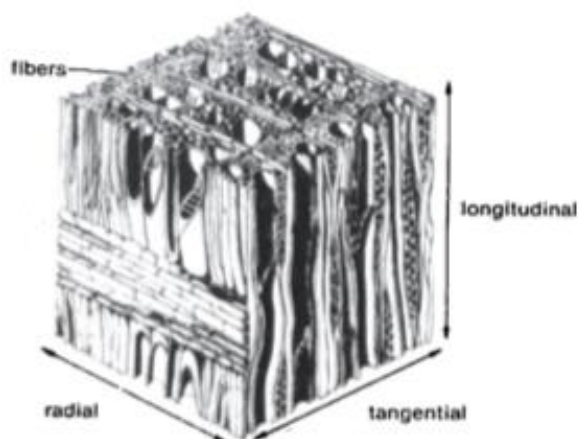


Figura 22 Nível micro estrutural da parede celular e suas direções, [53].

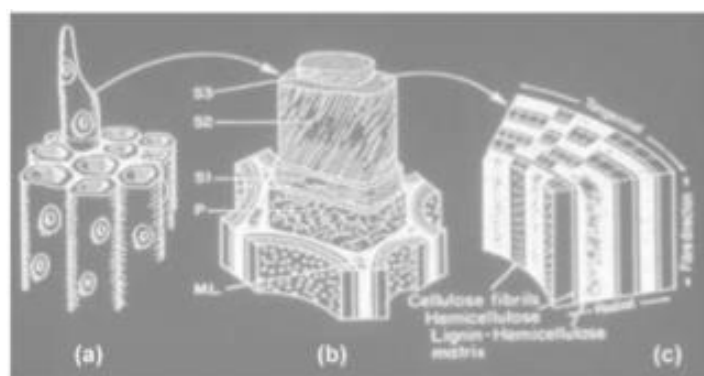


Figura 23 Nível sub-micro da madeira, [53].

Portanto, apesar da madeira ser tratada como um tipo de material na construção civil ela é, de fato, um grande conjunto de materiais com consideráveis diferenças por ser um elemento criado pela natureza com distintas condições. A taxa de degradação depende do tipo de madeira, principalmente conífera ou folhosa, de forma que, o projeto de vida útil precisa considerar a espécie com propriedades adequadas para seu uso final, [49].

4.2.2. Fases de degradação térmica da madeira

Conforme há o aumento da temperatura na madeira, diferentes componentes químicos sofrem degradação, e ainda o nível dessas mudanças dependem do tempo de exposição a essas determinadas temperaturas.

Em temperaturas até 100 [°C], dependendo da situação inicial da madeira, como o teor de água, da espécie, do meio e uso em que se encontra, pode ocorrer uma redução permanente na resistência da madeira, provavelmente devido a despolimerização. Após 100[°C] pode haver uma redução na massa, devido a vaporização da água contida no material e liberação de outros gases não combustíveis, como CO_2 . Não há ignição no material, contudo pode ocorrer uma mudança de cor.

Após 200 [°C] até meados de 300 [°C], a pirólise se intensifica, há liberação de outros gases, como por exemplo, CO . As hemiceluloses e componentes de lignina são pirolisados nessa faixa de temperatura, podendo se estender até uns 450 [°C] no caso da lignina. As reações de desidratação iniciadas são as principais responsáveis pela pirólise da lignina e resultam em um alto rendimento de carbono para a madeira. Em geral, as reações na pirólise são endotérmicas, porém pode haver uma pouca parcela exotérmica das reações do carvão

ativado e os voláteis com oxigênio, que se manifestam como uma combustão brilhante, por isso, nessa fase é onde haverá a ignição no material.

Entre 300 a 500 [°C] aumenta-se a produção de voláteis inflamáveis, que começa com a despolimerização da celulose, produção de ácido acético, metanol, alcatrão, entre outros. As ligações carbono-carbono entre unidades estruturais da lignina é clivada, sendo que, as reações de degradação da lignina são exotérmicas. Todos os componentes da madeira terminam suas emissões voláteis em torno de 450 [°C]. Essa fase de alta temperatura da pirólise na madeira resulta em perda de cerca de 75% do peso seco original do material, com o resíduo total de carvão.

Acima de 500 [°C] encerra-se a carbonização, com o resíduo principal o carvão. Caso continue altas temperaturas, pode ocorrer a gaseificação do carvão. É importante destacar que, na seção transversal da madeira, a parte mais externa pode estar nessa fase final, entretanto a mais interna estar iniciando o fase inicial da pirólise, [39, 42].

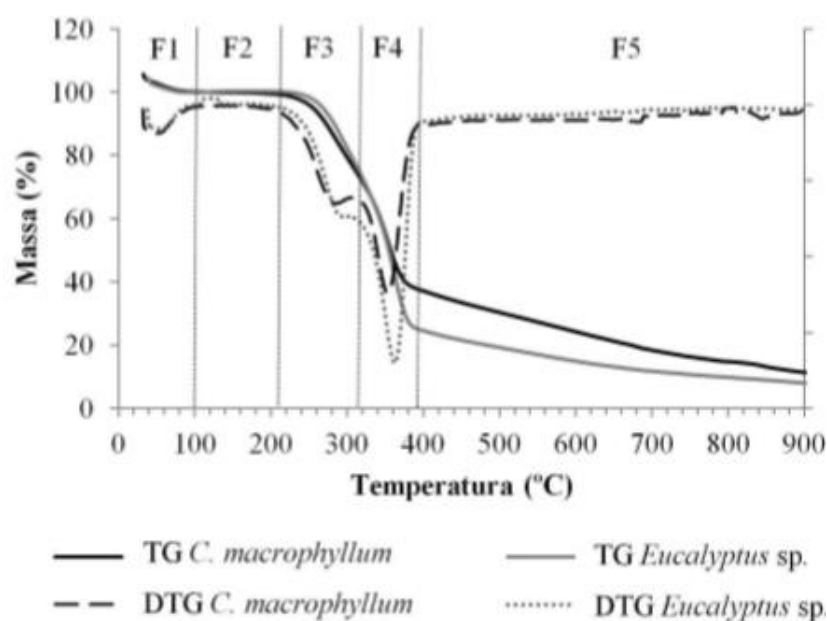


Figura 24 Curva termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) da madeira de *Cenostigma macrophyllum* e da madeira de *Eucalyptus sp*, [55].

Em 2018, A. C. Araújo *et al*, realizaram o teste de Termogravimetria para as madeiras *Cenostigma macrophyllum* e da madeira de *Eucalyptus sp*, onde obtiveram a taxa de perda de massa em função do aumento da temperatura. Através da derivada dessa curva, Figura 24, foi possível observar os picos de perda de massa desse material, e assim identificar as

reações ocorridas. Cinco faixas distintas foram observadas. A primeira corresponde ao processo de perda de água da amostra (5,17% da massa inicial) e ocorre do início da análise até aproximadamente 100 [°C] (F1). A partir desta temperatura, a massa se mantém quase constante até os 210 [°C], onde se inicia a decomposição térmica dos componentes químicos da madeira (F2). O primeiro pico foi observado entre 210 [°C] e 315 [°C], sendo relativo à decomposição das hemiceluloses (F3). Neste intervalo perdeu-se 24,75% da massa da madeira. O segundo pico ocorre por causa da decomposição da celulose (F4), o qual ocorreu entre 315 [°C] e 390 [°C], onde 36,05% da massa de madeira foi perdida. As curvas de TG e DTG não apresentaram picos específicos referentes à degradação da lignina da madeira, [55].

A massa residual durante a análise termogravimétrica, na pesquisa referida, aos 400 [°C], 500 [°C] e 600 [°C] foi, respectivamente, de 37,04%, 30,25% e 24,16% da massa seca inicial. O Teor de Materiais Voláteis apresentou redução de 63,4% entre 400 [°C] e 600 [°C]. Resultado contrário foi observado para o teor de carbono fixo, em que o aumento da temperatura de pirólise da madeira ocasionou acréscimo de 29,4% nos valores, [55].

4.2.3. Teor de umidade da madeira

A madeira é considerada um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver água. A quantidade de água presente em uma massa de madeira anidra é chamada de Teor de Umidade (ω) da madeira, assim definido pelas normas [56]. Para chegar a um teor de umidade de equilíbrio é preciso mantê-la em um clima constante, sendo que, a temperatura, umidade relativa, pressão do ar, as composições químicas e estruturais podem influenciar significativamente em sua estabilidade.

Variações de teor de umidade na madeira pode causar, entre outros, a variação dimensional da estrutura, efeito indesejável, pois pode causar desde um desconforto visual à uma falha na capacidade de carga da mesma.

A água pode ser encontrada na madeira em três estados: água livre; água vinculada e quando a madeira está verde, ou seja, com as duas primeiras simultâneas. A água livre é aquela que se encontra no interior dos vazios da estrutura da madeira, como por exemplo, no interior das células. É dita livre, pois não tem ligação química com o material e não influência nas propriedades mecânicas dele. Já a água vinculada, é encontrada na parede

celular da madeira, e está quimicamente vinculada ao material. A madeira verde, ou seja, no seu estado nativo, sem ter sofrido nenhum processo de secagem, possui os dois tipos anteriores. Quando a madeira passa pelo processo de secagem, a primeira água a ser liberada é a livre, justamente por não ter nenhuma ligação química. A Figura 25 abaixo, no esquema 1, representa a madeira no estado verde, no esquema 2, houve a saída de quase toda a água livre, mas ela ainda se encontra nas paredes da célula. No esquema 3, encontra-se o “Ponto da Fibra Saturada” conceito que define o momento em que a quantidade de água vinculada é máxima, a parede celular permanece saturada e não há a água livre. No esquema 4, a parede celular perde a água vinculada, e por consequência, perde espessura. [57]

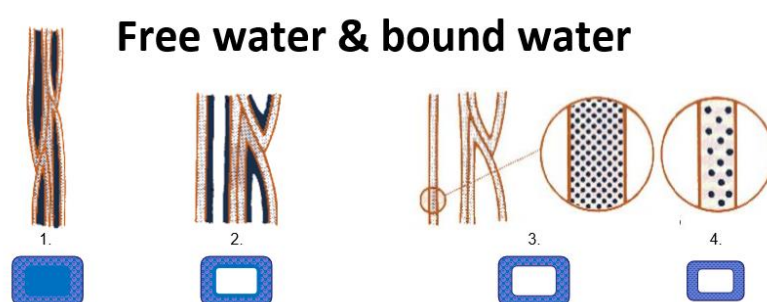


Figura 25. Representação dos estados da água na estrutura celular da madeira, a ação da água vinculada (*bound water*) e da água livre (*free water*). [57]

É importante destacar, que a água vinculada influencia drasticamente na capacidade de resistência a compressão da madeira. Sendo que de 0 a 20% de teor de umidade, é considerado empiricamente que ocorre a existência dela, sendo que, ao aumentar o teor de umidade, após 20%, está a se aumentar a água livre no material, o que já não interfere em sua capacidade resistente, Figura 26. Portanto, vê-se a importância no controle do teor de umidade na madeira aplicada com funções estruturais na obra, [57].

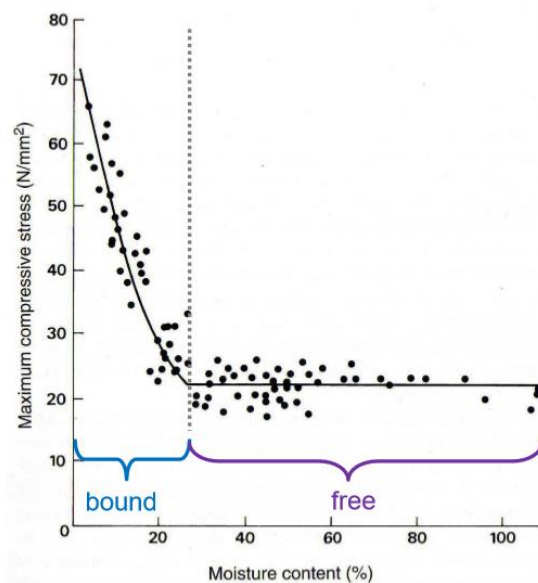


Figura 26. Máxima tensão de compressão (N/mm^2) em função do teor de umidade (%). Destaca-se a ação da água vinculada (*bound water*) e da água livre (*free water*), [57].

Na análise do ponto de vista da durabilidade da madeira as variações de teor de água podem causar o seu desgaste estrutural. Esse efeito é explicado devido ao gradiente de teor de água,

Figura 27, termo utilizado para designar o evento que ocorre quando há evaporação muito intensa na camada mais externa do material, sendo assim, em sua camada interior os vazios das células estão cheios de água e nas células mais externas não. As células vazias tendem a diminuir a espessura da sua parede celular e a somatória desse volume causa uma retração em toda a peça de madeira. Tal retração causa pontos em sua estrutura celular com maior tensão de tração, e em outros, com maior tensão de compressão, sendo insignificante na direção axial, mas significativas na direção tangencial e radial, sendo a radial metade da tangencial, [58].

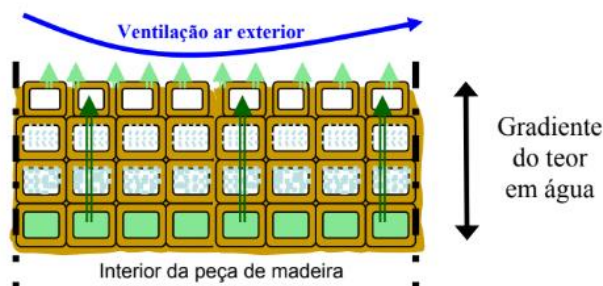


Figura 27 Gradiente do Teor de água, [58].

Os aumentos dessa variação de tensões internas podem causar deformações plásticas por fluência e, no caso de ser ultrapassada a resistência a tração limite da madeira, ocorre a abertura de fendas nesta. Essas aberturas podem diminuir a capacidade de carga do elemento, assim como, em situação de incêndio, podem facilitar a combustão na seção mais interna da madeira, o que reduz sua conservação e desempenho, [58].

A normas que regem o dimensionamento de estruturas em madeiras, recomendam que o teor de umidade máximo no material seja de 20%. Isso deve-se ao fato de, a probabilidade, após essa porcentagem, de ocorrência de proliferação de fungos seja alta, passando a se tratar de outros problemas no elemento, como a biodegradação,[36].

Portanto, a variação do teor de umidade da madeira é um fator considerável para a análise deste trabalho. Para efeitos de experimentos, é possível controlar a umidade relativa ar, ou seja, a umidade em que a peça estará envolta, e para saber a quantidade de água absorvida por esta existem relações empíricas, que correlacionam a espécie, temperatura e umidade relativa, com o teor de umidade do material. Além delas, existem ensaios normatizados para averiguar este fator, [59].

Algumas **relações empíricas** são encontradas na *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 4933, *Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Base Materials* e no livro *Wood Handbook*, de 1999. Dentre elas: uma equação que correlaciona a temperatura e a umidade relativa com o teor de umidade na madeira; uma tabela, que apresenta o teor de umidade da madeira verde esperado, de acordo com a espécie; outra tabela com o valor de ω em função da temperatura e da umidade relativa; e por fim, um gráfico com teor de umidade em função da umidade relativa do ar,[38].

A equação apresentada no guia citado é:

$$M = \frac{1800}{W} \left[\frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{KK_1h + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right] [\%] \quad (4.1)$$

Onde,

M é o teor de umidade da madeira (%)

h é a umidade relativa do ar (%/100)

T é a temperatura em Celsius

$$W = 349 + 1,29T + 0,0135T^2 \quad (4.2)$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2 \quad (4.3)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2 \quad (4.4)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2 \quad (4.5)$$

Existe uma curva típica, Figura 28, que relaciona o teor de umidade da madeira (em geral o teor de umidade de equilíbrio) com a umidade relativa do ar, com base em resultados de testes com diferentes madeiras. A curva pode ser útil como uma base ou referência para a análise. E ainda a tabela que relaciona a Umidade Relativa, com a temperatura e o Teor de Umidade da madeira, Figura 29, [38, 58, 60].

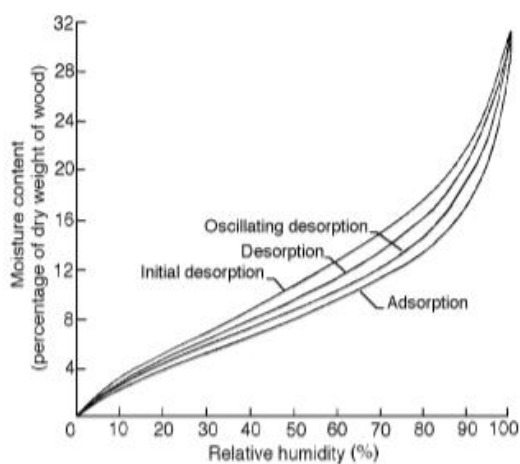


Figura 28. Curva típica da relação Umidade Relativa (*Relative humidity*) com o Teor de Umidade presente na madeira (*Moisture Content*), todos em porcentagem, [38].

Temperature (°C (°F))	Moisture content (%) at various relative humidity values																		
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1 (30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4 (40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0 (50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6 (60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1 (70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7 (80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2 (90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8 (100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3 (110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9 (120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4 (130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0 (140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6 (150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1 (160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7 (170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2 (180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8 (190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3 (200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9 (210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4 (220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			

Figura 29 Valores do Teor de Umidade na madeira em relação a Umidade Relativa do ar e a temperatura, [38].

Existem três métodos na norma europeia EN 13183/2002 para análise do ω na madeira, são os **Ensaio Normatizados**. A parte 1 é um método direto, que consiste em secagem na estufa, tratando-se de um ensaio destrutivo, a parte 2 refere-se à estimativa através da resistência elétrica e a parte 3 por estimativa através da capacitância. As duas últimas são por um método indireto e não destrutivos. Os procedimentos são válidos para a madeira serrada, aplainada ou usinada de outra maneira, [56, 60, 61].

Semelhante a norma acima, a EN 322/1993 também indica os procedimentos para a determinação do teor de umidade em painéis de madeira, através do método de secagem. Para este trabalho, foi adotado os procedimentos de acordo com a esta, [62].

Existem **ensaio diretos**, como o Método de Secagem no forno, que deve ser realizado da seguinte forma: A amostra deve ter no mínimo 20 [g], as dimensões da amostra não são importantes. Deve se evitar defeitos na amostra, como nós. Pesa-se imediatamente em uma balança com escala de 0,01 [g] para determinar a massa da madeira úmida m_1 . Após coloca-se a amostra em um forno ventilado e então expor a uma temperatura de 103 ± 2 [°C]. Para a pesagem após (6 horas depois), é necessário primeiramente deixar a amostra atingir uma temperatura equilíbrio com o ambiente, dentro do dessecador, para que evite alteração em seu teor de umidade, assim pesa-se o mais rápido possível. Esse procedimento deve-se repetir até que a variação na massa posteriormente pesada seja menor que 0,1% entre duas

últimas pesagens consecutivas. A última massa medida é considerada a massa da madeira seca, [62].

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100 [\%] \quad (4.6)$$

Onde,

m_1 é a massa da madeira úmida

m_0 é a massa da madeira seca

ω é o teor de umidade da madeira, o valor deve ser arredondado para 0,1% mais próximo.

Há ainda os **ensaios indiretos**, com o auxílio de aparelhos medidores. O procedimento para a medição é: Calibrar o instrumento de acordo com a espécie e a correção da temperatura da madeira. Direcionar os eletrodos para o lado da face da peça onde está a direção das fibras, a uma distância de pelo menos 0,30 [m] da extremidade da amostra, ou no ponto médio, no caso de a amostra ter menos de 0,60 [m] de comprimento, e a distância de 0,3 vezes a dimensão de uma aresta. Os eletrodos devem penetrar na peça a uma profundidade mínima de 0,3 vezes a espessura da madeira. Deve-se evitar que a medições sejam feitas em áreas com defeitos, como por exemplo, nós ou resinas. A leitura a ser considerada será a exibida por 2 a 3 segundos consecutivos. O teor de umidade medido poderá ser arredondado para o 0,1% mais próximo. No Anexo A da norma diz o número de repetições necessárias de acordo com o número de amostras disponíveis, [60, 61].

4.3. Envelhecimento Natural e Acelerado

A madeira é considerada um material durável que suporta o intemperismo sem perder suas propriedades resistentes. Entretanto, alguns parâmetros não biológicos, como, temperatura, radiação solar e umidade, podem ser responsáveis pela degradação deste material ao longo do tempo. Ainda, para fins arquitetônicos e industriais, ela sofre diferentes processos, como visto anteriormente, com alterações químicas e mecânicas que podem acelerar ou retardar a sua degradação. Deste modo, inversamente proporcional a durabilidade está o **envelhecimento natural**, Figura 30, o qual é considerado como a perda gradual das propriedades e desempenho de certo material, ao longo do tempo, [49].



Figura 30 Madeira conífera envelhecida naturalmente.

Para o uso na construção, é necessário prever o comportamento ao longo dos anos destes materiais, portanto as pesquisas para tentar determinar a taxa de degradação de determinada propriedade continuam a ser investigadas. Porém, existe uma complexidade em simular o envelhecimento devidos as flutuações naturais dos fatores que influenciam a durabilidade, citados anteriormente, sendo assim possível chegar a valores próximos dos reais, mas não exato, através dos testes de aceleração artificial da degradação, [11, 63].

Utilizado por muitas décadas nas indústrias de manufatura pelos engenheiros, o **Teste Acelerado** tem o objetivo de adquirir dados e informações confiáveis dos materiais em semanas, onde, unidades de testes de um material, componente, sistemas, são submetidos a níveis acima do usual de uma ou mais variáveis de degradação, ou ainda, aceleração das reações, de forma a obter resultados para prever a vida dessas unidades em suas condições de uso. A extrapolação é tipicamente justificada com base em modelos físicos ou da

combinação de um modelo empírico, com quantidades suficientes de experiência anterior em testes de unidades semelhantes, com o auxílio de modelos e conceitos estatísticos. Quando estes testes têm por objetivo avaliar a degradação de determinados materiais, pode-se nomeá-los de **Envelhecimento Artificial**, que por meio de ciclos intensos com variações bruscas de diferentes temperaturas, umidades, e em alguns casos a radiação ultravioleta e tensão, conseguem adiantar a degradação daquele produto, [64].

A norma EN 16755 determina que a aplicação do envelhecimento natural para análises da durabilidade da reação ao fogo, deve ser realizada de acordo com a EN 927-3, e no caso de aplicação de do envelhecimento acelerado para as mesmas análises, deve-se seguir a EN 927-6, ou o anexo B da norma, onde encontra-se o Método A e o Método B, para realizar a aceleração artificial, [2].

No Método A, as amostras sofrem uma exposição de doze ciclos de uma semana. Cada ciclo é composto por 96 horas de exposição à água e 72 horas de secagem. No Método B, os procedimentos são semelhantes ao do A, entretanto altera-se o ciclo, que neste consiste em expor as amostras a ciclos de 24 horas, sendo 4 horas de umidificação, 4 horas de secagem, 4 horas de umedecimento, 4 horas de secagem e 8 horas de descanso. Repete-se este ciclo por um total de 1000 horas. A forma com que deve-se aplicar a água e a temperatura de secagem, entre outros pormenores, também são detalhados, [2].

Na ETAG 028/2012, está definido também ensaios de envelhecimento acelerado para aprovação dos produtos retardantes de fogo. Nela está dividido os produtos em categorias conforme o ambiente de aplicação final. Para ambientes interiores, define-se Z1 para ação de temperatura e umidade, e define-se Z2 para ambientes internos secos, ou seja, com a ação da temperatura mais significativa e pouca variação de umidade relativa do ar. Os ciclos de envelhecimento artificial são de: 8 horas em 27 [°C] e 90% de Umidade Relativa (UR), após 16 horas em 23 [°C] e 50% de UR, para produtos de classificação Z1; 8 horas em 25 [°C] e 70% de UR, após 16 horas em 23 [°C] e 50% de UR, para produtos de classificação Z2, [65].

A relação entre o envelhecimento natural e o acelerado ainda é um campo extenso de estudo, como por exemplo, em 2016, por B. Östman e L. Tsantaridis, que fizeram um relatório sobre as principais pesquisas nos últimos dez anos, analisando a durabilidade do comportamento a reação ao fogo para produtos de madeira tratados com retardante de fogo em ambientes externos, comparando resultados utilizando-se do Método A, Método B e envelhecimento natural, como descrito no item 1.2, [11].

5. Desenvolvimento do Modelo de Previsão para a durabilidade da Reação ao Fogo

5.1. Modelo de Previsão

Estimar o tempo de falha dos produtos, ou ainda o desempenho a longo prazo de seus componentes, com uma alta confiabilidade, é particularmente difícil. A maioria dos produtos modernos são produzidos para operar sem falhas por anos, décadas ou mais. Mas ainda é necessário obter estimativas de vida ou desempenho de longo prazo de níveis mais baixos a níveis normais e altos da(s) variável(s) aceleradora(s), [64]. O conhecimento sobre a relação entre o tempo do envelhecimento acelerado com o tempo que ocorreria no natural, ainda se encontra em desenvolvimento e é denominado **Modelos de Previsão**, do qual integram-se os modelos de TTS (*Time and Temperature Superposition*) e TTMS (*Time, Temperature and Moisture Superposition*), que pretendem entender a degradação de específicas reações químicas com a variação de tempo, temperatura e umidade. Ainda hoje, as principais teorias e pesquisas realizadas baseiam-se nos princípios publicados por Svante Arrhenius, em 1889, conhecida como Equação de Arrhenius, [64, 66].

$$k_{ARR} = Ae^{-U_o/RT} \quad (5.1)$$

Onde, k_{ARR} é a taxa de reação, A é o fator pré-exponencial ligado à característica do material, U_o é a energia de ativação para a reação, expresso em [kJ/mol], R é a constante de gás universal, equivalente a 0,008314 [kJ/mol] e por fim T , que é a temperatura absoluta

expressa em Kelvin, [64]. A relação entre vida-estresse de Arrhenius é formulada assumindo que a vida é proporcional para a taxa de reação inversa do processo, [67].

Em 2017, Kulman e Boiko desenvolveram um modelo de TTMS sobre a durabilidade de painéis derivados de madeira após testes de envelhecimento acelerado, analisando seu desempenho mecânico. No decorrer do trabalho, os autores utilizaram da teoria cinética das forças, assim como Arrhenius, o trabalho de Zhurkov, de 1965 e estudos de Ratner e Yartsev, de 1992, [68]. Como resultado, obtiveram a seguinte expressão:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_o - \gamma \sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right] \cdot \exp(\alpha W_e^{-1}) \quad (5.2)$$

Onde,

$$W_e = \frac{W_m - W}{W_m} \quad (5.3)$$

O τ é a durabilidade na temperatura T [°C], teor de umidade W e carga σ [MPa], todos do ensaio, γ coeficiente de transformação do estresse mecânico em energia, U_o é a energia de ativação para a reação, [kJ/mol]. O τ_m é a durabilidade mínima esperada do material, em segundos, T_m e W_m são, respectivamente, a temperatura limite e o teor de umidade limite para o bom funcionamento do material. O R é a constante de gás universal, W_e é a umidade efetiva e α é um fator que considera o impacto de W na durabilidade do material, [68].

Em vista disso, através de ensaios que expõem os materiais a temperaturas, teores de umidade e outros parâmetros que influenciam a degradação do produto, é possível aplicar um modelo de previsão adequado ao material e sua aplicação final. Portanto, o método de envelhecimento acelerado, deve ter como base as variações destes fatores degradadores. Como resultado, pode-se conhecer o tempo necessário de manutenção daquele produto ou ainda, sua substituição, para que mantenham seu desempenho projetado para aquele uso. Nesta pesquisa, o método de envelhecimento acelerado adotado foi a partir dos princípios estatísticos conhecido como Método Fracionado Fatorial.

5.2. Projeto de Experimentos

Através de princípios estatísticos, o *Design of Experiments (DOE)*, ou, Projeto de Experimentos, é uma técnica utilizada com o objetivo de aprimorar o desenvolver-se dos projetos por meio de reduzir o tempo do plano e processos, melhorar o desempenho do experimento e produto, controlar e monitorar os erros possíveis dos procedimentos da pesquisa, entre outros. Essa técnica se destaca no âmbito mundial de pesquisa, por dar suporte a evolução da ciência de forma rápida e eficiente. Por meio de métodos como, por exemplo, Quadrado Latino ou Delineamento Completamente Casualizado, é possível determinar o número de amostras, combinações, repetições mais adequadas ao experimento que se modele aos desejos e recursos disponíveis do pesquisador. Ainda outros métodos como a Análise de Variância, que auxilia a monitorar os erros das variáveis controláveis ou não, do processo, por consequência, aproximar as conclusões teóricas das práticas. Esta técnica teve início em 1920, com o trabalho realizado pelo Dr. Ronald Aymer Fisher, que criou os fundamentos da ciência estatística moderna. Optou-se por utilizar desse princípio neste trabalho para otimizar o ensaio de envelhecimento artificial dos materiais OSB e CLT,[69].

É necessário definir o problema a ser estudado e as variáveis que interferem nele, chamadas de fatores ou parâmetros, estas podem ser do tipo controláveis, ou, não controláveis. O espaço de projeto, ou região de interesse também devem ser definidos. Os números das variáveis devem ser pequenos, e seus valores são chamados de níveis. O resultado do experimento é chamado de variável resposta. Neste estudo, para avaliar a durabilidade dos produtos à base de madeira com retardantes de fogo, as variáveis estudadas que mais influenciam são, temperatura, umidade relativa do ar e tempo. O envelhecimento acelerado é a região de interesse e a variável resposta será o desempenho do material após o tratamento,[69].

Como as variáveis deste trabalho tem um comportamento não conhecido ao longo do tempo no material, a escolha de três níveis para cada uma delas foi feita, justamente para identificar, da melhor maneira possível, a curva quadrática descrita de sua performance, e não apenas dois níveis, que permitiria uma análise apenas de uma reta, algo como um comportamento linear.

Nesta pesquisa, foi aplicado o método **Fracionado Fatorial**, que consiste em otimizar o número de combinações das variáveis. As combinações são as interações entre as variáveis e seus níveis. Mantém-se o conteúdo relevante para a investigação, porém, reduz-se a quantidade de combinações, por consequência de amostras e tempo do experimento.

Visto a necessidade de três níveis, o número de combinações total do experimento será L^k , onde k é o número de variáveis, e L o número de níveis, sendo assim, $3^3 = 27$ combinações possíveis (método Fracionado Completo), Figura 31. Por meio do método Fracionado Fatorial, o número de combinações é calculado por, 3^{k-1} , uma parte do fracionado completo, portanto, $3^{3-1} = 9$ combinações consideradas, Figura 32, [70].

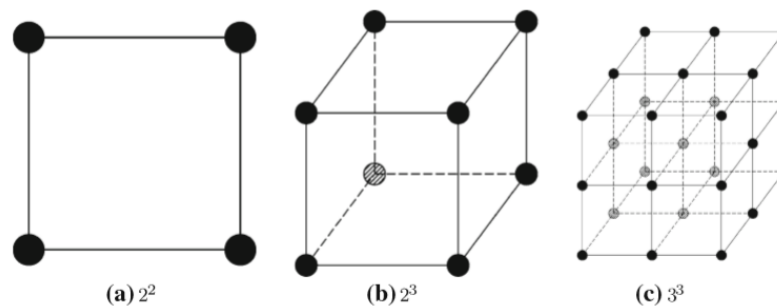


Figura 31 Exemplo de L^k , projeto de experimento Fracionado Completo. [69]

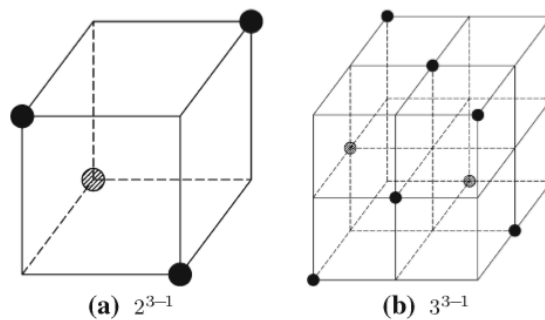


Figura 32 Exemplo do método Fracionado Fatorial. [69]

Deve-se garantir que cada fator deve ter o mesmo número de combinações para cada um dos seus níveis. Isso é observado no cubo da Figura 32 (b), pois em todos os seus planos, ocorre 3 combinações.

Os três níveis de temperatura e umidade relativa do ar utilizados para o método desenvolvido nesta pesquisa foram escolhidos a partir da intersecção de três condições relacionadas ao ensaio: primeiro, quais umidades relativa do ar e temperaturas fornecem o

teor de umidade na madeira adequado a proposta de pesquisa, segundo, aos valores possíveis de T e UR a obter com as câmaras climáticas disponíveis para o ensaio, e por fim, tratando-se de analisar a durabilidade da reação ao fogo em ambientes internos, foram selecionados valores que se adequassem as condições de uso final do material. Para solucionar a primeira condição, foi utilizado os dados fornecidos no *Wood HandBook*, 1999, presentes na tabela que relaciona temperatura e umidade relativa com o teor de água contido na madeira, na Figura 29, como um valor estimado do teor de umidade almejado. Para a segunda, foi consultado as fichas técnicas das duas câmaras climáticas utilizadas. E para a terceira condição, optou-se por valores baixos médios e altos de T e ω , considerando a T média de atuação da madeira 30 ± 3 [°C] e o ω médio da mesma de $7\pm 2\%$.

A Tabela 4 abaixo mostra as variáveis e níveis escolhidos para a aplicar o método acima citado, em que

T representa a temperatura do ensaio [°C],

UR é a umidade relativa do ar, para variar o teor de umidade da madeira no ensaio,

t é o tempo de exposição do material a essas condições, em dias.

Tabela 4 Variáveis e níveis do experimento escolhidos para aplicar ao método Fracionado Fatorial.

Variável	Nível		
	0	1	2
T (°C)	21.1	32.2	87.8
UR (%)	20	50	90
t (dias)	7	14	21

Para definir as combinações necessárias entre os três fatores, mantem-se todas as combinações entre os dois primeiros fatores, no caso, temperatura e umidade relativa do ar. Para definir a combinação destes com o tempo, utiliza-se a equação 5.1, com os valores de 0, 1 e 2 adotados na Tabela 4.

$$t = 3 - MOD_3(T + \omega) \quad 5.1$$

Para exemplificar, para a combinação 3,

Tabela 5, $T = 0$, $UR = 2$, então a soma deles é 2. A função MOD é conhecida como o resto da divisão, neste caso, o resto da divisão por três, que se mantém 2 (por não ser um número inteiro divisível por 3). Portanto, aplicando a equação 5.1,

$$t = 3 - MOD_3(0 + 2) = 1$$

Diante disso, para a combinação 3, adota-se a combinação de T e UR com o tempo $t = 1$, que é de 14 dias. A partir destes cálculos, chegou-se as seguintes combinações:

Tabela 5 Combinações realizadas pelos princípios do Projeto de Experimentos.

Nº de combinações	T (°C)	Fatores UR (%)	t (dias)
1	21.1	20	7
2	21.1	50	21
3	21.1	90	14
4	32.2	20	21
5	32.2	50	14
6	32.2	90	7
7	87.8	20	14
8	87.8	50	7
9	87.8	90	21

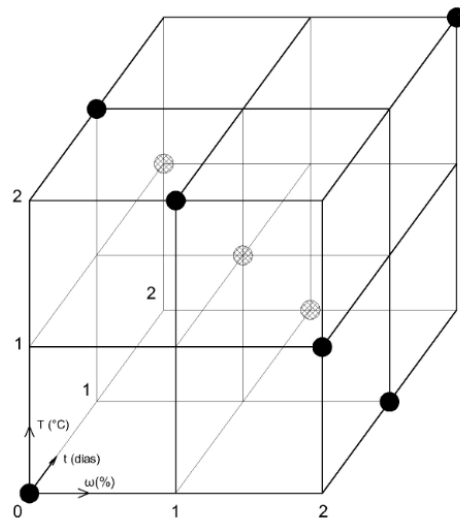


Figura 33 Representação gráfica das combinações dos fatores realizada de acordo com o método Fracionado Fatorial.

Observa-se que na Figura 33 em todos seus planos foi mantida três combinações para cada fator, satisfaz, portanto, os requisitos do método Fracionado Fatorial. De acordo com o Projeto de Experimentos, pode-se afirmar que na região de interesse da pesquisa, as nove combinações acima são suficientes para conhecimento e análise do comportamento dos fatores no ensaio pretendido. Então, com nove combinações e três repetições de cada uma, para cada material, serão necessárias 27 amostras para o experimento de Envelhecimento Acelerado de cada material, Figura 33.

Em comparação aos Métodos A e B, Z1 e Z2 normatizados citados anteriormente, o método de envelhecimento acelerado adotado de acordo com o DOE não possui um ciclo de variações de temperatura e umidade, dentro do tempo estimado, mas um condicionamento em uma determinada combinação destes fatores por um tempo variável, ou seja, de 7, 14 e 21 dias. Isto deve-se ao fato de, neste trabalho o objetivo ser observar o comportamento dos fatores escolhidos na degradação da madeira, de forma isolada, para desenvolver um modelo de previsão da sua durabilidade. A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a metodologia de envelhecimento artificial normatizada, o Método A, Método B da EN 16755/2017, Z1 e Z2, da ETAG 028/2012, com a metodologia elaborada a partir do Método Fracionado Fatorial nesta pesquisa, representando as variações dos fatores de degradação e tempo total.

Tabela 6 Comparação entre os métodos de envelhecimento artificial.

	EN 16755/2017		ETAG 028/2012		Método adotado
	Método A	Método B	Z1	Z2	
Número de ciclos	12	42	10	10	-
Spray de água, h	96	4+4	-	-	-
Descando, h	-	8	-	-	-
Secagem, h	72	4+4+UV	8+16	8+16	-
Temperatura, °C	16+60	32+63	27+23	25+23	21,1/32,2/87,8
Umidade Relativa	0,3 l/min.m ²	12 l/min.m ²	90%+50%	70%+50%	20/50/90 %
Tempo total, semanas	12	6	1,4	1,4	18

Em vista disso, após a realização de todas as combinações propostas neste método de Envelhecimento Acelerado, pode-se aplicar o Modelo de Previsão, TTMS, e assim obter valores próximos da vida útil, relativo à reação ao fogo, da madeira, com ou sem tratamento com retardantes, aplicados em ambientes interiores.

6. Avaliação Experimental da Durabilidade da Reação ao Fogo

6.1. Verificação do Teor de umidade

Uma amostra de madeira em equilíbrio térmico e higroscópico possui sempre uma fração de teor de água, pelo que o conhecimento das condições iniciais das amostras é fundamental para a definição do seu comportamento. O procedimento utilizado para determinar o teor de água segue as especificações da EN 322/1993. Separou-se três amostras de cada material de OSB3, GL e CLT, todas sem retardantes, mediu-se seu peso inicial e foram colocadas no forno com temperatura de 103 [°C]. Após 6 horas, retirou-se as amostras para o dessecador, para arrefecerem, ou seja, até atingirem a temperatura ambiente (cerca de 25 minutos). Pesou-se e foram colocadas novamente no forno. Esse procedimento foi

repetido cinco vezes para o OSB3 e quatro vezes para o GL e o CLT para atingirem a percentagem máxima de 0,1% de variação exigida entre o último e o penúltimo peso medido.



Figura 34 Amostras de OSB3 utilizadas para o teste de secagem.



Figura 35 Amostras de GL utilizadas para o teste de secagem.



Figura 36 Amostras de CLT utilizadas para o teste de secagem.

O forno utilizado é o *Scientific Series 9000*. A balança analítica foi a *Kern ACS 220-4* com precisão de 0,1 [mg].

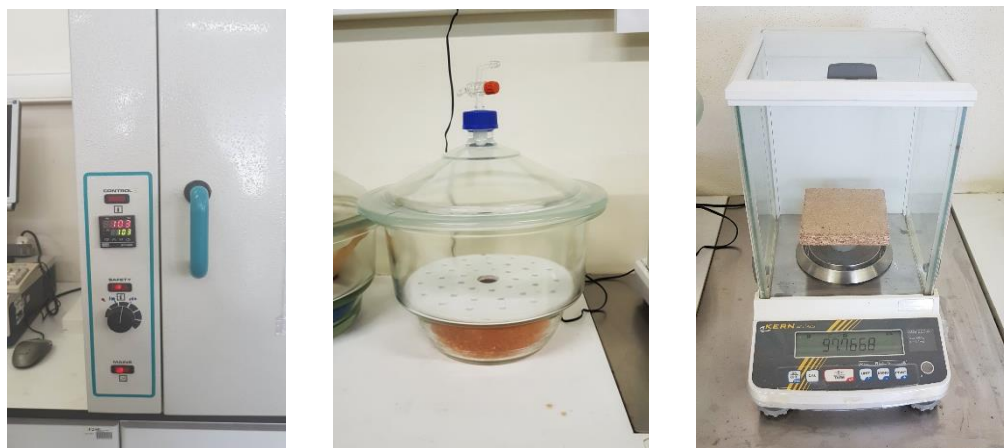


Figura 37. Forno, dessecador e balança analítica utilizados.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no Teste de Secagem, onde o teor de umidade encontrado para o OSB3 foi de 6,33%, para o GL foi de 9,71% e finalmente, o CLT de 8,68%.

Tabela 7 Resultados do Teste de Secagem

Material	Massa úmida¹ [g]	Massa seca² [g]	Teor de Umidade [%]
OSB3	112,4702	105,7758	6,33
GL	265,2	241,73	9,71
CLT	102,1574	93,9972	8,68

¹ Valores obtidos pela média das massas das 3 amostras inicial.

²Valores obtidos pela média das massas das 3 amostras finais, este considerado o último valor obtido quando a diferença entre ele e o anterior pesado, ser abaixo de 0,1%.

6.2. Análise do efeito do retardante

Para o estudo do efeito do retardante de chama foram analisadas diferentes amostras com e sem retardante de chama.

6.2.1. Caracterização das amostras

Para analisar o efeito do verniz ignífugo, utilizou-se três amostras de OSB3, nomeadas apenas como OSB, três amostras de Glulam, nomeadas como GL e mais três amostras do CLT. Todas as amostras utilizadas estavam nas dimensões de 100 x 100 [mm] em largura e comprimento, em sua face principal, e a espessura de acordo com a espessura do próprio painel, para o CLT de 30 [mm], para o OSB de 18 [mm] e para as vigas de GL foi cortada uma espessura de 50 [mm]. A Tabela 8 descreve a nomenclatura utilizada para todas as

amostras desta pesquisa. A Figura 38, Figura 39 e a Figura 40 apresentam as amostras dos materiais utilizadas.

Tabela 8 Descrição da nomenclatura utilizada nas amostras

Nomenclatura das amostras	
Sigla	Descrição
GL	<i>Glued Laminated</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
SE	Sem Envelhecimento Acelerado
CE	Com Envelhecimento Acelerado
SR	Sem Retardante
CR	Com Retardante
T1	Troço 1
S1	Amostra 1



Figura 38 Amostras de CLT antes de receberem o tratamento com o verniz.



Figura 39 Amostras de GL antes de receberem o tratamento com o verniz.



Figura 40 Amostras de OSB antes de receberem o tratamento com o verniz.

6.2.2. Materiais e equipamentos utilizados

A Figura 42 mostra os materiais e equipamentos utilizados nesta etapa. O retardante utilizado foi um verniz ignífugo Ref.^a 306 da Matesica, um retardador de propagação da chama, Classe I (Norma BS 476) de acordo com a fabricante, (a), solvente para limpeza, (b), uma trincha para passar o verniz, (c), um suporte com superfície perfeitamente plana, para ajustar a espessura de 1 [mm], (d), para garantir a espessura de 1 [mm] do verniz, utilizou-se de um calibre com uma espessura de 1 [mm], (e), fôrmas metálicas em formato quadrangular, (f) e chave de boca número 8, (g).

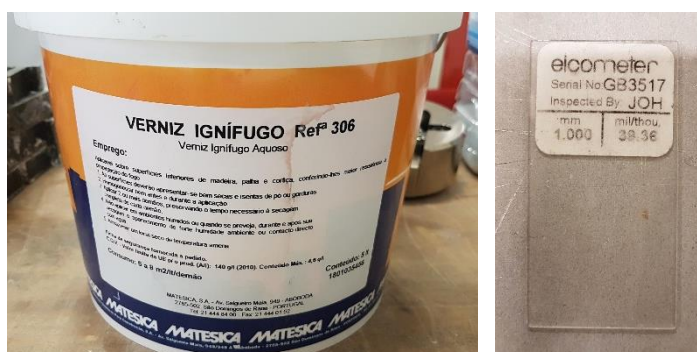


Figura 41 Verniz ignífugo utilizado, à esquerda, e o calibre de 1 [mm] utilizada, à direita.

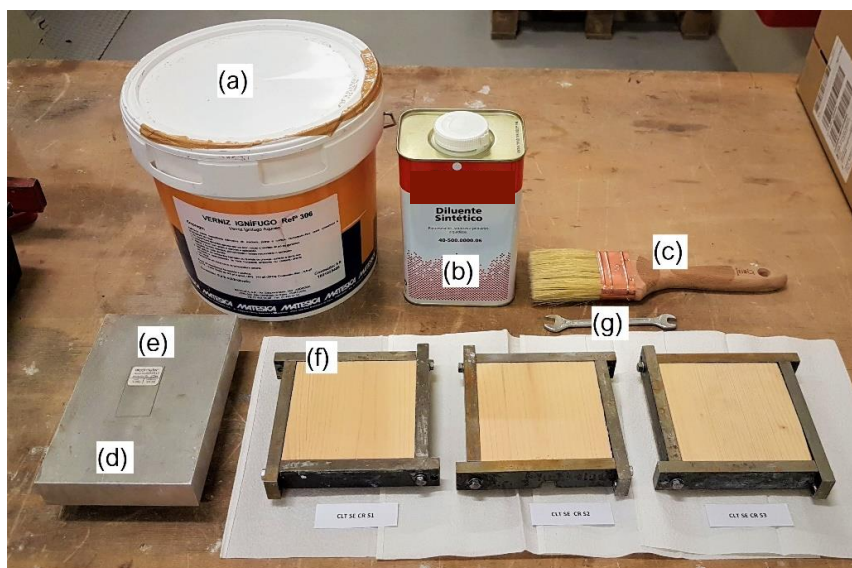


Figura 42 Materiais utilizados para a passagem de verniz.

6.2.3. Método de aplicação

A princípio foi ajustado as fôrmas metálicas ao redor das amostras de madeira, através do calibre de 1 [mm] e o suporte de superfície plana, de forma que elas ficassem 1 [mm] de espessura acima da face das amostras. Então iniciou-se a passagem do verniz, o qual foi pincelado em 3 amostras de cada material, até atingir a espessura de 1 [mm]. Foi pintado apenas uma face superior, a qual escolheu-se a face mais regular e com menos defeito dos materiais. Para que atingisse a espessura de 1 [mm] foi necessário passar 4 demãos de verniz. Entre cada demão houve um intervalo de 3-4 horas, conforme as recomendações do fabricante do verniz. Após atingirem a espessura desejada, retirou-se as fôrmas metálicas. Todas as amostras foram pesadas antes e após esse processo.



Figura 43 Exemplo de amostras com o verniz ainda molhado, à esquerda, e seco, à direita.



Figura 44 Resultados da espessura de 1 [mm] nos materiais.

6.1. Envelhecimento Acelerado

6.1.1. Ensaio de Envelhecimento acelerado

Para realizar o envelhecimento acelerado das amostras, seguiu-se o projeto realizado de acordo com a metodologia *DOE*. Considerando o longo período de tempo necessário para desenvolver completamente este plano experimental, o trabalho apresentado neste estudo aborda parcialmente o conjunto de testes de exposição climática, e avalia os resultados dos testes experimentais de reação ao fogo. São realizadas as combinações contidas no primeiro plano do método fracionado fatorial, combinação 1, 6 e 8, das quais o tempo de exposição é de sete dias por combinação, totalizando três combinações.

Tabela 9 Combinações realizadas.

Fator	C1	C6	C8
<i>T</i> (°C)	21,1	32,2	87,8
<i>UR</i> (%)	20	90	50
<i>T</i> (dias)	7	7	7

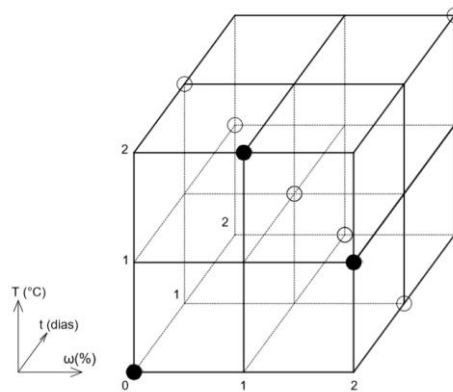


Figura 45 Combinações realizadas neste trabalho.

6.1.2. Câmaras Climáticas

Duas câmaras climáticas foram utilizadas para o envelhecimento artificial, para otimizar o tempo, a câmara climática ambiental ACS DM600 da Discovery, que pode ser utilizada para diversas aplicações, a umidade relativa em seu interior pode variar entre 10 a 98 [%] e a temperatura de 10 a 95 [°C], além de possuir um sistema *MyKratos* ligado ao computador ou *tablet* para auxiliar o usuário no controle de ciclos automáticos, [71]. A outra câmara climática ambiental é a HCP 108 da Memmert, que também pode ser utilizada para diversas aplicações, a umidade relativa em seu interior pode variar entre 20 a 95 [%] e da temperatura da ambiente até a 90 [°C], [72].

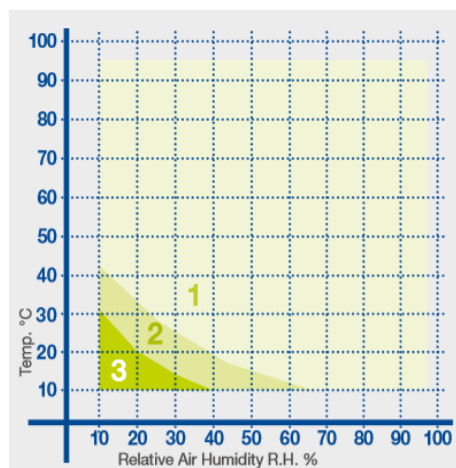


Figura 46 Os valores possíveis de temperatura e umidade relativa do ar para a ACS DM600 da Discovery [71].

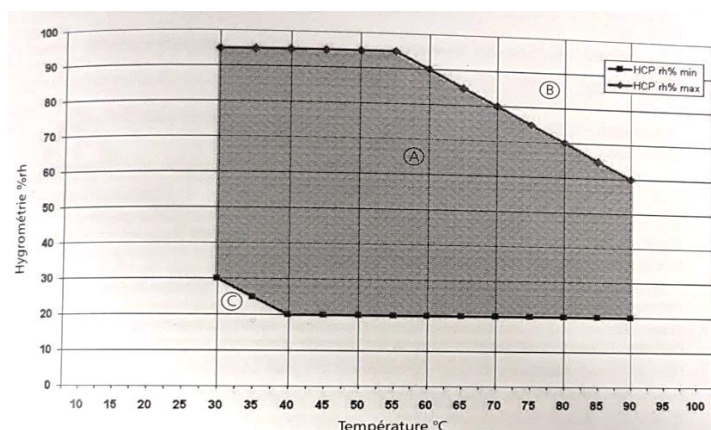


Figura 47 Os valores possíveis de umidade relativa do ar e temperatura para a HCP 108 da Memmert, [72].



Figura 48 Câmara Climática, HCP 108 da Memmert, utilizada a esquerda. Câmara Climática, DM600 da Discovery, utilizada a direita.

6.1.3. Caracterização das amostras para o Envelhecimento Acelerado

Foram utilizadas amostras de Glulam, CLT e OSB para o Envelhecimento Acelerado. Estas foram isoladas na seção transversal de corte, com adesivo impermeabilizante, antes de serem condicionadas nas câmaras, como na Figura 49, para que a face do material exposta ao envelhecimento acelerado fosse mais próxima do envelhecimento natural quando o material estiver exposto na edificação. A Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 descrevem a caracterização de cada amostra submetida em cada combinação do envelhecimento artificial.

Tabela 10 Caracterização das amostras de Glulam utilizadas no Envelhecimento Acelerado.

Amostra	Massa (g)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Tratamento realizado
GL CE SR T1	3100,00	200,00	340,00	100,00	Combinação 1
GL CE SR T2	2832,10	200,00	335,00	100,00	Combinação 6
GL CE SR T3	2976,60	200,00	335,00	100,00	Combinação 8

Tabela 11 Caracterização das amostras de CLT utilizadas no Envelhecimento Acelerado.

Amostra	Massa (g)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Tratamento realizado
CLT CE SR S1	158,92				
CLT CE SR S2	149,02	30,00	100,00	100,00	Combinação 1
CLT CE SR S3	153,02				
CLT CE SR S4	141,51				
CLT CE SR S5	148,30	30,00	100,00	100,00	Combinação 6
CLT CE SR S6	133,78				
CLT CE SR S7	135,65				
CLT CE SR S8	142,56	30,00	100,00	100,00	Combinação 8
CLT CE SR S9	144,38				

Tabela 12 Caracterização das amostras de OSB utilizadas no Envelhecimento Acelerado.

Amostra	Massa (g)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Tratamento realizado
OSB CE SR T1	423,90	18,00	330,00	120,00	Combinação 1
OSB CE SR T2	511,60	18,00	330,00	120,00	Combinação 6
OSB CE SR T3	496,40	18,00	330,00	120,00	Combinação 8



Figura 49 Exemplo de amostras preparadas para o Envelhecimento Acelerado.

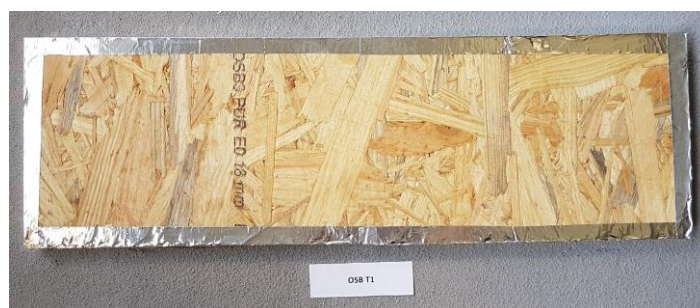


Figura 50 Exemplo das amostras de OSB utilizada no Envelhecimento Acelerado.



Figura 51 Exemplo das amostras de CLT utilizada no Envelhecimento Acelerado.

6.1.1. Procedimento do ensaio de Envelhecimento Acelerado

Todas as amostras foram imediatamente pesadas antes e depois de serem condicionadas. Colocadas as madeiras dentro das câmaras climáticas, estas foram fechadas e não abertas até o término dos sete dias de ensaios. A combinação 1 foi realizada na ACS DM600 da Discovery e as combinações 6 e 8 foram realizadas na HCP 108 da Memmert.



Figura 52 Amostras dentro da câmara DM600 da Discovery.



Figura 53 Amostras dentro da câmara HCP 108 da Memmert.

Durante os sete dias de exposição foi detectado variações nas câmaras climáticas. Na combinação 1, a DM600 da Discovery foi programada para trabalhar na temperatura de 21,1 [°C] e 20% de UR, todavia, nas observações ao longo do ensaio, notou-se que a UR média foi de 28%. Sendo assim, o teor de água, de acordo com a tabela do *Wood Handbook*, Figura 29, era não mais de 4,5%, mas de, aproximadamente, 5,7 %.

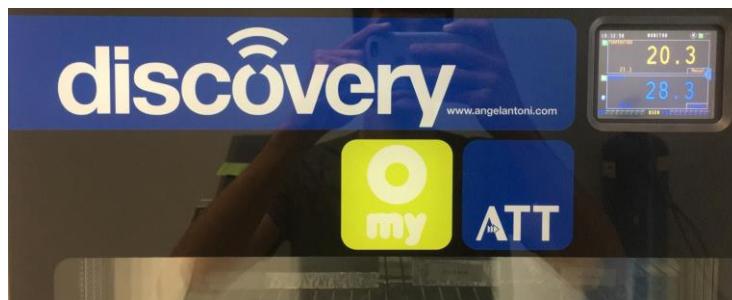


Figura 54 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 1.

Na HCP 108 da Memmert, a combinação 8, a princípio foi definida com temperatura de 87,8 [°C] e umidade relativa de 50%, entretanto, ao longo do ensaio, observou-se que a umidade relativa média encontrava-se em 47%. Portanto, de acordo com a mesma tabela, Figura 29, o teor de água contido nas amostras era não mais de 7,5%, mas de, aproximadamente, 6,1%.



Figura 55 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 8.

Na combinação 6, a HCP 108 da Memmert foi programada para a temperatura de 32,2 [°C] e 90% de umidade relativa, as quais foram mantidas ao longo dos sete dias, com pequenas variações de ± 2 [°C].



Figura 56 Condição média da câmara climática obtidas para a Combinação 6.

Por fim, as massas medidas antes e após serem condicionadas nas combinações, realizadas com o princípio do *Design of Experiments*, as condições climáticas realizadas em cada amostra e a taxa de variação da massa inicial para a final, encontram-se na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 abaixo:

Tabela 13 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 1.

Combinação 1: T = 21,1 [°C] e UR = 28 %			
Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Taxa de variação de massa
CLT CE SR S1	149,02	147,72	-0,87
CLT CE SR S2	158,92	157,56	-0,86
CLT CE SR S3	153,02	153,86	-0,84
GL T1	3100,00	3079,00	-0,68
OSB T1	423,90	418,60	-1,25

Tabela 14 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 8.

Combinação 8: T = 87,8 [°C] e UR = 47 %			
Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Taxa de variação de massa
CLT CE SR S4	141,51	139,72	-1,26
CLT CE SR S5	148,3	146,4	-1,28
CLT CE SR S6	133,78	132,1	-1,26
GL T2	2832,1	2714,2	-4,16
OSB T2	511,6	506,4	-1,02

Tabela 15 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, dados da combinação 6.

Combinação 6: T = 32,2[°C] e UR = 90 %			
Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Taxa de variação de massa
CLT CE SR S7	135,65	142,84	5,30
CLT CE SR S8	142,56	149,78	5,06
CLT CE SR S9	144,38	151,95	5,24
GL T3	2976,6	3092,3	3,89
OSB T3	500	529,1	5,82

As amostras, após o envelhecimento acelerado, foram utilizadas para o estudo de reação ao fogo, pelo teste de Calorímetro de Cone. A variação de massa encontrada foi utilizada para encontrar o teor de umidade efetivo durante o condicionamento nas combinações de cada amostra, Tabela 16. Adotou-se que, a variação de massa foi devido a variação de umidade da madeira, pois não houve perda de material durante o ensaio.

Tabela 16 Teor de umidade efetivo nas amostras durante o envelhecimento acelerado.

Material	Teor de Umidade inicial	Combinação	Teor de Umidade <i>Wood Handbook</i>	Variação de massa	Teor de Umidade efetivo
Glulam	9,77%	C1	5,70%	-0,68%	9,09%
	9,77%	C6	6,10%	-4,16%	5,61%
	9,77%	C8	19,80%	3,89%	13,66%
CLT	8,68%	C1	5,70%	-0,85%	7,83%
	8,68%	C6	6,10%	-1,27%	7,41%
	8,68%	C8	19,80%	5,20%	13,88%
OSB	6,33%	C1	5,70%	-1,25%	5,08%
	6,33%	C6	6,10%	1,02%	7,35%
	6,33%	C8	19,80%	5,82%	12,15%

6.2. Estudo da reação ao fogo

6.2.1. Ensaio do Calorímetro de Cone

O Calorímetro de Cone é um equipamento para realizar testes de pequena escala da reação ao fogo dos materiais, normatizado pela ISO 5660-1/2002, que especifica um método para avaliar a Taxa de Liberação de Calor (*HRR*) de uma amostra exposta na orientação horizontal a níveis controlados de irradiância com um dispositivo de ignição externo. A taxa de libertação de calor é determinada pela medição do consumo de oxigênio. O Tempo de Ignição, Perda de Massa (*ML*) e Calor Total Libertado (*THR*), também é medido neste teste, [73].



Figura 57 Equipamento Calorímetro de Cone utilizado nos ensaios.

Este método de teste baseia-se na observação de que, geralmente, o calor líquido de combustão é proporcional à quantidade de oxigênio necessária para a combustão. A relação é, aproximadamente, de calor libertado por quilograma de oxigênio consumido. As amostras no teste entram em combustão sob condições de ar ambiente, enquanto estão sujeitas a uma irradiância externa predeterminada dentro da faixa de medições, as quais são feitas de concentrações de oxigênio e taxas de fluxo de gás de exaustão. Portanto, antes de iniciar os testes, deve ser realizado a calibração do equipamento, de acordo as recomendações inscritas na ISO 5660-1/2002 e na ficha técnica de seu fabricante, [73].

Para ensaios desta pesquisa, o Calorímetro de Cone utilizado foi o do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, o qual foi ajustado para um fluxo de calor irradiante constante de 50 [kW/m²] e com a face a ser exposta das amostras a uma distância de 25 [mm] do cone de acordo com o item 5.2 da EN 16755 para teste em pequena escala. No início dos testes, realizou-se a calibragem do equipamento.

Ao todo, foram ensaiadas 45 amostras, 15 de cada material. A Figura 58 apresenta todas as amostras após o Teste de Calorímetro de Cone, na qual, a primeira linha da imagem são as três amostras sem retardante e sem envelhecimento, a segunda linha, as amostras com

retardante, a terceira, as amostras envelhecidas na combinação 1, a quarta linha refere-se as amostras envelhecidas na combinação 6 e por fim, a quinta linha, as amostras envelhecidas na combinação 8.



Figura 58 Amostras de Glulam, CLT e OSB, respectivamente, ensaiadas no Calorímetro de Cone.

6.2.2. Caracterização das amostras e procedimento do ensaio

Todas as amostras foram cortadas as 100 [mm] de largura por 100 [mm] de comprimento, conforme as especificações da ISO 5660-1/2002. As Tabela 17,

Tabela 18 e Tabela 19 contém todas as amostras utilizadas, com suas respectivas dimensões e tratamentos. As massas presentes nessas tabelas são referentes as massas das amostras no início do teste. O material foi condicionado, em média 36 horas, à 23 ± 2 [°C] e $50\pm 5\%$ de Umidade Relativa, antes do teste de reação ao fogo.

Tabela 17 Caracterização das amostras de Glulam usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.

Amostras	Massa (g)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Tratamento realizado
GL SE SR S1	232,10				
GL SE SR S2	228,40	50	100	100	Sem tratamento
GL SE SR S3	222,10				
GL SE CR S1	230,50				
GL SE CR S2	212,20	50	100	100	Com Retardante
GL SE CR S3	212,10				
GL CE SR S1	232,90				Com
GL CE SR S2	285,00	50	100	100	Envelhecimento, Combinação 1
GL CE SR S3	225,10				
GL CE SR S4	233,89				Com
GL CE SR S5	235,22	50	100	100	Envelhecimento, Combinação 6
GL CE SR S6	231,47				
GL CE SR S7	242,10				Com
GL CE SR S8	224,90	50	100	100	Envelhecimento, Combinação 8
GL CE SR S9	253,40				

Tabela 18 Caracterização das amostras de CLT usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.

Amostras	Massa (g)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Tratamento realizado
CLT SE SR S1	144,90				
CLT SE SR S2	146,70	30	100	100	Sem tratamento
CLT SE SR S3	136,60				
CLT SE CR S1	148,75				
CLT SE CR S2	162,86	30	100	100	Com Retardante
CLT SE CR S3	157,60				
CLT CE SR S1	156,00				Com
CLT CE SR S2	146,00	30	100	100	Envelhecimento, Combinação 1
CLT CE SR S3	141,51				
CLT CE SR S4	140,59				Com
CLT CE SR S5	147,34	30	100	100	Envelhecimento, Combinação 6
CLT CE SR S6	133,02				
CLT CE SR S7	138,70				Com
CLT CE SR S8	145,50	30	100	100	Envelhecimento, Combinação 8
CLT CE SR S9	147,60				

Tabela 19 Caracterização das amostras de OSB usadas nos ensaios do Calorímetro de Cone.

Amostras	Massa (g)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Tratamento realizado
OSB SE SR S1	104,88				
OSB SE SR S2	107,63	18	100	100	Sem tratamento
OSB SE SR S3	110,96				
OSB SE CR S1	121,78				
OSB SE CR S2	121,39	18	100	100	Com Retardante
OSB SE CR S3	120,13				
OSB CE SR S1	104,30				Com
OSB CE SR S2	104,00	18	100	100	Envelhecimento, Combinação 1
OSB CE SR S3	104,10				
OSB CE SR S4	108,88				Com
OSB CE SR S5	111,10	18	100	100	Envelhecimento, Combinação 6
OSB CE SR S6	107,92				
OSB CE SR S7	113,80				Com
OSB CE SR S8	109,20	18	100	100	Envelhecimento, Combinação 8
OSB CE SR S9	111,10				

A procedimento para preparação das amostras antes de cada ensaio, consistia primeiro a caracterização, com pesagem e identificação das amostras, depois, envolvidas em alumínio para então serem colocadas na porta amostra. Em seguida iniciava-se o ensaio, conforme os procedimentos descritos na ISO 5660-1/2002, a amostra era exposta ao fluxo de calor constante calibrado, em 767 [°C], com um ignitor para instigar a combustão do material. O tempo em que a amostra era exposta ao calor até ela entrar em combustão é o Tempo de Ignição, o qual era registrado no *software* do equipamento. Durante o ensaio também se registrou a Taxa de Libertação de Calor e perda de massa da amostra. O ensaio era encerrado após o *flameout* e a estabilização da perda de massa. A Figura 59 descreve o procedimento realizado para a amostra de OSB SE SR S1, o qual se repete por todas as amostras. Na figura encontra-se um esquema em corte do material na porta amostra, com o substrato em fibra cerâmica.

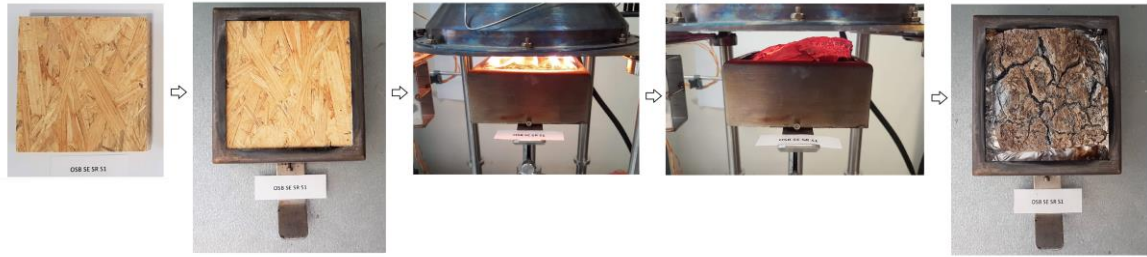


Figura 59 Etapas da amostra no teste de Calorímetro de Cone.

Na Figura 60 encontra-se um esquema em corte do material na porta amostra, com o substrato em fibra cerâmica, recebendo o fluxo de calor (q), que representa as amostras com retardante, ou seja, com uma camada de 1 [mm] de verniz ignífugo na face exposta ao q . Na

Figura 61 encontra-se o mesmo esquema em corte do material na porta amostra, também com o substrato em fibra cerâmica, recebendo o fluxo de calor, que representa as amostras sem tratamento, e as com o Envelhecimento Acelerado.

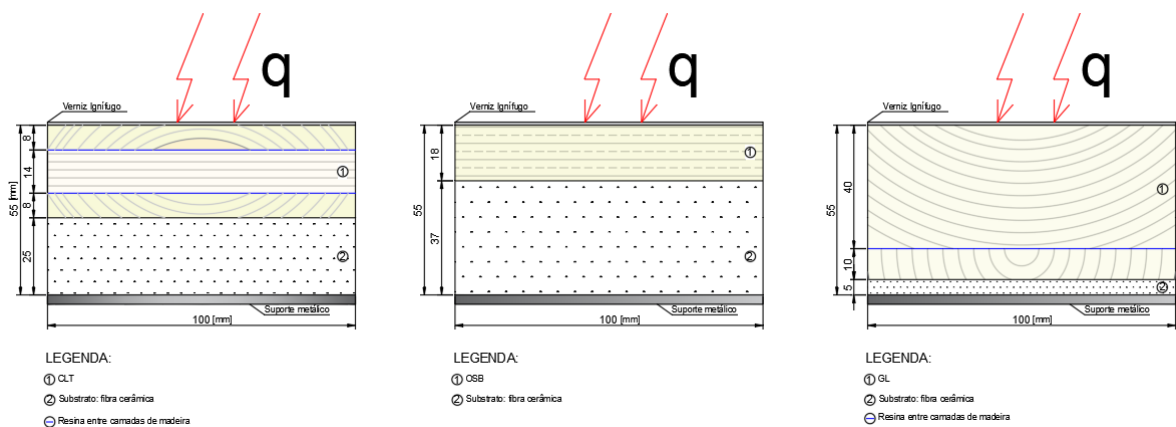


Figura 60 Desenho esquemático do material com retardante na porta amostra durante o ensaio.

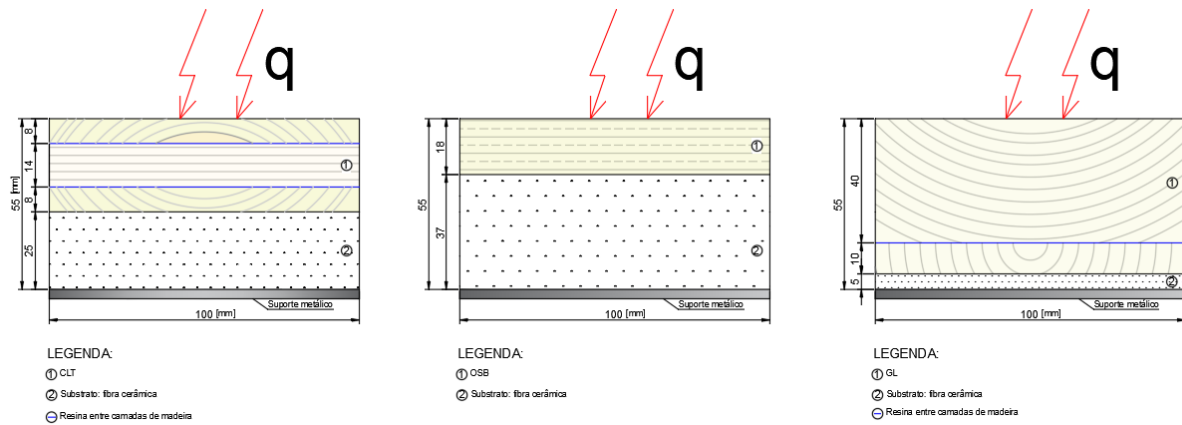


Figura 61 Desenho esquemático do material sem tratamento ou com Envelhecimento Acelerado, na porta amostra durante o ensaio

6.2.3. Resultados dos testes realizados no Calorímetro de Cone para o tratamento com retardante

A Tabela 20, Tabela 21 e a Tabela 22 relatam o T_{ing} , em segundos, para cada amostra de Glulam, CLT e OSB, sem e com o verniz ignífugo, assim como o valor de pico encontrado na HRR [W/m^2], o valor máximo de THR [MJ/m^2] e a massa residual [g] dos mesmos.

Tabela 20 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de Glulam, sem e com retardante.

Amostras	T_{ing} (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m^2)	$THR_{máx}$ (MJ/m^2)	Perda de Massa (%)
GL SE SR S1	35	240,54	243,63	91%
GL SE SR S2	28	185,20	463,49	92%
GL SE SR S3	45	135,37	135,69	94%
GL SE CR S1	37	149,77	-	93%
GL SE CR S2	21	371,12	205,38	93%
GL SE CR S3	23	359,34	463,82	93%

Tabela 21 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de CLT, sem e com retardante.

Amostras	T_{ing} (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m²)	$THR_{máx}$ (MJ/m²)	Perda de Massa (%)
CLT SE SR S1	34	118,42	102,63	94%
CLT SE SR S2	23	117,36	100,06	94%
CLT SE SR S3	20	108,90	95,20	96%
CLT SE CR S1	16	192,77	149,01	90%
CLT SE CR S2	19	174,07	132,73	89%
CLT SE CR S3	17	158,76	148,54	91%

Tabela 22 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de OSB, sem e com retardante.

Amostras	T_{ing} (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m²)	$THR_{máx}$ (MJ/m²)	Perda de Massa (%)
OSB SE SR S1	38	180,96	103,12	83%
OSB SE SR S2	36	167,38	65,10	80%
OSB SE SR S3	43	175,08	95,80	81%
OSB SE CR S1	19	155,56	110,45	83%
OSB SE CR S2	19	185,22	68,97	83%
OSB SE CR S3	24	157,29	69,12	84%

Os gráficos de todas as amostras encontram-se anexados a pesquisa. A Taxa de Libertação de Calor encontra-se no Anexo A1, Calor Total Libertado no Anexo A2 e Perda de Massa no Anexo A3. Todos resultantes dos ensaios com o calorímetro de Cone.

Para o Glulam é possível observar que houve um aumento do HRR, das amostras com o retardante em comparação as amostras sem o retardante, no início do processo, quando a maior parte da combustão se deve a queima da camada inicialmente exposta ao calor, a do verniz, ao mesmo tempo que houve uma produção de fumo mais densa, de cor escura e forte odor. Entretanto, no restante do ensaio, o HRR das amostras com o verniz, em geral, apresentou-se menor do que o HRR das amostras sem o verniz, como é possível observar na Figura 62.

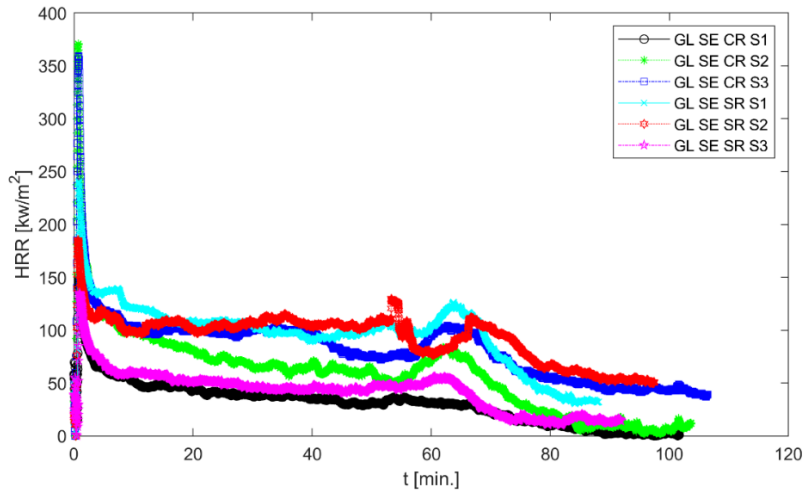


Figura 62 Taxa de Libertação de Calor das amostras de Glulam sem e com retardante.

As amostras com retardante do CLT também apresentaram maior pico de HRR no início do ensaio, em comparação as amostras de CLT sem retardante. Porém, no decorrer do ensaio, o HRR das amostras com retardante também se apresentaram menor que o HRR das amostras sem o verniz, em geral. Ainda é possível observar, em todas as amostras de CLT, próximo aos 8 e 26 minutos de ensaio houve um aumento considerável na liberação de calor, provavelmente nesse momento a combustão ocorreu nas duas camadas de resina que unia uma camada a outra de madeira do CLT,

Figura 63.

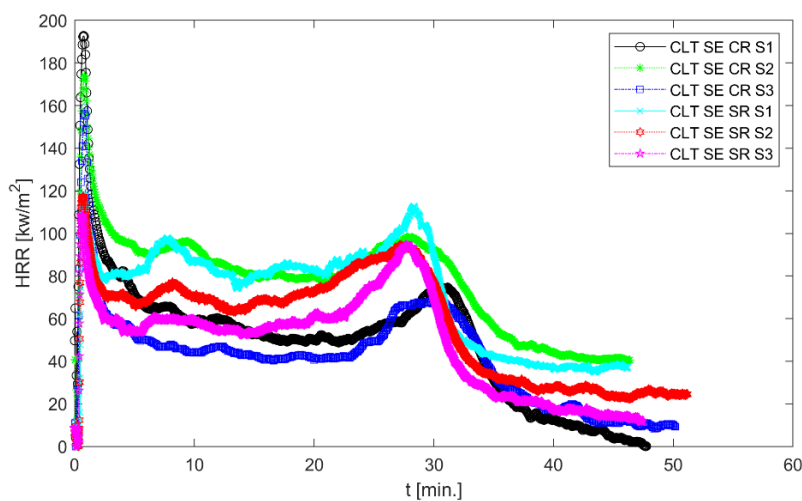


Figura 63 Taxa de Libertação de Calor das amostras de CLT sem e com retardante.

No OSB, as amostras com o verniz ignífugo apresentaram um valor de HRR, no início do ensaio, similar ao valor de HRR no mesmo intervalo das amostras sem retardante. Assim como os outros materiais, o HRR ao longo da combustão foi menor para as amostras com o verniz do que as amostras sem o verniz, Figura 64.

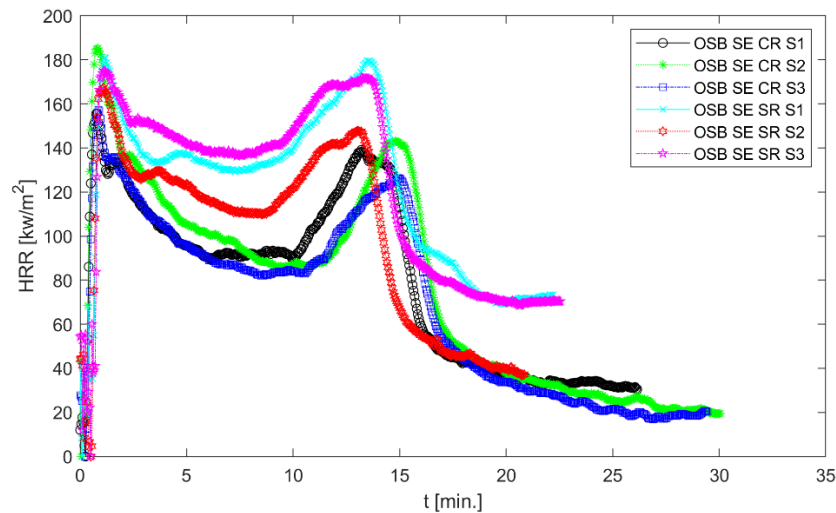


Figura 64 Taxa de Libertação de Calor das amostras de OSB com e sem retardante.

O Calor Total Libertado para as amostras de OSB apresentou-se maior, na maioria dos casos, para as amostras sem o verniz ignífugo, Figura 65. A relação entre a massa inicial e a massa final das amostras de OSB com e sem retardante estão presente na Figura 66.

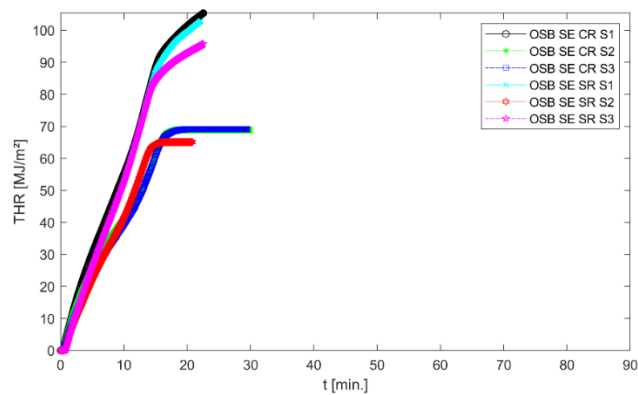


Figura 65 Calor Total Libertado (THR) das amostras de OSB sem e com retardante.

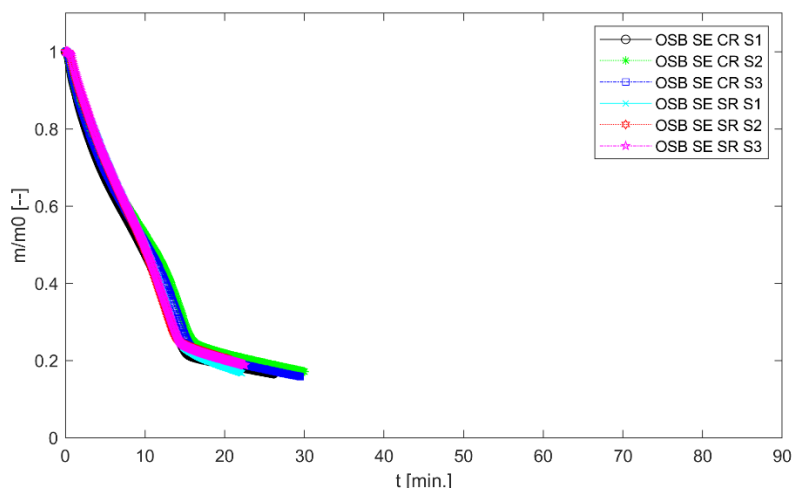


Figura 66 Fração de perda de massa das amostras de OSB sem e com retardante.

6.2.4. Resultados dos testes realizados no Calorímetro de Cone para o Envelhecimento Acelerado

A Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 relatam o T_{ing} , em segundos, para cada amostra de Glulam, CLT e OSB, sem e com o Envelhecimento Acelerado, assim como o valor de pico encontrado na HRR [W/m^2], o valor máximo de THR [MJ/m^2] e a massa residual [g] dos mesmos.

Tabela 23 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de GL, sem e com Envelhecimento Acelerado.

Amostras	Tempo de ignição (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m^2)	THR (MJ/m^2)	Perda de Massa (%)
GL SE SR S1	35	240,54	243,63	91%
GL SE SR S2	28	185,20	463,49	92%
GL SE SR S3	45	135,37	135,69	94%
GL CE SR S1	32	119,54	-	92%
GL CE SR S2	39	130,05	191,29	89%
GL CE SR S3	48	101,02	191,17	91%
GL CE SR S4	31	117,37	-	91%
GL CE SR S5	24	100,43	206,29	92%
GL CE SR S6	33	122,39	236,46	92%
GL CE SR S7	34	127,10	-	89%
GL CE SR S8	24	118,48	240,61	92%
GL CE SR S9	24	116,87	239,34	88%

Tabela 24 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de CLT, sem e com Envelhecimento Acelerado.

Amostras	Tempo de ignição (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	Perda de Massa (%)
CLT SE SR S1	34	118,42	102,63	94%
CLT SE SR S2	23	117,36	100,06	94%
CLT SE SR S3	20	108,90	95,20	96%
CLT CE SR S1	25	74,24	-	90%
CLT CE SR S2	34	81,63	-	90%
CLT CE SR S3	26	129,20	65,06	92%
CLT CE SR S4	17	107,00	94,79	88%
CLT CE SR S5	23	105,89	87,13	86%
CLT CE SR S6	32	105,78	77,60	85%
CLT CE SR S7	26	105,50	54,64	92%
CLT CE SR S8	28	68,55	17,57	92%
CLT CE SR S9	40	95,38	40,55	91%

Tabela 25 Resultado do Tempo de ignição, $HRR_{máx}$, $THR_{máx}$ e Perda de Massa das amostras de OSB, sem e com Envelhecimento Acelerado.

Amostras	Tempo de ignição (s)	$HRR_{máx}$ (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	Perda de Massa (%)
OSB SE SR S1	38	180,96	103,12	83%
OSB SE SR S2	36	167,38	65,10	80%
OSB SE SR S3	43	175,08	95,80	81%
OSB CE SR S1	30	216,22	88,70	81%
OSB CE SR S2	41	175,67	58,12	84%
OSB CE SR S3	26	160,14	84,91	81%
OSB CE SR S4	29	166,39	87,34	84%
OSB CE SR S5	37	166,67	87,41	85%
OSB CE SR S6	36	144,05	71,19	83%
OSB CE SR S7	53	166,98	-	88%
OSB CE SR S8	28	159,87	88,08	98%
OSB CE SR S9	44	167,34	88,57	90%

Nota-se que alguns dados do Calor Total Libertado se encontram ausentes, isso deve-se a alguma falha no output do software do equipamento Calorímetro de Cone utilizado. Os ensaios das amostras CLT CE SR S1, CLT CE SR S2, CLT CE SR S3, CLT CE SR S7, CLT CE SR S8, CLT CE SR S9 e ainda as amostras OSB CE SR S1, OSB CE SR S2 E OSB CE SR S3 foram realizados no mesmo dia, e após, foi identificado uma avaria no equipamento, o qual foi reajustado.

Para o CLT, as amostras envelhecidas apresentaram um leve decréscimo de HRR em relação as não envelhecidas, de 17% no caso da combinação 1, Figura 67. Para o material GL, todas as amostras envelhecidas (combinação 1, combinação 6 e combinação 8) tiveram uma diminuição no HRR, em comparação as amostras não envelhecidas de, entre 30 e 40%, como exemplificado na Figura 68.

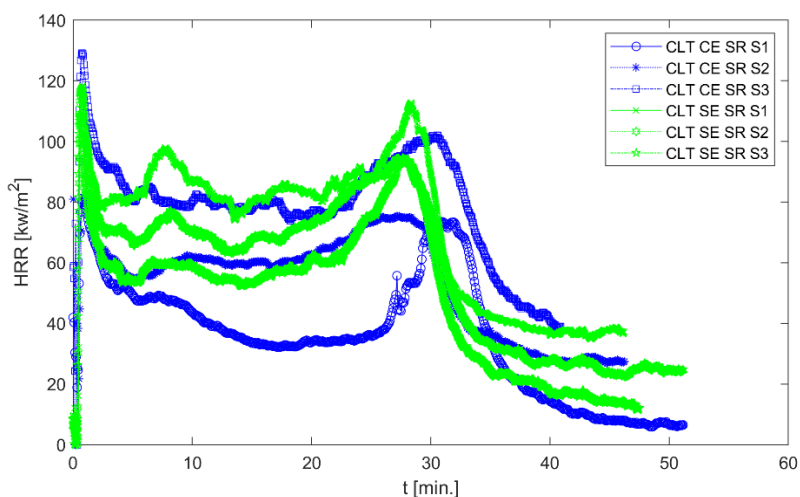


Figura 67 Taxa de Liberação de Calor das amostras de CLT sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 1.

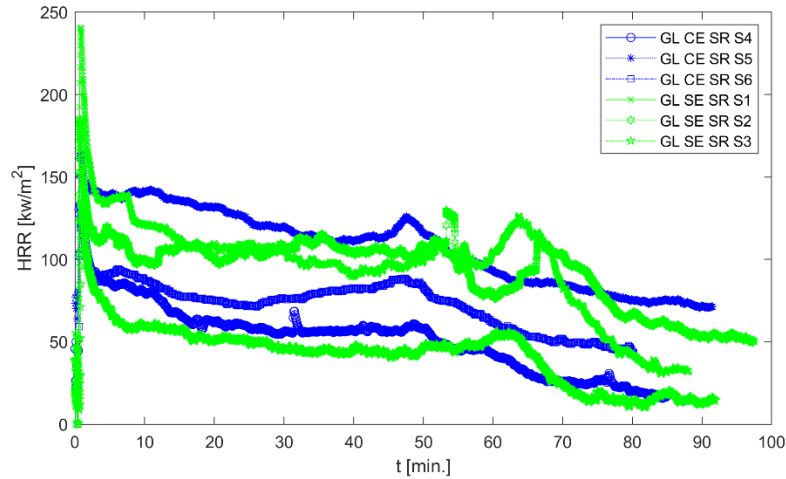


Figura 68 Taxa de Libertação de Calor das amostras de GL sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 6.

As amostras de OSB apresentaram pouco decréscimo no HRR de pico em relação as não envelhecidas, Figura 69. O Calor Total Libertado das amostras de OSB com o envelhecimento combinação 1, combinação 6 e combinação 8, apresentou uma queda de, aproximadamente, 12%, 7% e 33%, respectivamente, em relação ao THR das amostras não envelhecidas, Figura 70.

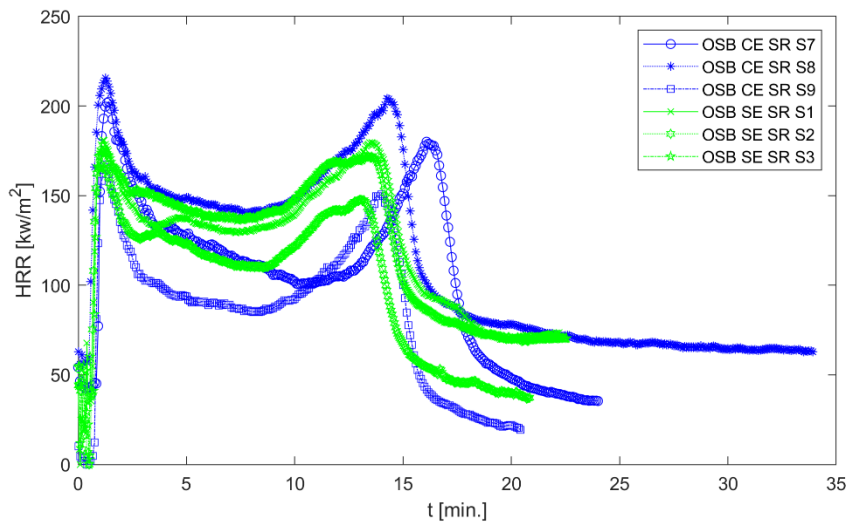


Figura 69 Taxa de Libertação de Calor das amostras de OSB sem envelhecimento e envelhecidas na combinação 8.

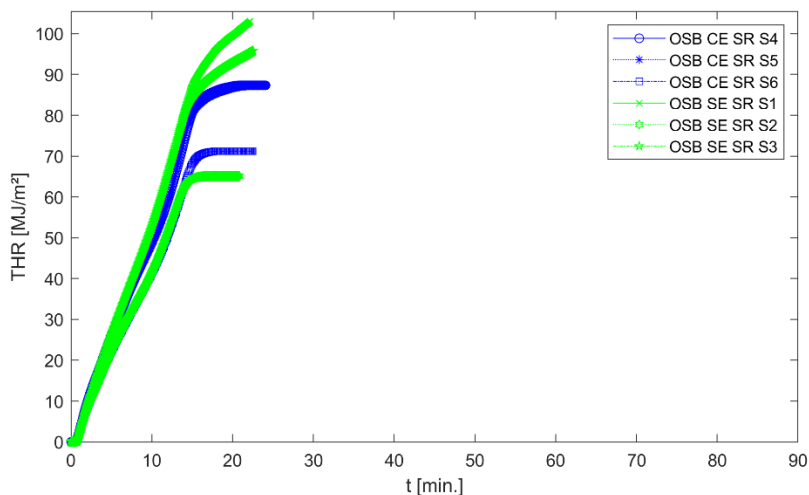


Figura 70 Calor Total Libertado do OSB sem envelhecimento e com envelhecimento pela combinação 6.

A partir desses resultados é possível observar que, durante o tempo de exposição das amostras no Envelhecimento Acelerado, com as alterações de temperatura e umidade, houve possível libertação de alguns compostos orgânicos voláteis, principalmente das resinas presentes no Glulam, CLT e OSB, que baixaram sua contribuição para a combustão dos materiais. Como por exemplo, o Calor Total Libertado em algumas amostras, como no CLT envelhecido na combinação 8, que foi observado um decréscimo de até 60%.

7. Conclusões e trabalhos futuros

7.1. Conclusões gerais

Esta pesquisa propõe um modelo de análise da durabilidade da reação ao fogo, da madeira e painéis de madeira, com ou sem o tratamento com retardantes, para fins de uso em ambientes internos e assim, com o apoio de demais pesquisas na área, propor um complemento para a norma EN 16755/2017, que define os testes necessários para avaliar a durabilidade da reação ao fogo dos produtos usados em ambiente externo, na construção civil, mas não nos internos.

A proposta tem como base o uso do Modelo de Previsão, com a teoria do *Time Temperature Moisture Superposition*, através de uma equação que relaciona a degradação do material, após o Envelhecimento Acelerado, com a taxa de reação de *Arrhenius*, e assim procura prever a durabilidade do material, ou seja, o tempo necessário para a manutenção ou substituição do produto no edifício, a qual poderá ser aplicada após a realização de todas as combinações propostas para o envelhecimento acelerado.

O Método de Envelhecimento Acelerado utilizado foi elaborado a partir dos princípios estatísticos do Projeto de Experimentos, por meio do Método Fracionado Fatorial, que otimiza a quantidade de ensaios em um experimento. Os parâmetros mais influentes na degradação da madeira analisados foi a temperatura, o teor de água contido nela, e ainda, o efeito do tempo. Para avaliar os efeitos dos três fatores foram definidos três níveis para cada fator e combinações entre eles. Chegou-se a nove combinações totais, das quais realizou-se três.

Os materiais utilizados para analisar o tema proposto foi a Madeira Laminada Colada (GL), a Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) e o OSB, as duas primeiras como um tipo

de madeiras sólidas e a última como um tipo de painel derivado de madeira. Todas tiveram amostras em cada combinação de Envelhecimento Acelerado.

Afim de proteger contra as intempéries e melhorar a reação ao fogo dos materiais, o uso de produtos retardantes do fogo tem se desenvolvido. Visto isso, para avaliar o comportamento das tintas e vernizes ignífugos, realizou-se o teste de reação ao fogo em amostras de cada material sem e com o tratamento de um verniz ignífugos.

Para observar a reação ao fogo de todas as madeiras e tratamentos empregados na pesquisa, foi realizado o Teste Calorímetro de Cone, normatizado pela ISO 5660-1, do qual foi obtido os valores de Tempo de Ignição, Taxa de Libertação de Calor, Perda de Massa e Calor Total Libertado.

Para o tratamento com retardantes, pode-se observar que no Glulam, a média do HRR de pico sem o verniz das amostras foi de 187,04 [kW/m²], enquanto que com o verniz foi de 293,41 [kW/m²], portanto houve uma taxa de acréscimo de 57%. A média do THR de pico sem o verniz foi de 280,94 [MJ/m²] e com o verniz foi de 334,60 [MJ/m²], sendo assim, houve um acréscimo de 19%. A Massa Residual média das amostras sem o verniz foi de 18,16 [g] e com verniz de 15,98 [g], resultando num decréscimo de 12%.

Para o CLT, a média do HRR máxima das amostras sem o verniz foi de 114,89 [kW/m²], enquanto que com o verniz foi de 175,20 [kW/m²], portanto houve uma taxa de acréscimo de 52%. A média do THR de pico sem o verniz foi de 99,30 [MJ/m²] e com o verniz foi de 79,45 [MJ/m²], sendo assim, houve um decréscimo de 20%. A Massa Residual média das amostras sem o verniz foi de 7,63 [g] e com verniz de 14,90 [g], logo houve um acréscimo de 95%.

Já no OSB, a média do HRR de pico sem o verniz das amostras foi de 174,48 [kW/m²], enquanto que com o verniz foi de 166,03 [kW/m²], portanto houve uma taxa de decréscimo de 5%. A média do THR máxima das amostras sem o verniz foi de 88,01 [MJ/m²] e com o verniz foi de 82,85 [MJ/m²], sendo assim, houve um decréscimo de 6%. A Massa Residual média das amostras sem o verniz foi de 20,08 [g] e com verniz de 19,93 [g], diminuindo 1%.

Ainda no ensaio de reação ao fogo das amostras com retardantes, foi possível observar um fumo denso durante a combustão, assim como também um forte odor, portanto, atenta-se para a necessidade de avaliar a Taxa de Libertação de Fumo desse produto.

Para os resultados do Envelhecimento Acelerado, sem tratamento, com a combinação 1 (C1), com a combinação 6 (C6) e com a combinação 8 (C8), respectivamente, pode-se

observar que no Glulam, a média do HRR máxima das amostras foi de 187,04 [kW/m²], 116,87 [kW/m²], 113,40 [kW/m²], e 120,82 [kW/m²], portanto houve uma taxa de decréscimo de 38%, 39% e 35% da C1, C6 e C8 em relação à sem tratamento. A média do THR de pico foi de 280,94 [MJ/m²], 191,23 [MJ/m²], 158,64 [MJ/m²], 239,97 [MJ/m²], sendo assim, houve um decréscimo de 32%, 44% e 15% da C1, C6 e C8 em relação à sem tratamento. A Massa Residual média das amostras foi de 18,16 [g] e com o tratamento de 22,52 [g], 17,90 [g], 24,18 [g]; logo, houve um acréscimo de 24%, 33% para C1 e C8, e um decréscimo de 1% para C6.

Para os resultados do Envelhecimento Acelerado do CLT, sem tratamento, com a C1, C6 e C8, respectivamente, pode-se observar que a média do HRR de pico das amostras foi de 114,89 [kW/m²], 95,03 [kW/m²], 106,22 [kW/m²], e 89,81 [kW/m²], portanto houve uma taxa de decréscimo de 17%, 8% e 22% da C1, C6 e C8 em relação à sem tratamento. A média do THR de pico foi de 99,30 [MJ/m²], 29,71 [MJ/m²], 86,51 [MJ/m²], 37,59 [MJ/m²], sendo assim, houve um decréscimo de 70%, 13% e 62% da C1, C6 e C8 em relação à sem tratamento.

Para os resultados do Envelhecimento Acelerado do OSB, sem tratamento, com a C1, C6 e C8, respectivamente, pode-se observar que a média do HRR máxima foi de 174,48 [kW/m²], 184,01 [kW/m²], 159,04 [kW/m²], e 164,73 [kW/m²]; portanto houve uma taxa de acréscimo de 5%, e decréscimo de 9% e 6% para C1, C6 e C8 respectivamente, em relação à sem tratamento. A média do THR máximo foi de 88,01 [MJ/m²], 77,25 [MJ/m²], 81,98 [MJ/m²], 59,13 [MJ/m²], sendo assim, houve um decréscimo de 12%, 7% e 33% da C1, C6 e C8 em relação à sem tratamento.

Pode-se então concluir que, de modo geral, o comportamento ao fogo da madeira Glulam com retardante teve maior HRR no início da combustão, e menor THR em relação ao material sem o tratamento. Em seguida o CLT com retardante apresentou, em geral, maior pico de HRR, porém menor THR. E o OSB com retardante, em geral, demonstrou um comportamento similar ao OSB sem retardante. No caso dos materiais com Envelhecimento Acelerado, em geral, apresentaram menor HRR e THR em relação as amostras sem envelhecimento, com exceção do OSB que teve um acréscimo no HRR das amostras envelhecidas. Isso deve-se possivelmente as alterações de temperatura e umidade, podem ter libertado de alguns compostos orgânicos voláteis, principalmente das resinas presentes no Glulam, CLT e OSB, que baixaram sua contribuição para a combustão dos materiais.

Portanto, torna-se interessante a continuidade dos testes para avaliar a reação dos materiais ao longo dos anos, assim como obter dados input para o modelo de previsão proposto no trabalho. A área de prevenção de incêndio na construção civil deve se desenvolver constantemente em conjuntos com as inovações tecnológicas sustentáveis, de forma a contribuir com a qualidade de vida dos utentes, assim como evitar acidentes e degradação do patrimônio histórico, cultural e social.

7.2. Linhas futuras de investigação

Devido ao crescente interesse em ampliar o conhecimento a respeito de prevenção de incêndio em edificações, devido ao grande risco a vida humana e aos patrimônios que esses eventos causam, as normas europeias continuam a ser investigadas e aprimoradas, como por exemplo, o Eurocódigo 2-1-2 e a EN 16755. Também há outro tema de grande interesse no estudo das edificações atuais que são as construções sustentáveis, onde a madeira possui boas qualidades e tem se destacado, com novos produtos no mercado. O conhecimento de como se comporta ao fogo continua a ser aprimorado, não apenas da reação da madeira, mas também dos produtos utilizados para melhorar seu desempenho durante o incêndio e assim ampliar sua vida útil.

Visto isso, propõe-se as seguintes linhas futuras de investigação:

Estudar a durabilidade da reação ao fogo dos materiais Glulam, CLT e OSB, utilizando a metodologia proposta neste trabalho e em continuidade com os ensaios aqui iniciados. Aplicar o modelo de previsão e avaliar o tempo de manutenção ou substituição desses produtos para que mantenham sua classificação de reação ao fogo especificada.

Propor um método de Envelhecimento Acelerado adequado para ambientes internos, do tipo INT1 e INT2, de forma a completar a EN 16755/2017.

Analisar a durabilidade de outros materiais utilizados em grande escala na construção civil, de madeira, como o MDF com e sem retardante, utilizando a mesma metodologia descrita nesta pesquisa.

Avaliar a durabilidade da reação ao fogo dos materiais Glulam, CLT e OSB, utilizando temperatura, teor de umidade e carga como parâmetros de degradação da madeira. Aplicar o modelo de previsão e avaliar o tempo de manutenção ou substituição desses produtos para que mantenham sua classificação de reação ao fogo especificada.

Comparar durabilidade da reação ao fogo dos materiais, utilizando a metodologia da EN 16755/2017, Método A e Método B. Aplicar o modelo de previsão e avaliar o tempo de manutenção ou substituição desses produtos para que mantenham sua classificação de reação ao fogo especificada em comparação ao Envelhecimento Acelerado desenvolvido nesta pesquisa.

Referências

1. Östman, B.A.L., *Fire performance of wood products and timber structures*. International Wood Products Journal, 2017. **8**(2): p. 74-79.
2. CEN, *Durability of reaction to fire performance - Classes of fire-retardant treated wood products in interior and exterior end use applications*, in EN 16755. 2017, European Committee for Standardization.
3. Östman, B., et al., *Durability of fire retardant treated wood products at humid and exterior conditions review of literature*. Fire and Materials, 2001. **25**(3): p. 95-104.
4. Östman, B.A.L. and E. Mikkola, *European classes for the reaction to fire performance of wood products*. Holz als Roh- und Werkstoff, 2006. **64**(4): p. 327-337.
5. García, M., et al., *Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. **40**(11): p. 1772-1776.
6. Vallerent, S., et al., *Fire performance of multi-storey wooden facades*. MATEC Web of Conferences, 2013. **9**: p. 06001.
7. Östman, B. and L. Boström, *Fire Protection Ability of Wood Coverings*. Fire Technology, 2014. **51**(6): p. 1475-1493.
8. Bal, N., *Forty years of material flammability: An appraisal of its role, its experimental determination and its modelling*. Fire Safety Journal, 2018. **96**: p. 46-58.
9. Giraldo, M.P.L.H., Javier Sotomayor, Ana M. Lacasta, Joaquín Montón, Mariana Palumbo Antonia Navarro. , *Characterization of the fire behaviour of tropical wood species for use in the construction industry*. Wood Conference on Timber Engineering, 2016.
10. Elvira-León, J.C., et al., *Epsomite as flame retardant treatment for wood: Preliminary study*. Construction and Building Materials, 2016. **126**: p. 936-942.
11. Vallerent, S., B. Östman, and L. Tsantaridis, *Durability of the reaction to fire performance for fire retardant treated (FRT) wood products in exterior applications – a ten years report*. MATEC Web of Conferences, 2016. **46**: p. 05005.
12. Östman, B., D. Brandon, and H. Frantzich, *Fire safety engineering in timber buildings*. Fire Safety Journal, 2017. **91**: p. 11-20.
13. B.Östman, e.a., *Fire design of CLT in Europe*. Wood and Fiber Science, 2018.

14. Richter, F., et al., *The effect of chemical composition on the charring of wood across scales*. Proceedings of the Combustion Institute, 2019. **37**(3): p. 4053-4061.
15. estrutural, M. *Templo Horyu-ji, A construção de madeira mais antiga do mundo*. 2009 [cited 2019 19 de Fevereiro]; Available from: <https://madeiraestrutural.wordpress.com/2009/06/22/templo-horyu-ji-a-construcao-de-madeira-mais-antiga-do-mundo/>.
16. Dias, A. *Horyu-ji - A construção de madeira mais antiga do mundo*. 2007 [cited 2019 19 de Fevereiro]; Available from: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2007/04/horyu-ji-construo-de-madeira-mais.html>.
17. Marques, L.E.M.M., *O papel da Madeira na sustentabilidade da construção*, in *Faculdade de Engenharia*. 2008, Universidade do Porto: Porto.
18. Hasan, Z.G. *Maior arranha-céu de madeira do mundo é concluído em Vancouver*. 2017; Available from: <https://www.archdaily.com.br/br/879671/maior-arranha-ceu-de-madeira-do-mundo-e-concluido-em-vancouver>.
19. Correia, E.A.S., *Análise e Dimensionamento de estruturas de Madeira*, in *Faculdade de Engenharia Universidade do Porto*. 2009, Universidade do Porto: Porto.
20. Baião, V.d.D.C., *Desempenho teórico e real de vigamentos de madeira*, in *Faculdade de Engenharia*. 2014, Universidade Católica Portuguesa.
21. Robinson, M.J.J.H.B., *The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. 2018, Dublin, Ireland.
22. Association, A.T.E.W. *History of APA, Plywood, and Engineered Wood*. 2019 [cited 2019 07/06]; Available from: <https://www.apawood.org/apas-history>.
23. How SS, S.H.A.U., *An overview of manufacturing process of Glued Laminated timber*. Timber Technology Bulletin, 2016. n°63.
24. Carpinteria. *Shopping Iguatemi Fortaleza*. 2018; Available from: <https://carpinteria.com.br/project/shopping-iguatemi-fortaleza/>.
25. Marzieh Ghiyasinab1*, L.N., Ménard S2 and Cloutier C1. *Using Lean Techniques and Simulation to Improve the Efficiency of Engineered Wood Production: A Case Study in a Small Factory*. 2018 [cited 2019 07/06].
26. KG, P.H.G.a.C., *Certificado de Conformidad CE 1359-CPD-0011*, H. Austria, Editor. 2007: Austria.
27. Pirvu, S.G.a., *CLT handbook: cross-laminated timber*. 2011, Canadian.
28. Lakusic, S., *Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report*. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 2018. **70**(02): p. 75-95.
29. Services, S.C. *Factory Custom Accurate Design*. 2019 [cited 2019 11/06]; Available from: <http://www.cltcrosslaminatedtimber.com.au/clt/design>.
30. COST, *Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists*. 2010, London, England: Brunel University Press.
31. Youngquist, J.A., *Wood-based Composites and Panel Products*, in *Wood Handbook*. 1999.
32. CEN, *Wood-based panels for use in construction – Characteristics, evaluation of*

- conformity and marking. 2004, European Committee for Standardization: Brussels
33. Setubal, V.G., *Avaliação e Reciclagem de chapas de OSB utilizadas na Construção Civil*, in Instituto de Florestas. 2009, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
 34. Mendes, G. *Painel de OSB na decoração e confecção de móveis*. 2017 [cited 2019 14 de Março]; Available from: <http://www.facoemcasa.com.br/painel-de-osb-na-decoracao-e-confeccao-de-moveis/>.
 35. Arauco, S., *Painéis de Aglomerados de Partículas de Madeiras longas orientadas OSB*, in OSB4, S. Arauco, Editor.
 36. CEN, *Durability of wood and wood-based products*, in EN 355. 2013, European Committee for Standardization.
 37. CEN, *Eurocode 5 Design of timber structures Part 1-1 General Common rules and rules for buildings*, in EN1995-1-1 2004, European Committee for Standardization. p. 121.
 38. Laboratory, F.P., *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*. 1999, Forest Service Madison, Wisconsin: Forest Products Laboratory USDA
 39. Nunes, T.E.F., *Estudo da inflamabilidade de diversos tipos de madeiras e de cortiça usados na estrutura e na envolvente de edifícios*, in Departamento de Engenharia Mecânica. 2015, Universidade de Coimbra.
 40. Interna, M.d.A., *Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios* 2008, Diário da República: Portugal.
 41. Mesquita, L.M.R.d., *Estudo experimental e numérico do comportamento de um material intumescente na proteção passiva de elementos estruturais submetidos a incêndio*, in Departamento de Engenharia Mecânica. 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
 42. White, R.H., *Fire Safety of Wood Construction*, in *General Technical Report FPL-GTR-190*, M.A. Dietenberger, Editor. 2010.
 43. Östman, B., *Fire design of CLT in Europe*. 2018.
 44. Costas, C.N., *Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio*. NUTAU, 2006.
 45. CEN, *Fire classification of construction products and building elements*, in *Part 1 Classification using data from reaction to fire tests* 2007, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: Brussels.
 46. Vakhitova, L.N., *Fire retardant nanocoating for wood protection*. 2019: p. 361-391.
 47. CIN. *Proteção Passiva ao fogo*. [cited 2019 09/04]; Available from: <http://www.cin-protective.com/portal/portal/user/anon/page/scpfogo.psml?categoryOID=67828080809C80GC&contentid=B282808C80CO&nl=pt>.
 48. Weil, E.D., *Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings - A State-of-the-Art Review*. Journal of Fire Sciences, 2011. **29**(3): p. 259-296.
 49. Ajuong, E., L.C. Pinion, and M.S.H. Bhuiyan, *Degradation of Wood*. 2018.
 50. Pina, C.D.d.S., *Avaliação da Exposição Profissional ao Formaldeído*:

-
- Efeito Genotóxico*, in *Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar*. 2010, Universidade do Porto: Porto.
51. Perminova, D.A., et al., *Influence of Glyoxal on Curing of Urea-Formaldehyde Resins*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019.
 52. CEN, *Bases para o projecto de estruturas*, in *EN 1990*. 2009, Comité Europeu de Normatização. p. 88.
 53. Nilsson, T. and R. Rowell, *Historical wood – structure and properties*. Journal of Cultural Heritage, 2012. **13**(3): p. S5-S9.
 54. Pereira, M.C.d.M., *Metodologia de estudo caracterização CLT*, in *Escola de Engenharia de São Carlos*. 2014, Universidade de São Paulo: São Carlos.
 55. Araújo, A.C.C.d., et al., *Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável*. Pesquisa Florestal Brasileira, 2018. **38**.
 56. CEN, *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method*, in *EN 13183-1*. 2002, European Committee for Standardization. p. 5.
 57. Hughes, M., *Wood and Wood Products*, in *Wood-water relationships I*. 2016.
 58. Santos, J.A., *A secagem e as relações da água com a madeira*, in *Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres*. 2005: Lisboa.
 59. Boardman, C.R., S.V. Glass, and P.K. Lebow, *Simple and accurate temperature correction for moisture pin calibrations in oriented strand board*. Building and Environment, 2017. **112**: p. 250-260.
 60. Welling, J., *Dried Timber how to specify correctly*. 2010, COST. p. 38.
 61. CEN, *Moisture content of a piece of sawn timber Part 2: Estimation by electrical resistance method*, in *EN 13183-2*, E.C.f. Standardization, Editor. 2002, European Committee for Standardization. p. 6.
 62. CEN, *Wood-based panels - Determination of moisture content*, in *EN 322*. 1993, European Committee for Standardization: British. p. 4.
 63. Muhamad, I.I., et al., *Accelerated testing methodology for long-term life prediction of cellulose-based polymeric composite materials*. 2019: p. 149-171.
 64. Escobar, L.A. and W.Q. Meeker, *A Review of Accelerated Test Models*. Statistical Science, 2006. **21**(4): p. 552-577.
 65. Approvals, E.O.f.T., *Guideline for European Technical Approval of Fire retardant products*. 2012, ETAG: Brussels.
 66. Wood, D.A., *Thermal maturity and burial history modelling of shale is enhanced by use of Arrhenius time-temperature index and memetic optimizer*. Petroleum, 2018. **4**(1): p. 25-42.
 67. Surathi, P., *Hygrothermal Effects on Durability and moisture Kinetics of Fiber-reinforced Polymer composites* in *Department of Structural Engineering* 2006, University of California: San Diego.
 68. Kulman, L.B.O.P.J.S.S., *Durability of Wood-Based Panels Predicted using bending strength results from Accelerated Treatments*. 2017.
-

69. Cavazzuti, M., *Optimization Methods - From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics* 2013, Italy: Springer. 271.
70. Soft, S. *Design of Experiments: Science, Industrial DOE. Box-Behnken, and Mixed 2 and 3 Level Factorial Designs* [cited 2019 13 de Fevereiro].
71. Technologies, A.T., *ACS Discovery My Catalogue*. Angelantoni Test Technologies Italy.
72. Memmert, *HCP 108 Mode D'Emploi, Enceintes Hygrométriques*. Memmert Experts in Thermostatics.
73. ISO, *Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate, in Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*. 2002, International Organization for Standardization: Switzerland.

Anexos

A1. Resultados do ensaio Calorímetro de Cone para Taxa de Libertação de Calor do Glulam, CLT e OSB

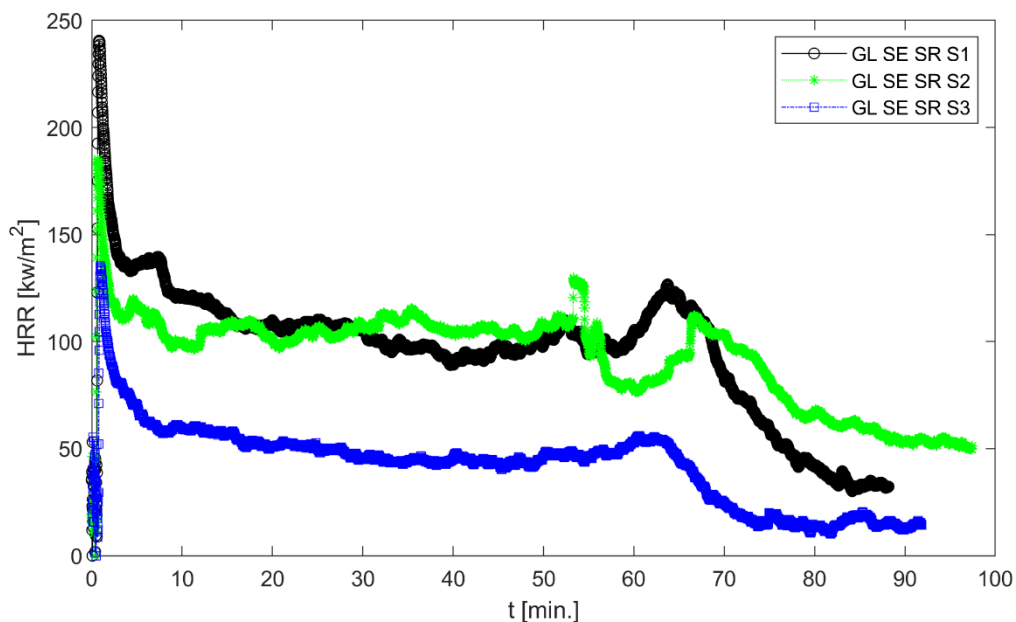


Figura 71 Taxa de Libertação de Calor do Glulam sem tratamento.

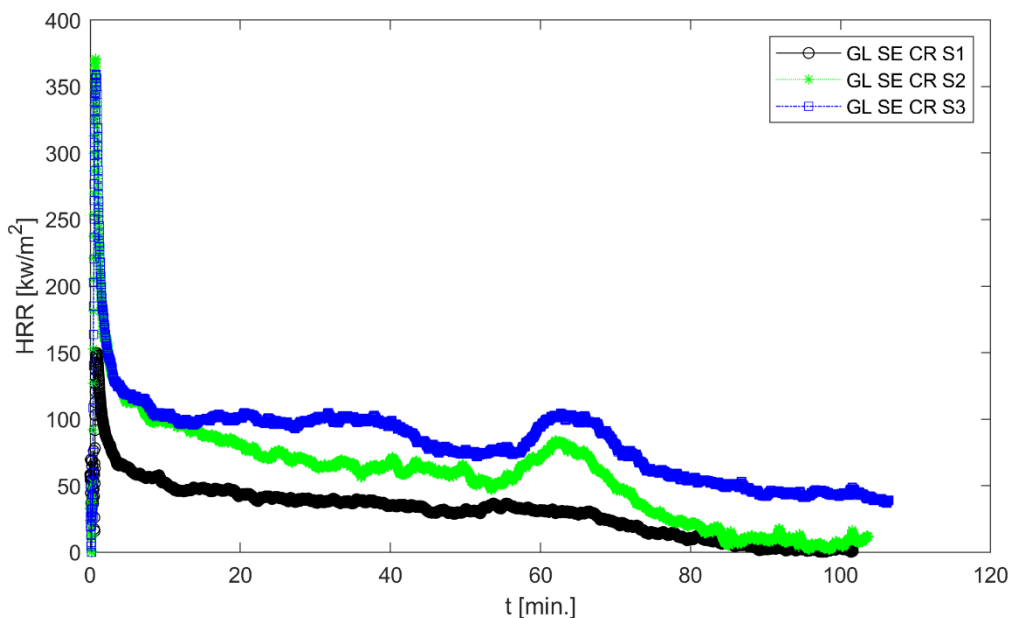


Figura 72 Taxa de Libertação de Calor do Glulam com retardante.

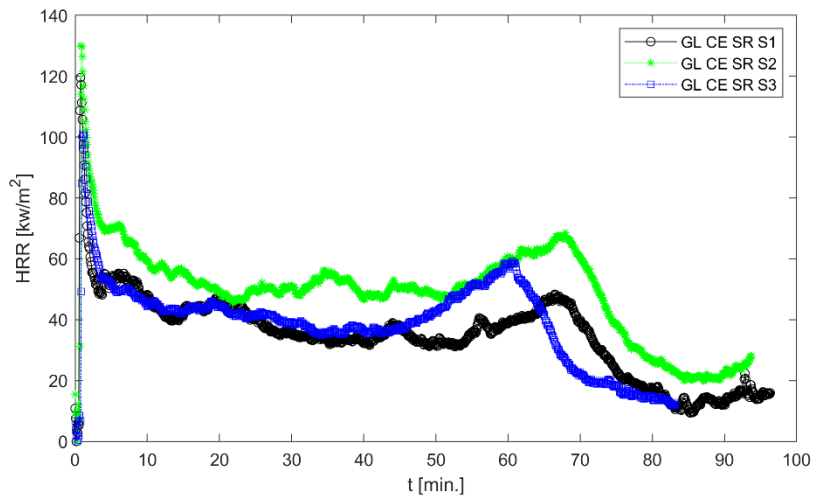


Figura 73 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 1.

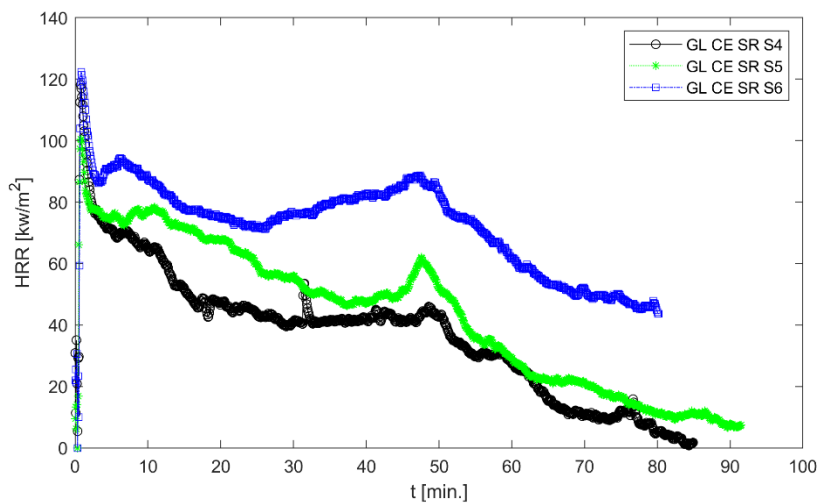


Figura 74 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 6.

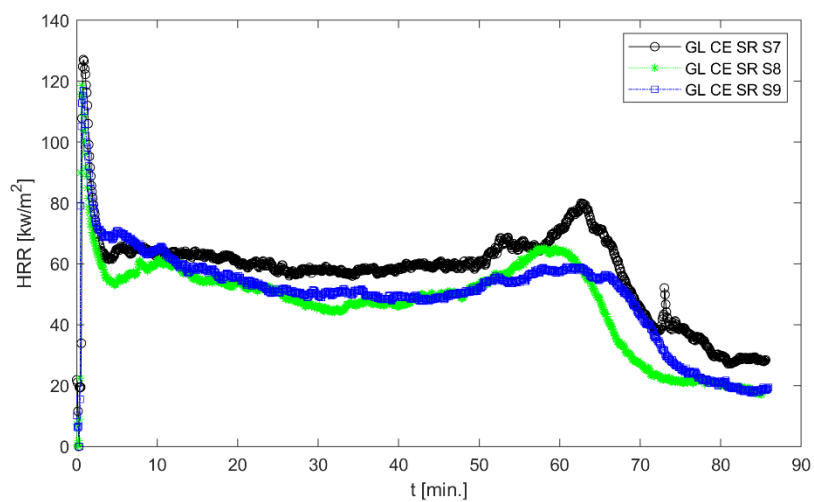


Figura 75 Taxa de Libertação de Calor do Glulam após combinação 8.

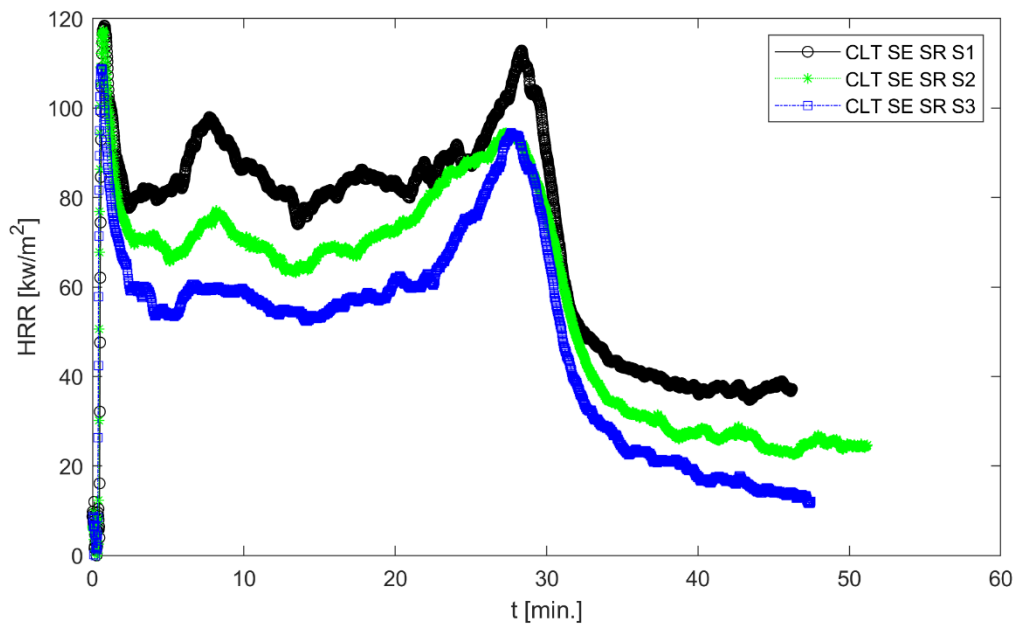


Figura 76 Taxa de Libertação de Calor do CLT sem tratamento.

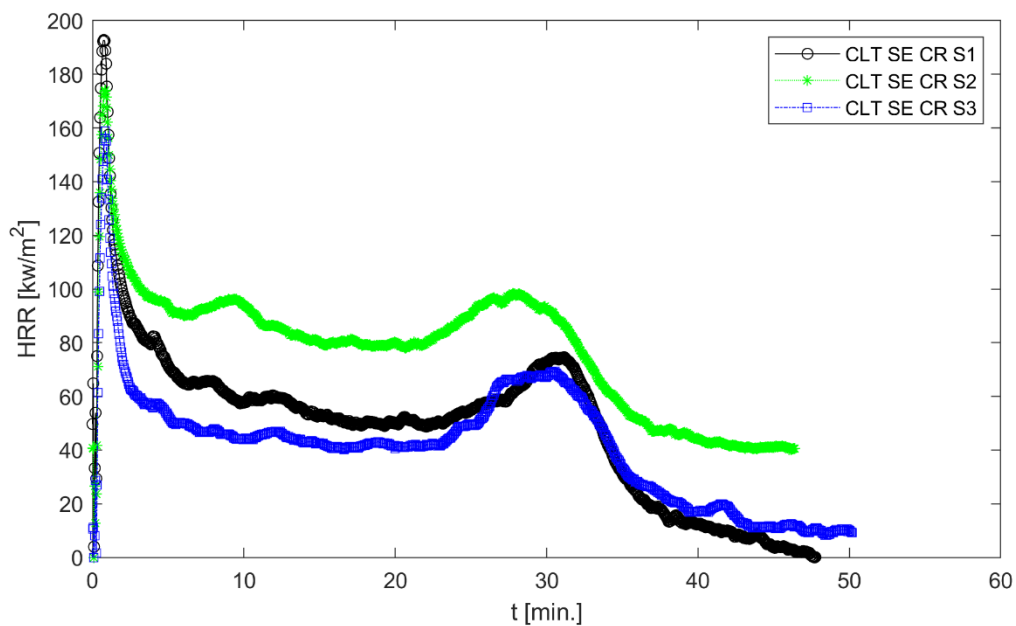


Figura 77 Taxa de Libertação de Calor do CLT com retardante.

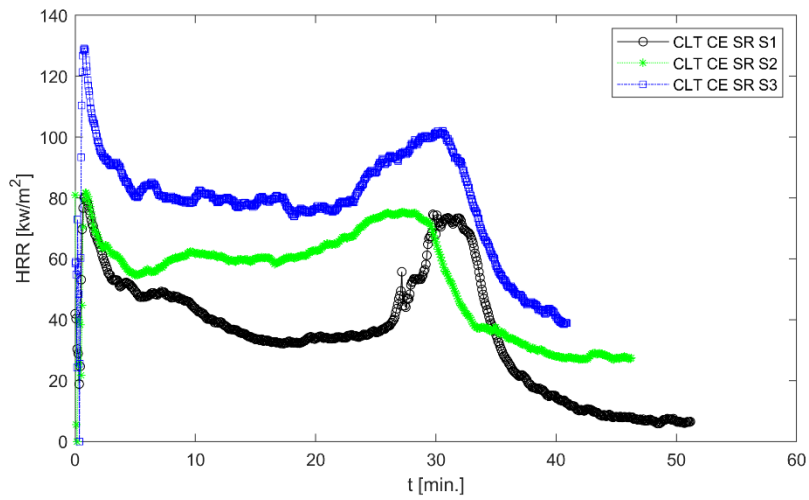


Figura 78 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 1.

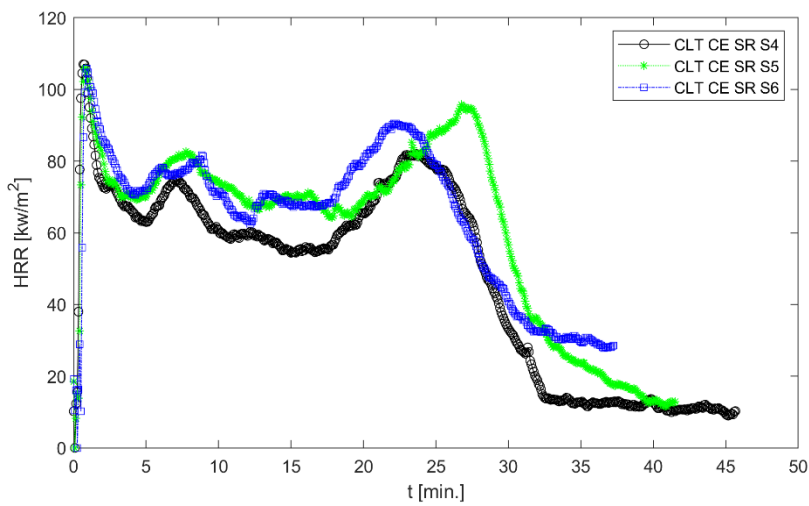


Figura 79 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 6.

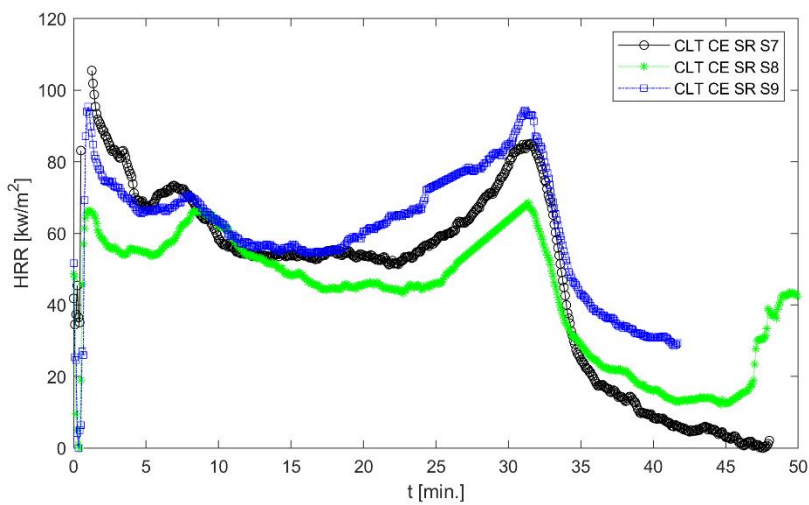


Figura 80 Taxa de Libertação de Calor do CLT após combinação 8.

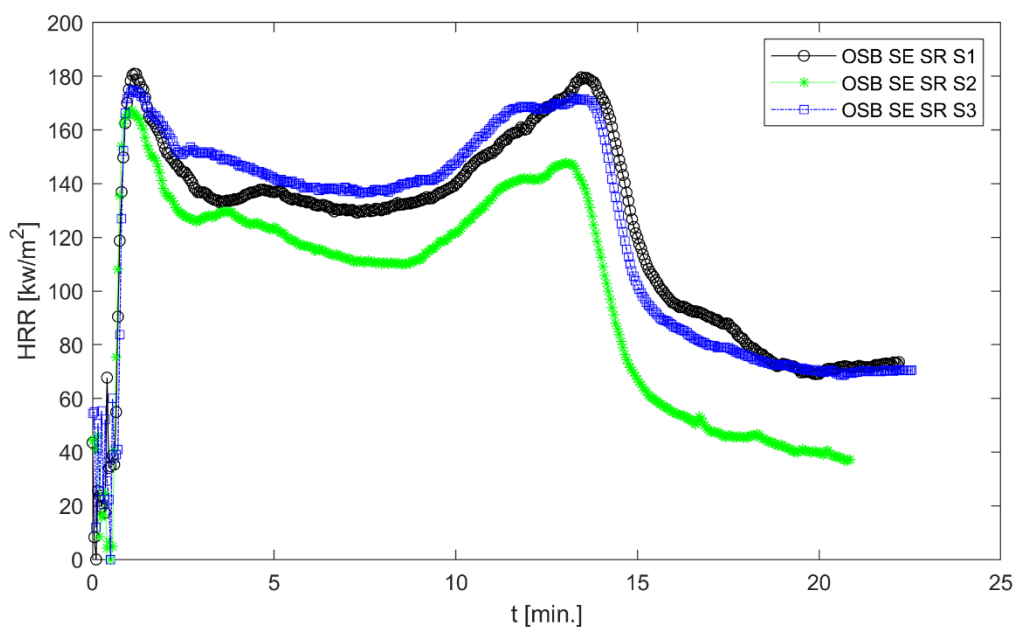


Figura 81 Taxa de Libertação de Calor do OSB sem tratamento.

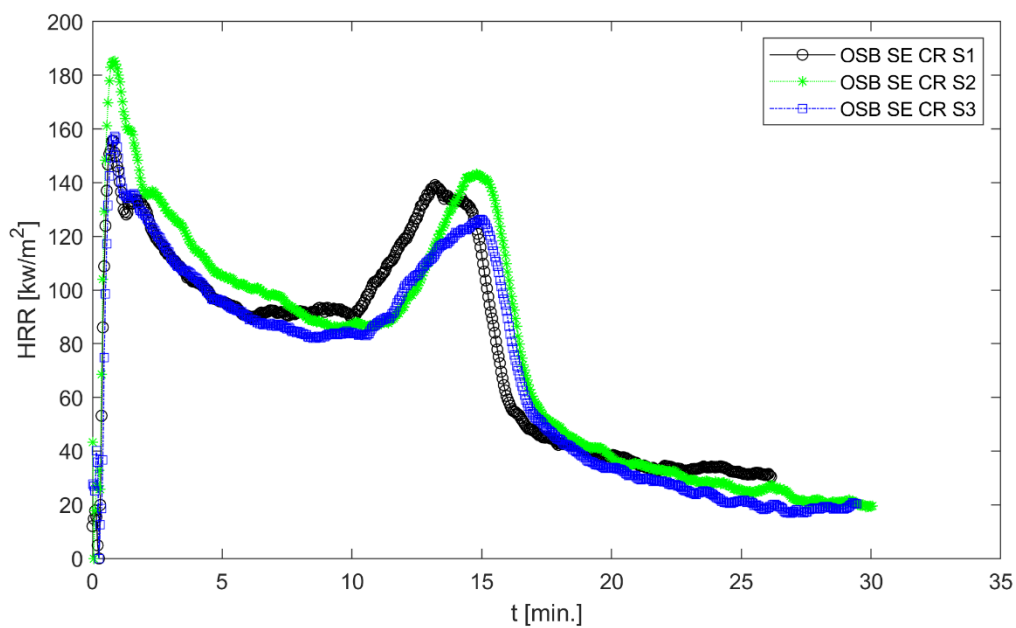


Figura 82 Taxa de Libertação de Calor do OSB com retardante.

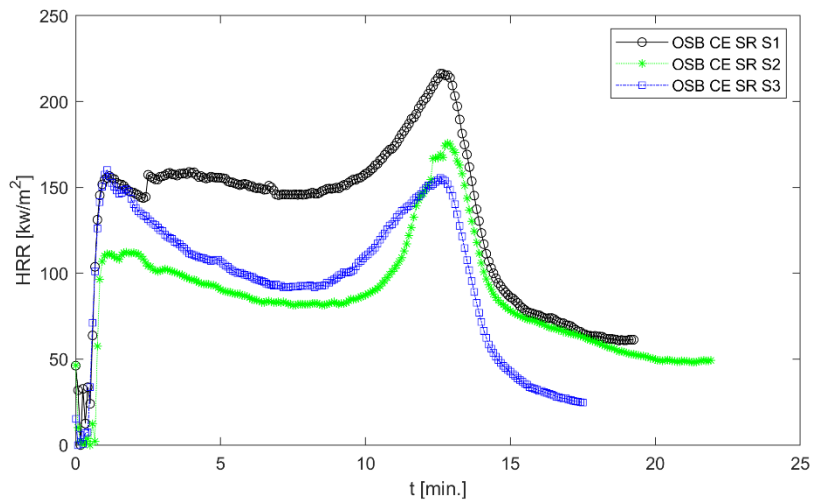


Figura 83 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 1.

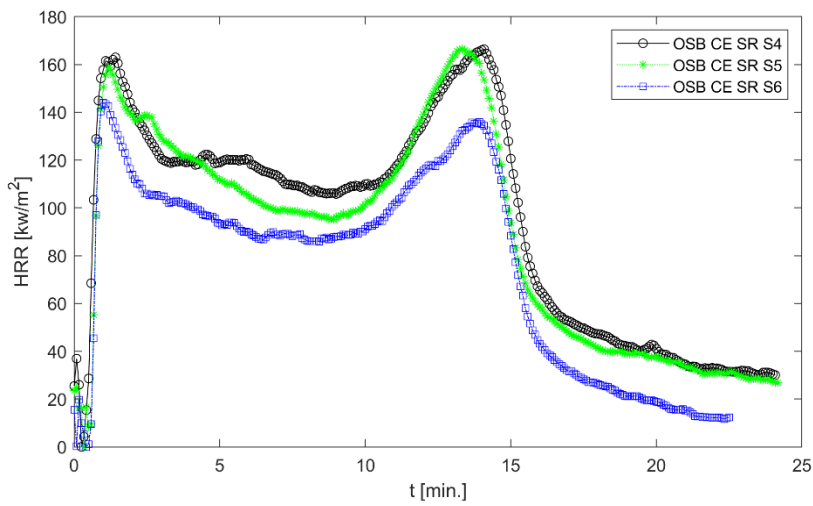


Figura 84 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 6.

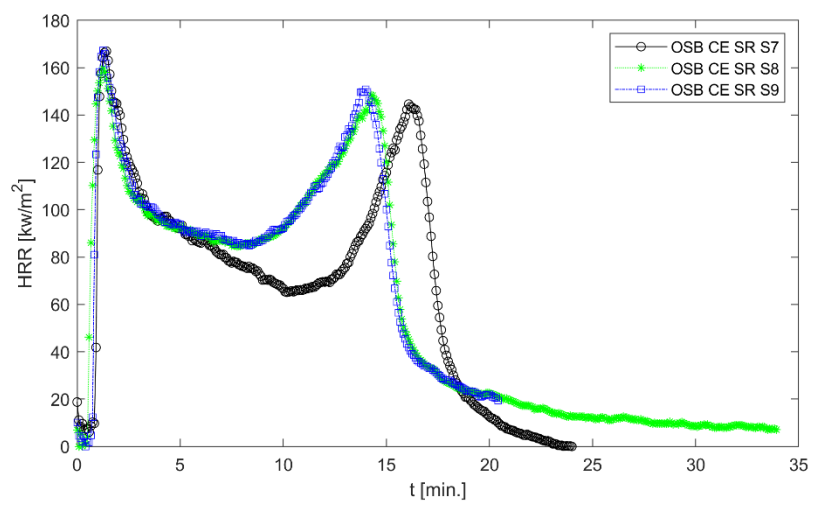


Figura 85 Taxa de Libertação de Calor do OSB após combinação 8.

A2. Resultados do ensaio Calorímetro de Cone para Calor Total Libertado do Glulam, CLT e OSB

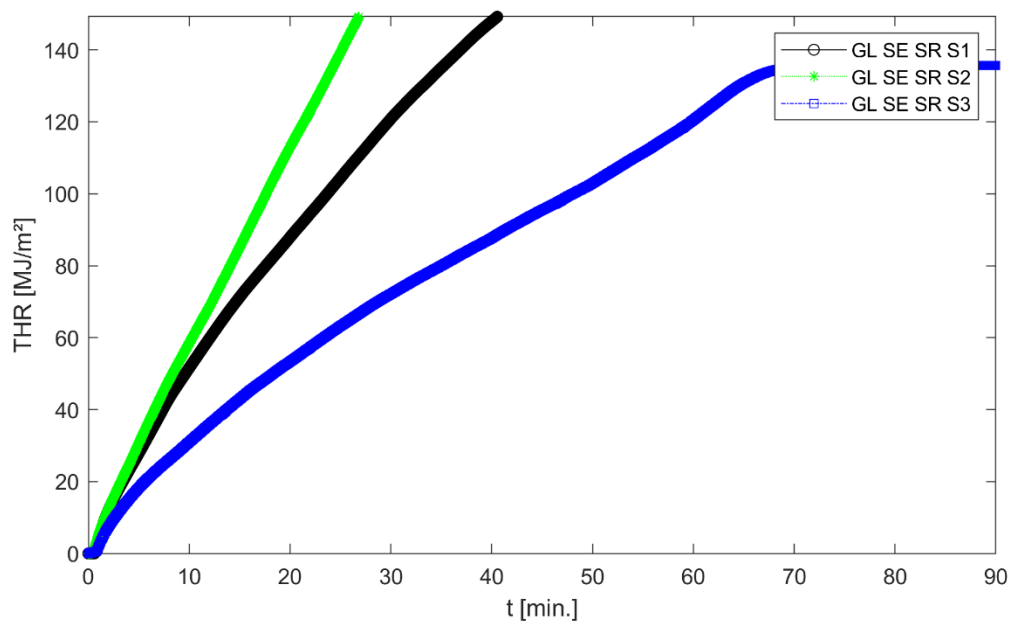


Figura 86 Calor Total Libertado do Glulam sem tratamento.

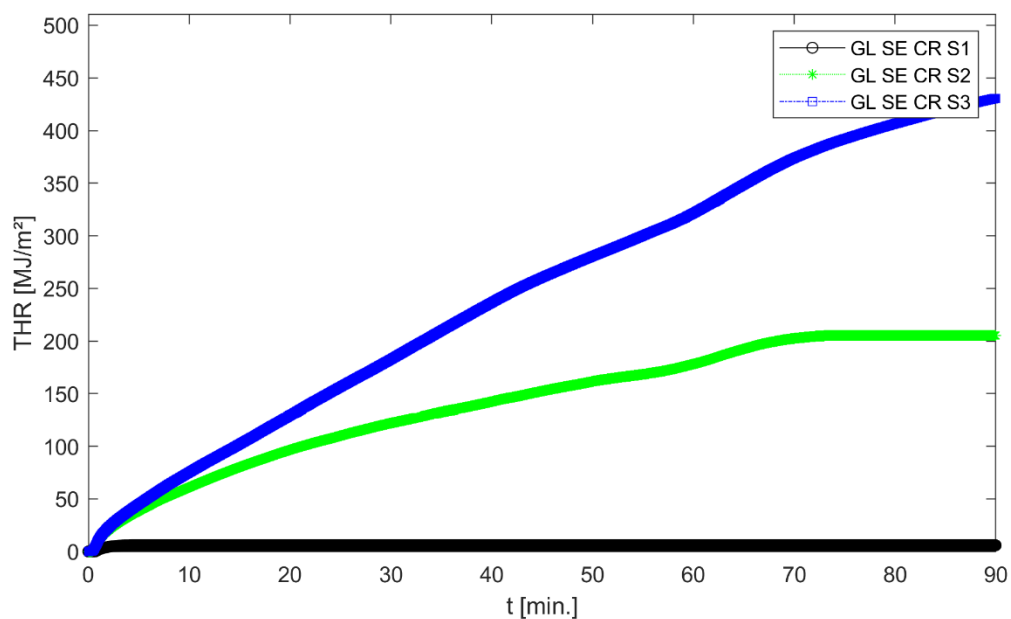


Figura 87 Calor Total Libertado do Glulam com retardante.

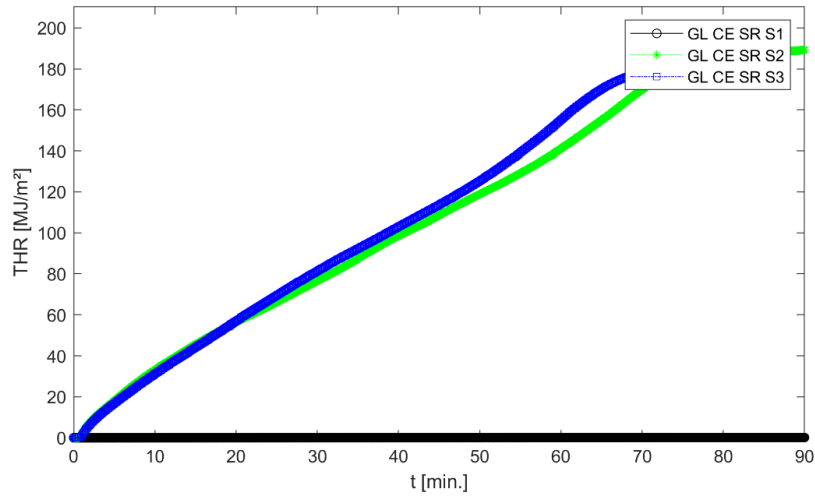


Figura 88 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 1.

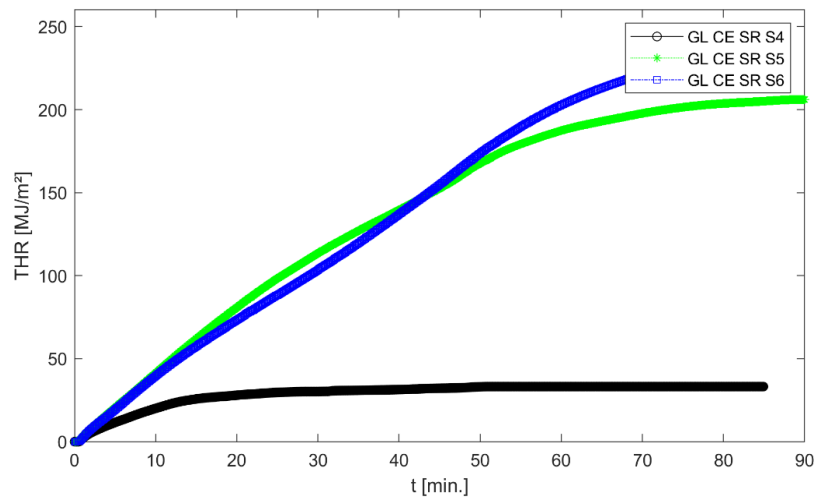


Figura 89 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 6.

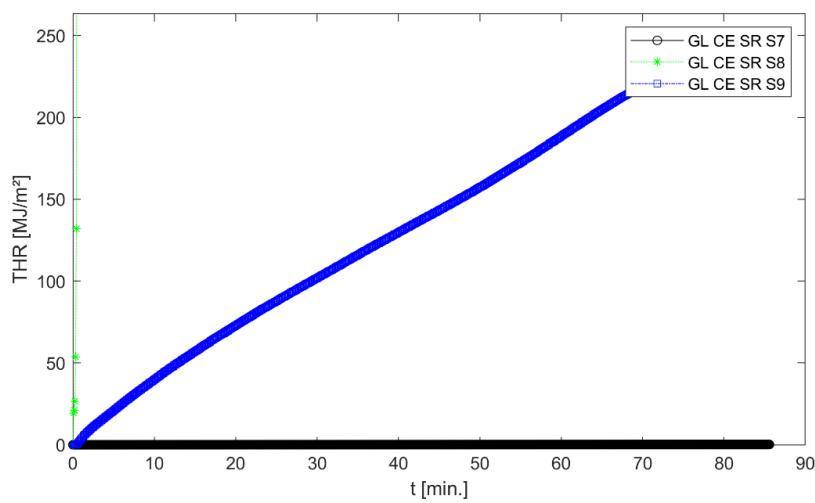


Figura 90 Calor Total Liberado do Glulam após combinação 8.

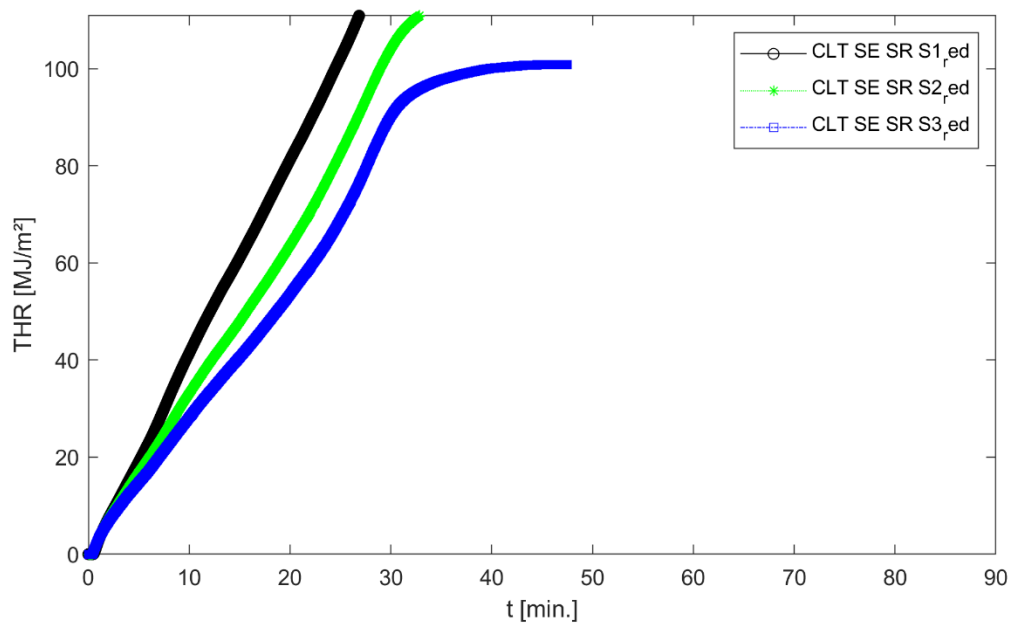


Figura 91 Calor Total Liberado do CLT sem tratamento.

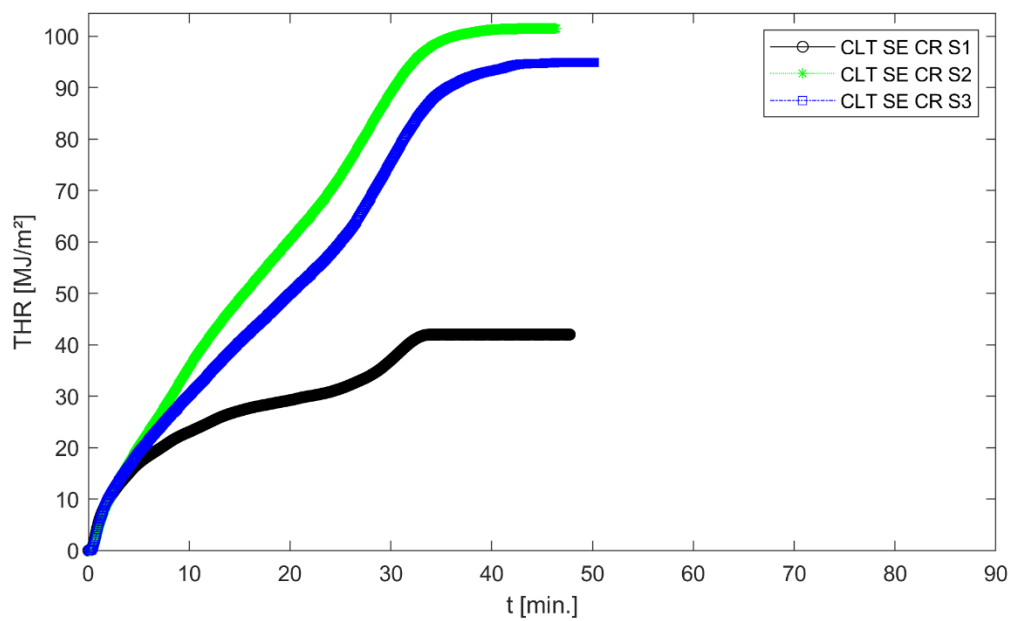


Figura 92 Calor Total Liberado do CLT com retardante.

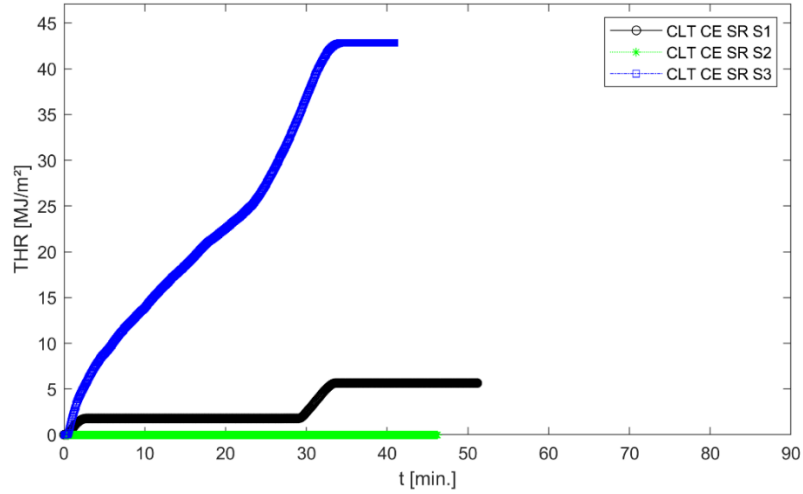


Figura 93 Calor Total Liberado do CLT após combinação 1.

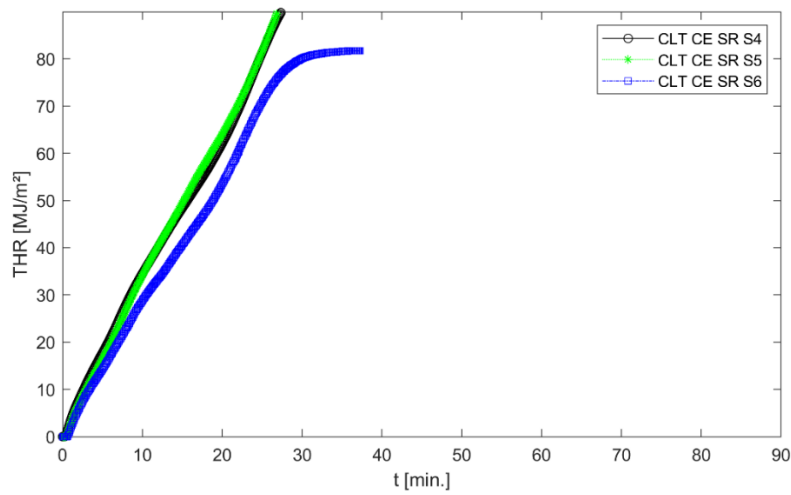


Figura 94 Calor Total Liberado do CLT após combinação 6.

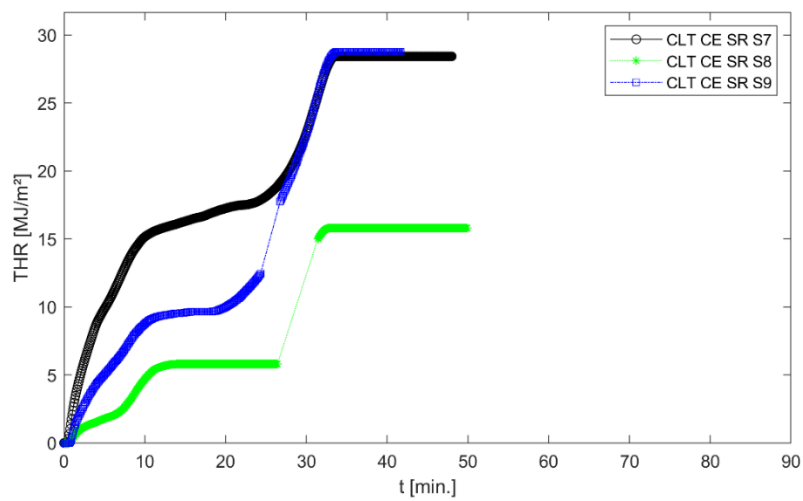


Figura 95 Calor Total Liberado do CLT após combinação 8.

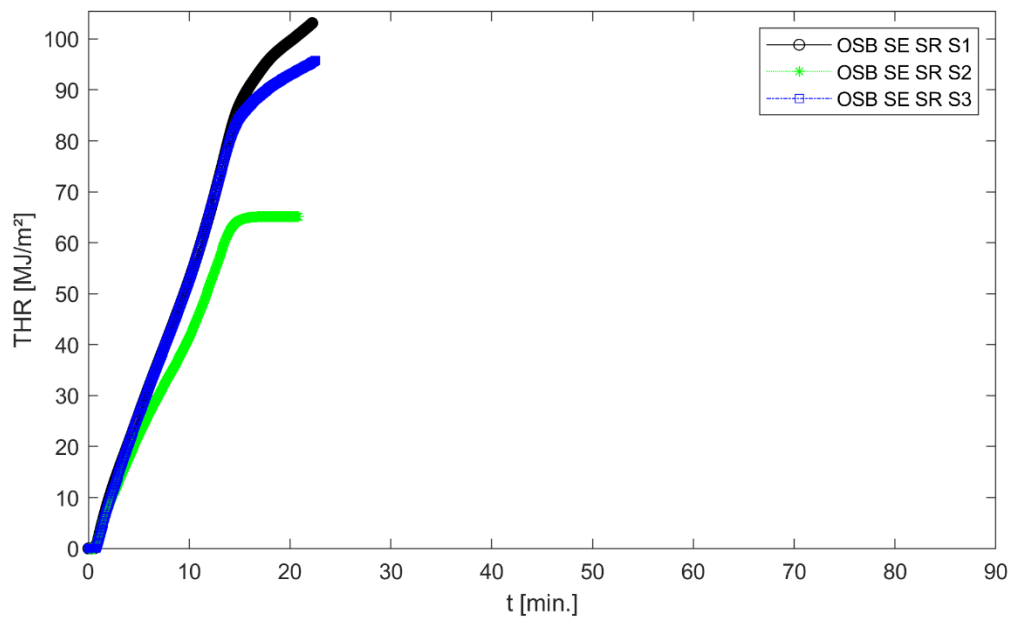


Figura 96 Calor Total Liberado do OSB sem tratamento.

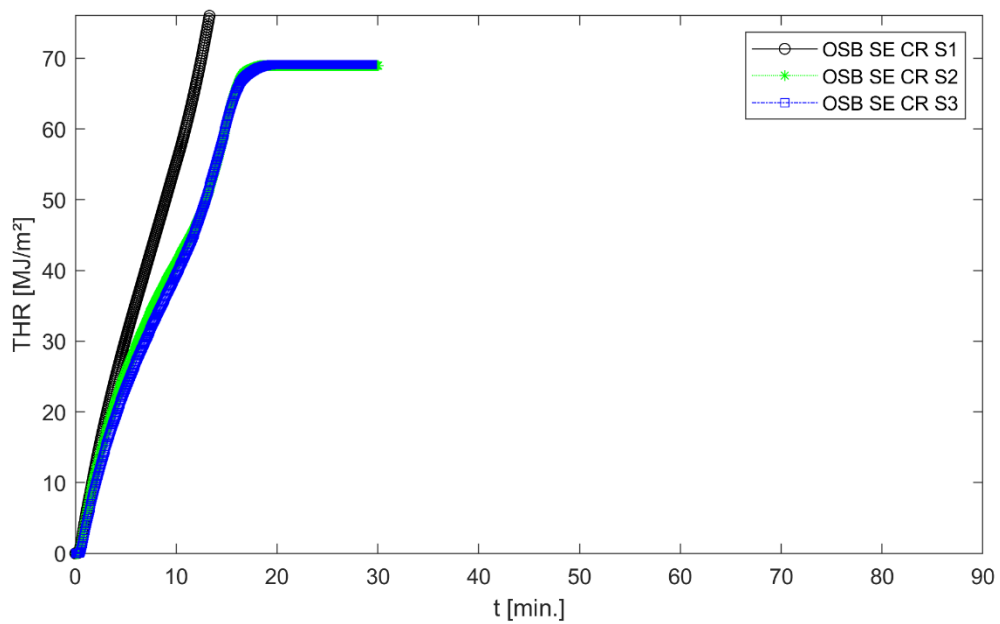


Figura 97 Calor Total Liberado do OSB com retardante.

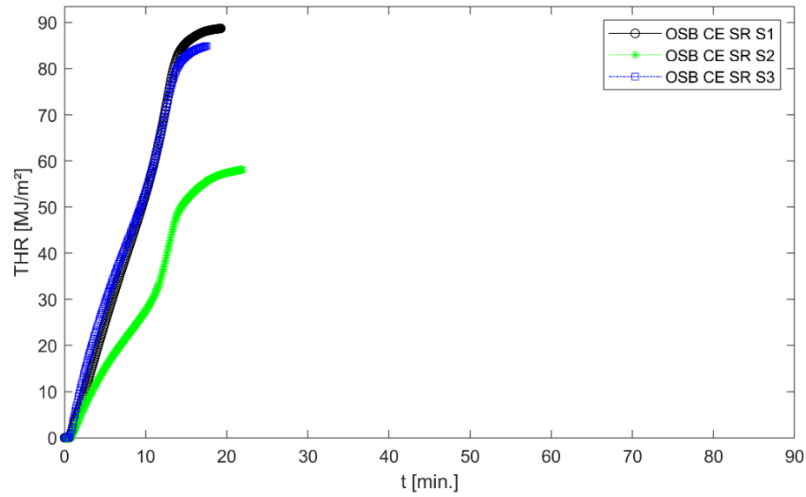


Figura 98 Calor Total Liberado do OSB após combinação 1.

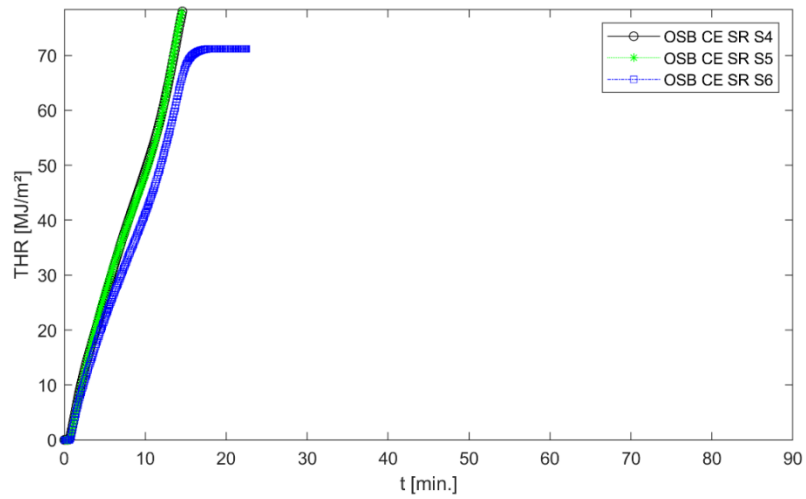


Figura 99 Calor Total Liberado do OSB após combinação 6.

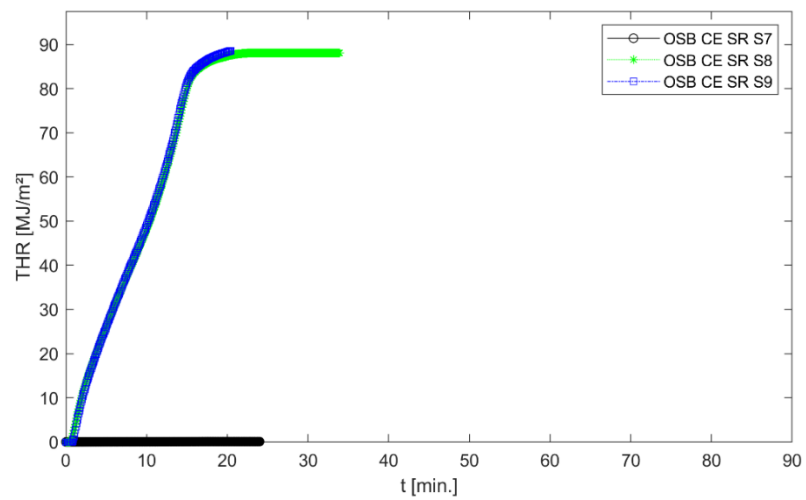


Figura 100 Calor Total Liberado do OSB após combinação 8.

A3. Resultados do ensaio Calorímetro de Cone para Perda de Massa do Glulam, CLT e OSB

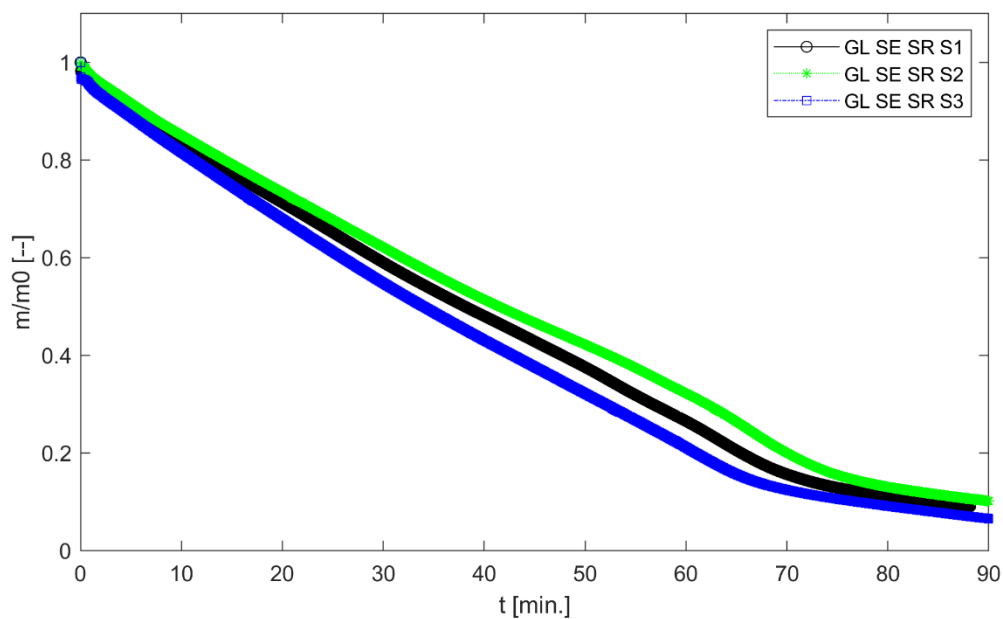


Figura 101 Perda de Massa do Glulam sem tratamento.

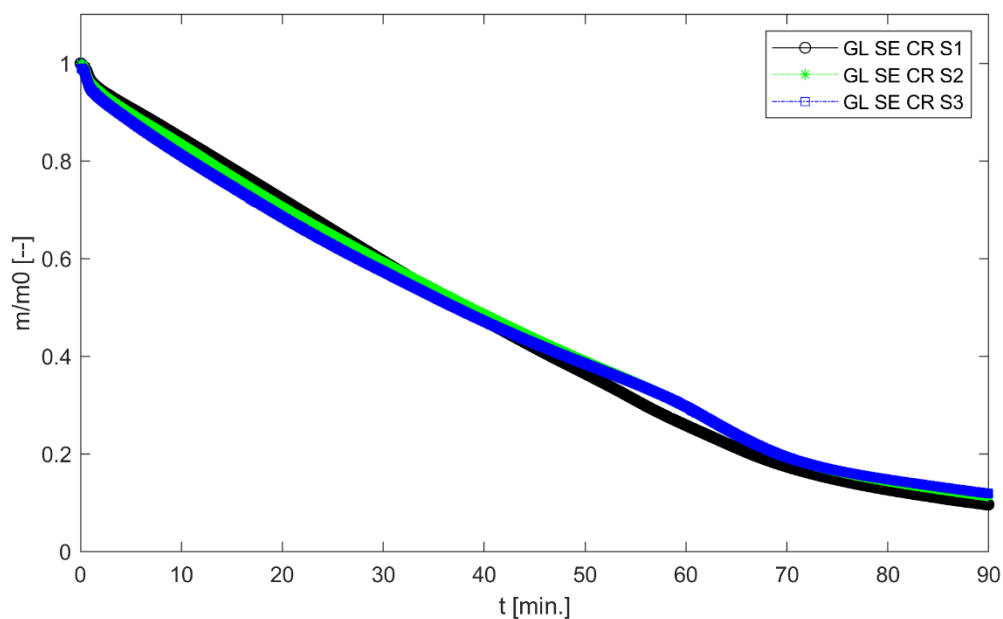


Figura 102 Perda de Massa do Glulam com retardante.

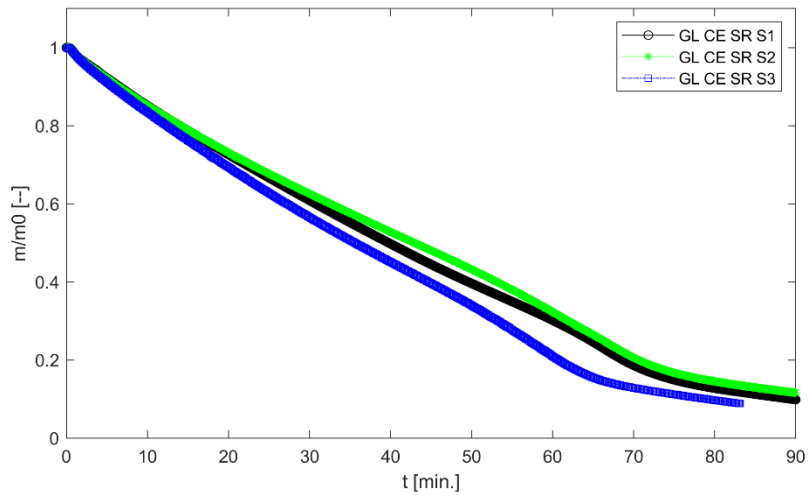


Figura 103 Perda de Massa do Glulam após combinação 1.

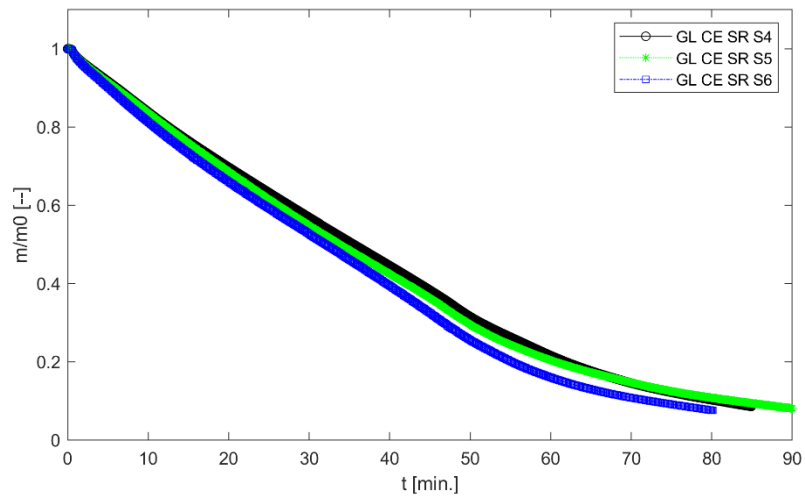


Figura 104 Perda de Massa do Glulam após combinação 6.

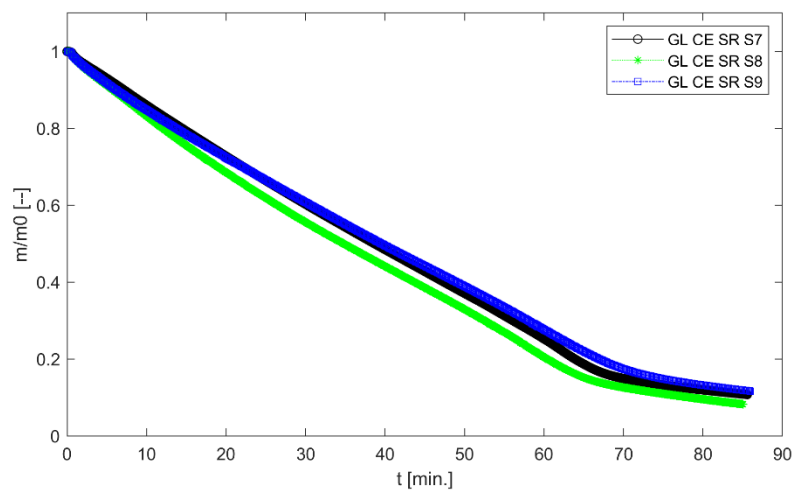


Figura 105 Perda de Massa do Glulam após combinação 8.

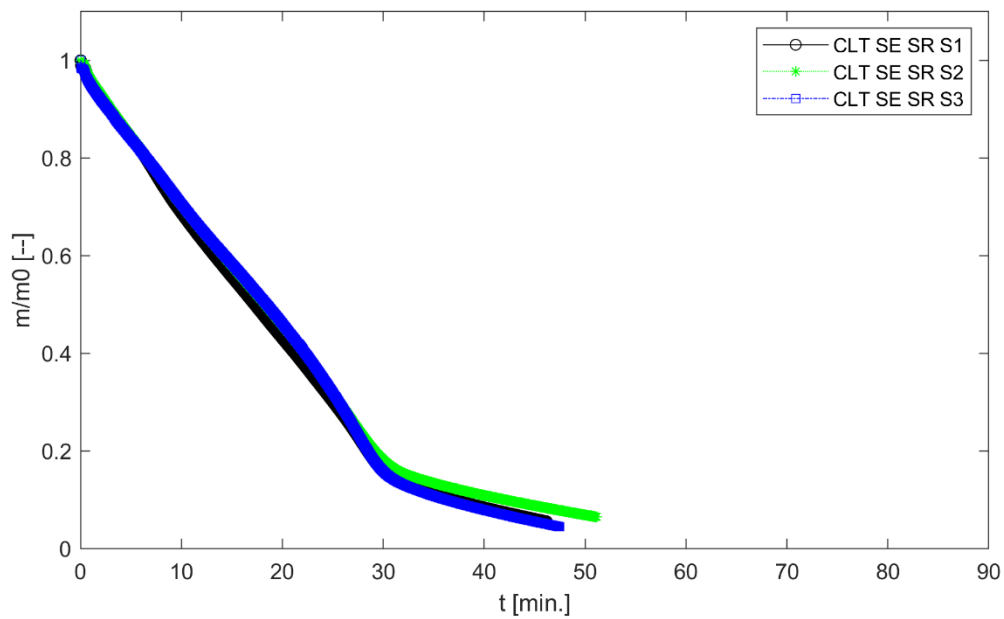


Figura 106 Perda de Massa do CLT sem tratamento.

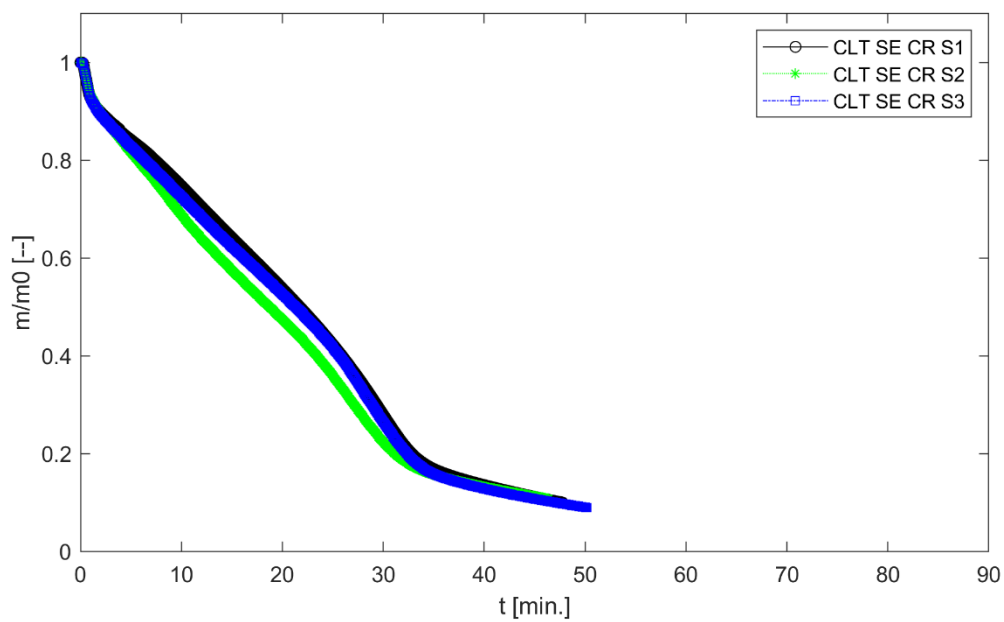


Figura 107 Perda de Massa do CLT com retardante.

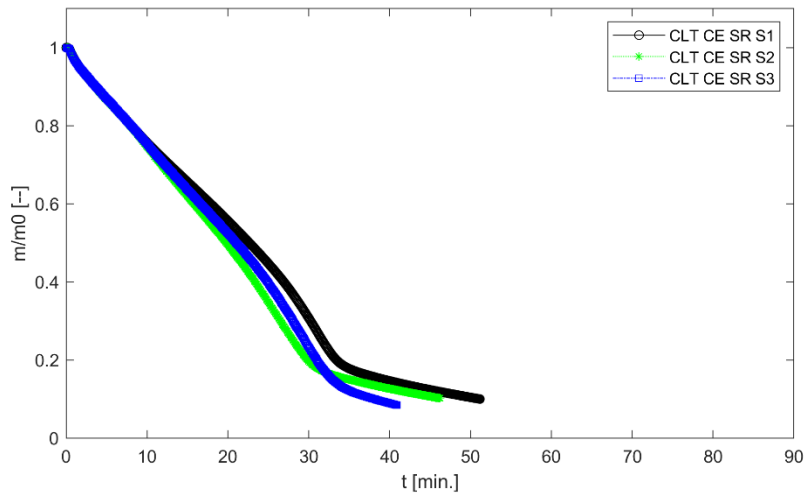


Figura 108 Perda de Massa do CLT após combinação 1.

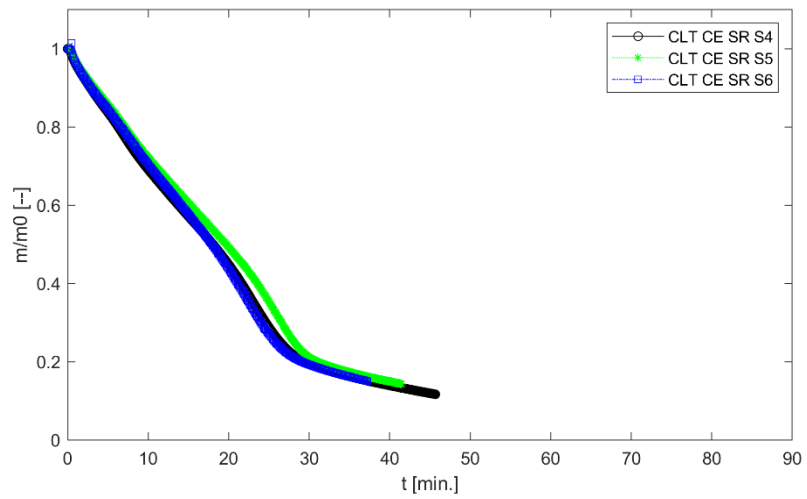


Figura 109 Perda de Massa do CLT após combinação 6.

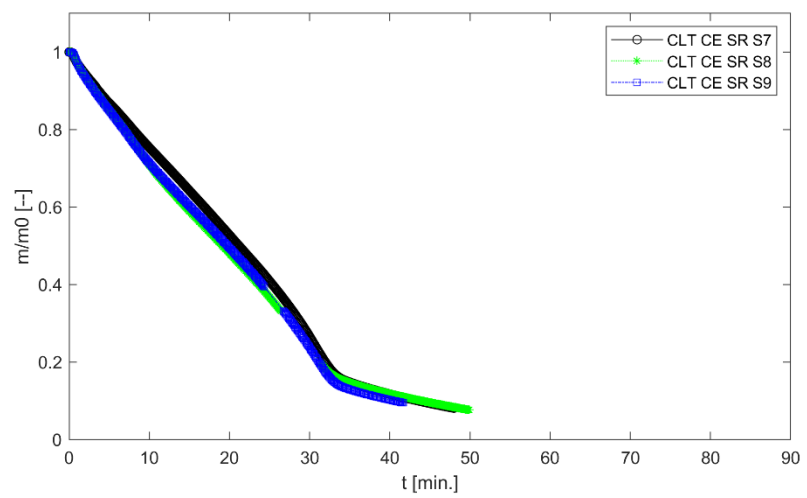


Figura 110 Perda de Massa do CLT após combinação 8.

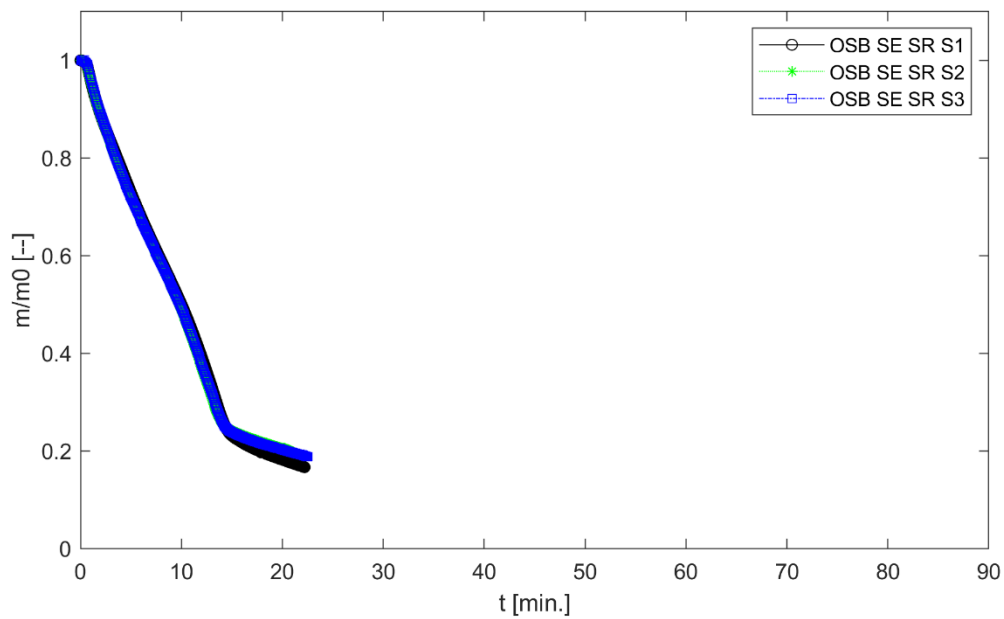


Figura 111 Perda de Massa do OSB sem tratamento.

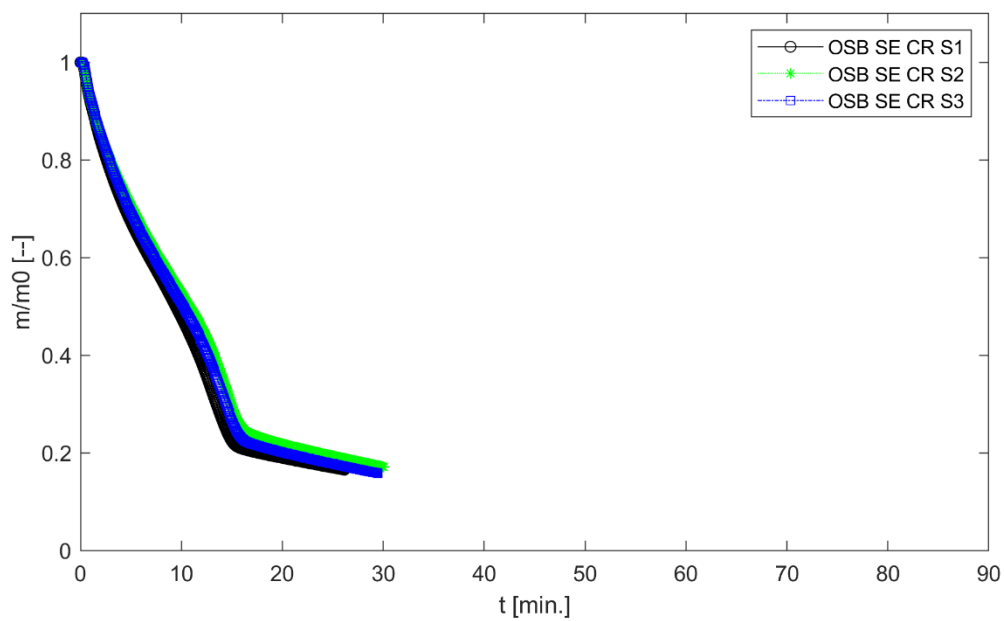


Figura 112 Perda de Massa do OSB com retardante.

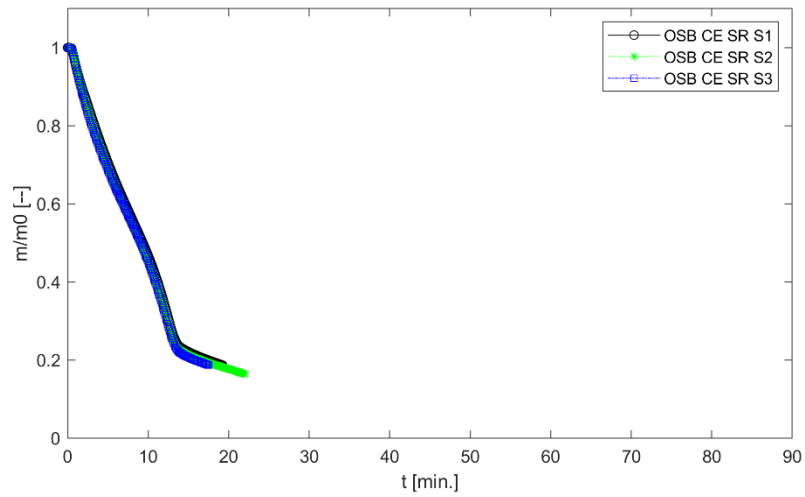


Figura 113 Perda de Massa do OSB após combinação 1.

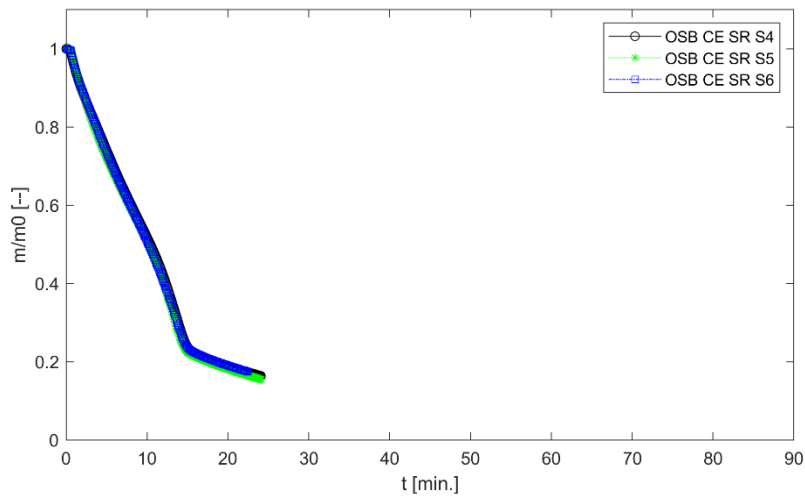


Figura 114 Perda de Massa do OSB após combinação 6.

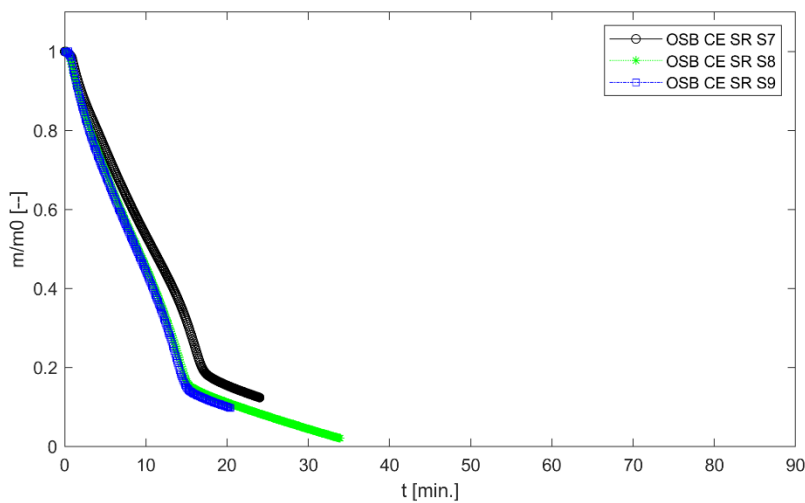


Figura 115 Perda de Massa do OSB após combinação 8.