



**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E REAÇÃO AO
FOGO DOS PAINÉIS DE DERIVADOS DE MADEIRA**

LUCAS COIMBRA FERLE

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo Engenharia Mecânica

Outubro de 2018



AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REAÇÃO AO FOGO DOS PAINÉIS DE DERIVADOS DE MADEIRA

LUCAS COIMBRA FERLE

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia Industrial, ramo Engenharia Mecânica**, no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:

Prof.º Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Orientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Gerson H. dos Santos

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri.

Outubro de 2018

*“Se eu tivesse oito horas para cortar uma árvore,
gastaria seis afiando o meu machado.”*

(Abraham Lincoln)

Dedico este trabalho aos meus pais, Nilza e Valdir.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador e coorientador: Professor Doutor Luís Manuel Ribeiro de Mesquita e Professor Doutor Gerson Henrique dos Santos pela disponibilidade e dedicação com que orientou este trabalho, sempre dispondo a ajudar em eventuais dúvidas e problemas.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança-Portugal que teve fundamental importância na conceção deste trabalho, disponibilizando todas as ferramentas necessárias. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Brasil por ter contribuído diretamente com os meus conhecimentos críticos/científicos durante a minha formação.

Aos responsáveis dos laboratórios do Instituto Politécnico de Bragança: Técnico do laboratório de manutenção André Seca e Engenheira responsável pelo laboratório de resistência dos materiais Luiza Barreira, por terem ajudado cedendo ferramentas e técnicas para a conceção das amostras utilizadas neste trabalho.

Agradeço à companhia Sonae Arauco por disponibilizar os painéis de madeira utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por último e não menos importante, agradeço imensamente todo o apoio dos meus familiares e amigos que contribuíram direta e indiretamente na minha formação. Daniele Ferle, Adriane Ferle e um agradecimento especial a uma pessoa muito importante que me apoiou durante esta pesquisa, Amanda Dombrowski. Agradeço também ao amigo Thiago Boer de Oliveira e meu cunhado Altair Junior Ancelmo Soares que teve contribuição direta durante o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Resumo

A madeira e painéis de derivados de madeira tem sido fortemente utilizado na construção civil nos últimos anos, principalmente devido às políticas de sustentabilidade. Devido a isso, houve a necessidade de desenvolver normativas de segurança contra incêndio para produtos utilizados na construção civil fazendo com que as empresas desenvolvessem e aplicassem produtos retardantes de chamas nos seus materiais, com o intuito de diminuir a taxa de libertação de calor e o tempo de ignição da chama. Os produtos de madeira quando expostos às condições climáticas, tais como humidade, temperatura e radiação UV podem perder a sua durabilidade que acabam influenciando nas propriedades mecânicas e de reação ao fogo.

Neste trabalho é apresentada uma avaliação do desempenho da durabilidade através de ciclos de envelhecimento artificial dos painéis derivados de madeira com e sem retardante de chama, com o objetivo de avaliar possíveis perdas nas propriedades mecânicas e reação ao fogo.

Foram efetuados ciclos de envelhecimento artificial segundo a ETAG 028:2012, [1], com variações de humidade e temperatura durante 10 dias ininterruptos nos painéis de MDF com e sem retardante de chamas, PB com e sem retardante de chamas e OSB sem retardante de chamas. Após o envelhecimento, utilizou-se o teste de flexão em três pontos segundo a EN 310:1993, [2], com o objetivo de avaliar e comparar as propriedades mecânicas dos painéis antes e após o envelhecimento artificial, no que diz respeito à tensão máxima de flexão (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). O estudo da reação ao fogo também foi realizado através do calorímetro de perda de massa utilizando a ISO 5660-1, [3], afim de avaliar se as propriedades de reação ao fogo foram mantidas ou alteradas após o envelhecimento dos painéis de acordo com a EN 16775:2017, [4].

Em termos de propriedades mecânicas, todos os painéis apresentaram perdas significativas nos valores de MOR e MOE com exceção do OSB que possui uma resina de

pMDI resistente à humidade. As reduções nas propriedades mecânicas foram menores para os painéis de MDF com retardante de chamas quando comparado ao MDF sem retardante de chama enquanto que o PB sem retardante de chama apresentou perdas menores do que em relação ao PB com retardante de chamas. Os painéis de MDF sem retardante de chama apresentaram perdas nas propriedades de reação ao fogo, libertando mais calor nas amostras após o envelhecimento, enquanto que no PB e OSB sem retardante de chama, as propriedades foram mantidas. Os painéis ignífugos de MDF e PB não perderam a durabilidade e continuaram na classe B de reação ao fogo.

Palavras Chave: Painéis de madeira; Durabilidade; Envelhecimento Acelerado; Resistências mecânica, Reação ao fogo.

Abstract

The use of wood and wood panels has been heavily used in civil construction in recent years, mainly due to sustainability policies. Due to this, there was a need to develop fire safety regulations for products used in construction, causing companies to develop and apply flame retardant products in their materials in order to reduce the heat release rate, the ignition time and avoiding the flame propagation. Wood products when exposed to weathering conditions, such as humidity, temperature and UV radiation, can lose their durability, influencing the mechanical properties and fire reaction.

In this work, a durability evaluation performance through the artificial aging cycles of the wood panels with and without flame retardant is presented, in order to evaluate if there were losses in the mechanical properties and fire reaction.

Artificial aging cycles according to ETAG 028: 2012 were performed with humidity and temperature variations for 10 days without interruption in MDF panels with and without flame retardant, PB with and without flame retardant and OSB without flame retardant. After aging, the three-point bending test according to EN 310: 1993 was used to evaluate and compare the mechanical properties of the panels before and after the climatic aging with respect to bending resistance (MOR) and modulus of elasticity (MOE). The study of fire reaction was also carried out through the mass loss calorimeter, in accordance with ISO 5660-1, to evaluate if the fire reaction properties were maintained or altered after exposure of the panels to environmental conditions according to EN 16775: 2017.

In terms of mechanical properties, all panels had significant losses in MOR and MOE values except for OSB which had a moisture resistant pMDI resin. Reductions in mechanical properties were lower for MDF panels with flame retardant when compared to MDF without flame retardant whereas PB without flame retardant showed less losses than with PB with flame retardant. The MDF panels without flame retardant presented losses in the fire reaction properties, releasing more heat in the samples after aging, whereas in the PB and OSB

without flame retardant properties were maintained. The MDF and PB fire retardant panels did not lose their durability and continued in the fire reaction class B.

Keywords: Wood based panels; Durability; Artificial aging; Mechanical resistance, Reaction to fire.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
NOMENCLATURA	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	XIX
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO (INTRODUÇÃO).....	XIX
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE	XXII
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DOS PAINÉIS DE MADEIRA	24
2.1.1 <i>Envelhecimento natural</i>	25
2.1.2 <i>Envelhecimento artificial</i>	26
2.2 DURABILIDADE DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS PAINÉIS DE MADEIRA	27
2.3 DURABILIDADE NA AVALIAÇÃO DA REAÇÃO AO FOGO	33
CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE MADEIRA	45
3.1 INTRODUÇÃO.....	45
3.2 MADEIRA MACIÇA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS	45
3.2.1 <i>Estrutura macroscópica da madeira</i>	45
3.2.2 <i>Parede celular</i>	46
3.3 PAINÉIS DERIVADOS DE MADEIRA	47
3.3.1 <i>Aglomerado de Partículas (PB)</i>	50
3.3.2 <i>Fibras de média densidade (MDF)</i>	52
3.3.3 <i>Aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB)</i>	55
3.1 A INFLUÊNCIA DO TIPO DE RESINA E DA DENSIDADE DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS	57
3.2 RESINAS SINTÉTICAS E RETARDANTE DE CHAMAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS.	58

3.2.1	<i>Resinas à base de Ureia-formaldeído (UF)</i>	59
3.2.2	<i>Resinas à base de melamina-ureia-formaldeído (MUF)</i>	60
3.2.3	<i>Adesivos Poliuretanos (MDI-pMDI)</i>	60
3.2.4	<i>Retardantes de chama</i>	61
3.3	COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS NA REAÇÃO AO FOGO.....	62
3.3.1	<i>Propriedades de reação ao fogo</i>	63
CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS		
67		
4.1	INTRODUÇÃO	67
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	68
4.2.1	<i>Envelhecimento artificial</i>	68
4.2.2	<i>Preparação dos painéis para exposição climática</i>	70
4.2.1	<i>Preparação dos provetes para os ensaios de flexão estática</i>	75
4.2.2	<i>Procedimento do ensaio de flexão</i>	79
4.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	82
4.4	CONCLUSÕES	99
CAPÍTULO 5: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA REAÇÃO AO FOGO		101
5.1	INTRODUÇÃO	101
5.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA AVALIAÇÃO DA REAÇÃO AO FOGO.....	102
5.2.1	<i>Envelhecimento artificial</i>	102
5.2.2	<i>Avaliação da reação ao fogo</i>	103
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	108
5.4	CONCLUSÕES	119
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		120
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	120
6.2	LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO	123
REFERÊNCIAS		125
ANEXOS		130
A1.	TABELAS SOBRE AS INFORMAÇÕES DOS PROJETOS UTILIZADOS NO TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA.	130
A2.	GRÁFICOS DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PAINÉIS DE DERIVADOS DE MADEIRA	138

Lista de figuras

Figura 1 - Absorção de CO ₂ para cada metro cúbico de painel de madeira, [8].	xix
Figura 2 - Construções de madeira, [7], [10].	xx
Figura 3 - Exposição natural dos painéis de madeira, [24], [23].	25
Figura 4 - Variação das propriedades mecânicas com a variação da temperatura, [25].	26
Figura 5 - Rugosidade da superfície de aglomerado de partículas: a) condição seca, b) condição húmida, [11].	28
Figura 6-Influência do intemperismo natural na superfície dos painéis: OSB (a,b,c) e MDF(d,e,f), [11].	29
Figura 7 - Propriedades mecânicas em função da humidade relativa (RH) e quantidade de humidade no painel (MC), [26].	30
Figura 8 - Efeito da exposição em diferentes dias no módulo de rotura da madeira tratada e não tratada, [31].	32
Figura 9 - Relação entre a perda na resistência à flexão (MOR) e as alterações no teor de componentes presentes na hemicelulose e celulose, [32].	33
Figura 10 - Comparação de HRR e THR entre PB ignífugo e não ignífugo, [34].	35
Figura 11 - Designação da composição do MDF com retardante de chama, [35].	35
Figura 12 - Resultado dos testes no calorímetro de cone para o MDF com diferentes rácios de retardante de chama, [35].	36
Figura 13 - Restrições do uso de estruturas de madeira para edifícios superiores, [36].	37
Figura 14 - Estrutura com painel de madeira exposto ao fogo, [37].	37
Figura 15 - Envelhecimento natural dos painéis de madeira com retardantes de chama para ambientes externos, expostos a 90° e 45°, [40].	41
Figura 16 - Resultados do desempenho de reação ao fogo para diferentes produtos ignífugos antes e após o envelhecimento acelerado de acordo com NT FIRE 53, método A e após o intemperismo natural em um declive de 45° até 10 anos, [40].	43
Figura 17 - Seção transversal de um tronco de madeira, [41].	46

Figura 18 - Estruturas importantes na madeira: a) células importantes na estrutura b) representação esquemática de uma célula vegetal, [43], [6].	47
Figura 19 - Ciclo de carbono dos produtos de construção em madeira, [44].	48
Figura 20 - Fluxograma representativo dos diferentes tipos de painéis de madeira, [11].	49
Figura 21 - Exemplo de produtos derivados de madeira: a) aglomerados de partículas (PB); b) fibras de média densidade (MDF); c) aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB), d) painel contraplacado (Plywood), [8].	49
Figura 22 - Produção e capacidade das indústrias europeias de painéis de aglomerados, [47].	50
Figura 23 - Tipos de painéis de PB: a) ambientes secos; b) ambientes húmidos; c) retardante de chamas e d) cofragens, [8].	51
Figura 24 - Processo produtivo dos painéis de aglomerados, [8].	52
Figura 25 - Tipos mais usuais de MDF: a) ambientes secos; b) flexíveis; c) ambientes húmidos e d) com retardantes de chama, [8].	53
Figura 26 - Representação da diferença de densidade no MDF: a) camada externa; b) camada interna, [50].	54
Figura 27 - Processo de produção industrial do MDF, [8].	55
Figura 28 - Disposição das camadas do painel OSB: a) Orientação perpendicular à camada interna; b) orientação aleatória da camada interna, [53].	56
Figura 29 - Processo de fabricação dos painel OSB, [8].	56
Figura 30 - Representação da molécula de ureia e formaldeído, [58].	59
Figura 31 - Molécula de Melamina, [58].	60
Figura 32 - Ciclo de vida da combustão, [63].	63
Figura 33 - Curvas de HRR típicas para diferentes comportamentos, [65].	65
Figura 34 - Taxa de perda de massa nos painéis de MDF, [35].	66
Figura 35 - Representação da sequência utilizada para a caracterização mecânica.	68
Figura 36 - Painéis de derivados de madeira: a) MDF-ST-NFR; b)MDF-FR; c)PB-P2-NFR; d)PB-P2-FR e e) OSB4-NFR, [8].	70
Figura 37 - Obtenção das amostras para o envelhecimento: a) serra circular, b) dimensões de corte dos painéis.	73
Figura 38 - Amostras utilizadas nos testes de envelhecimento: a) MDF-ST-NFR; b) MDF-FR; c) PB-P2-NFR; d) PB-P2-FR; e) OSB4-NFR.	73

Figura 39 - Máquina ACS DM 600 (esq.), painéis expostos no interior da câmara de climática (dir.)	74
Figura 40 - Painel eletrônico da máquina: a) condições climáticas da 1ª etapa; b) condições climáticas da 2ª etapa.	75
Figura 41 - Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos.	75
Figura 42 - Esquema dos provetes cortados para a caracterização mecânica.	76
Figura 43 - Obtenção dos provetes após corte das amostras.....	77
Figura 44 - Condicionamento climático dos provetes.....	78
Figura 45 - Suportes maquinados para atender à norma EN310.....	79
Figura 46 - Distância máxima entre os apoios sem o suporte (esq.) e com o suporte (dir.).	79
Figura 47 - Máquina universal INSTRON 3382.....	80
Figura 48 - Teste de flexão em três pontos, antes do teste (esq.) e após o teste (dir.).	81
Figura 49 - Representação de alguns provetes submetidos ao teste de flexão em três pontos.	82
Figura 50 - Aparecimento de cristais de sais inorgânicos decorrente do envelhecimento climático.	83
Figura 51 - Perda da coloração nos painéis de MDF-FR: antes do envelhecimento (esq.) e após o envelhecimento (dir.).	83
Figura 52 - Propriedades mecânicas MDF-ST-NFR a 0°; provetes não envelhecidos (esq.) e provetes envelhecidos (dir.).....	84
Figura 53 - Gráficos de MOR e F _{máx} do MDF-ST-NFR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	86
Figura 54 - Propriedades mecânicas MDF-FR a 0°; provetes não envelhecidos (esq.) e provetes envelhecidos (dir.).	87
Figura 55 - Gráficos de MOR e F _{máx} do MDF-FR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	88
Figura 56 - Propriedades mecânicas PB-P2-NFR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).	90
Figura 57- Gráficos de MOR e F _{máx} do PB-P2-NFR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	91
Figura 58 - Propriedades mecânicas PB-P2-FR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).....	92

Figura 59 - Gráficos de MOR e F _{máx} do PB-P2-FR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	93
Figura 60 - Propriedades mecânicas OSB4-NFR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).	95
Figura 61 - Gráficos de MOR e F _{máx} do OSB4-NFR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	96
Figura 62 - Propriedades mecânicas OSB4-NFR a 90°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).	97
Figura 63 - Gráficos de MOR e F _{máx} do OSB4-NFR a 90°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).	98
Figura 64 - Fluxograma representativo de realização dos procedimentos para o teste no calorímetro de cone.	102
Figura 65 - Amostras submetidas ao envelhecimento climático: camara climática (esq.) e amostras devidamente preparadas (dir.).	103
Figura 66 - Calorímetro de perda de massa: a) Principais componentes da máquina, b) painel eletrônico de controlo.	104
Figura 67 - Temperatura utilizada nos testes e medidor do fluxo de calor.	105
Figura 68 - Procedimentos para calibrar a taxa de libertação de calor: a) regulador do caudal de gás, b) queimador e c) execução do procedimento.	106
Figura 69 - Placa de gesso utilizada para proteger a superfície da amostra (esq.) e ignitor elétrico (dir.).	106
Figura 70 - Condicionamento climático das amostras.	107
Figura 71 - Amostras antes e após a exposição ao fogo.	108
Figura 72 - Reação ao fogo dos painéis de MDF sem retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).	110
Figura 73 - Reação ao fogo dos painéis de MDF com retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).	111
Figura 74 - Reação ao fogo dos painéis de PB sem retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).	113
Figura 75 - Reação ao fogo dos painéis de PB com retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).	114
Figura 76 - Reação ao fogo dos painéis de OSB4 sem retardante de chama: não envelhecido (esq.) e com envelhecimento (dir.).	116
Figura 77 - Amostras antes e após o teste: amostras não envelhecidas (a e b) e amostras envelhecidas (c e d).	117

Figura 78 - Comparação do tempo de ignição entre os painéis envelhecidos e não envelhecidos.	118
Figura 79 - MDF-ST-NFR-90°; não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).....	139
Figura 80 - MDF-FR-90°, não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).....	140
Figura 81 - PB-NFR-90°; amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).....	141
Figura 82 - PB-FR-90°; não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).	142

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação de reação ao fogo dos produtos de construção, [12].....	xxi
Tabela 2-Influência dos fatores climáticos nos painéis, [20].	27
Tabela 3 - Visão geral das classes de reação ao fogo para produtos de construção, exceto pavimentos, [33].	38
Tabela 4 - Tipos de retardantes de chamas utilizados em função das condições de aplicação, [17].	39
Tabela 5 - Testes de envelhecimento acelerado de produtos de madeira com retardantes de chamas usado no EUA, [20].	40
Tabela 6 - Requisitos para classe de desempenho de reação ao fogo dos produtos de madeira para aplicações internas e externas, [4], [37].....	41
Tabela 7 - Desempenho da durabilidade de reação ao fogo, [1].	44
Tabela 8 - Determinação das condições climáticas para as diferentes condições de uso, [1].....	69
Tabela 9 - Propriedades físicas e químicas dos painéis, [8].	72
Tabela 10 - Propriedades mecânicas dos painéis do fabricante [8].	72
Tabela 11- Condições climáticas para as condições de uso Z1,[1].	74
Tabela 12 - Dimensões dos provetes utilizadas para o teste de flexão estática.....	76
Tabela 13 - Numero total de provetes utilizados em cada série.	77
Tabela 14 - Comparação da redução das propriedades mecânicas dos painéis de MDF. ...	89
Tabela 15 - Comparação da redução das propriedades mecânicas dos painéis de PB.	94
Tabela 16 - Comparação das propriedades mecânicas antes e após o envelhecimento do OSB4.	99
Tabela 17 - Fluxo de calor e caudal de gás utilizado na calibração.	105
Tabela 18 - Designação e número de amostras.	107

Tabela 19 - Resultados dos testes de reação ao fogo dos painéis de MDF.	112
Tabela 20 - Valores dos testes de reação ao fogo dos painéis de aglomerados (PB).....	115
Tabela 21 - Valores dos testes de reação ao fogo do OSB4.....	116
Tabela 22 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-NAGED-0°.	130
Tabela 23 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-AGED-0°.	130
Tabela 24 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-NAGED-90°.	131
Tabela 25 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-AGED-90°.	131
Tabela 26 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-NAGED-0°.	131
Tabela 27 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-AGED-0°.	132
Tabela 28 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-NAGED-90°.	132
Tabela 29 - Resultado dos testes aos provetes de MDF-FR-AGED-90°.....	132
Tabela 30 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-NAGED-0°.	133
Tabela 31- Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-AGED-0°.....	133
Tabela 32 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-NAGED-90°.	134
Tabela 33 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-AGED-90°.....	134
Tabela 34 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-NAGED-0°.....	134
Tabela 35 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-AGED-0°.....	135
Tabela 36 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-NAGED-90°.....	135
Tabela 37 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-AGED-90°.....	136
Tabela 38 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-0°.	136
Tabela 39 - Resultados dos testes aos provetes OSB4-NFR-AGED-0°.....	137
Tabela 40 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-90°.	137
Tabela 41 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-90°.	138

Nomenclatura

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

F	Força
F1	Força correspondente a 10% da força máxima
F2	Força correspondente a 40% da força máxima
F _{máx}	Força máxima na flexão
T0	Temperatura ambiente
T _{ign}	Tempo de ignição

Letras minúsculas do alfabeto latino

b	Largura
c ₀	Capacidade calorífica do material
dv	Deslocamento vertical
hg	Calor de gaseificação por unidade de massa
l1	Distância entre os apoios
l2	Comprimento total do provete
m/m ₀	Massa residual
t	Espessura da amostra/provete

Letras maiúsculas do alfabeto grego

Letras minúsculas do alfabeto grego

α_1	Incremento de deformação equivalente a 10% da força máxima
α_2	Incremento de deformação equivalente a 40% da força máxima
ε	Tensão na flexão
σ	Deformação sofrida pelo material

Siglas

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
BBA	Ácido bórico
BWPDA	Associação Britânica de preservação da madeira e tratamento de água
DAP	Fosfato diamônico
DEF	Formaldeído dicianodiamida
EMC	Teor de humidade de equilíbrio
EPF	Federação europeia dos fabricantes de aglomerados
FR	Retardante de chama
GUP/B	Fosfato de guanilureia/bórico
HRR	Taxa de libertação de calor
IB	Resistencia de ligação interna
ID	Adesão interna
LDH	Hidróxido duplo
LM	Lamela média
MAP	Fosfato monoamônico
MC	Teor de humidade
MDI	Dissocianato de difenilmetano
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Resistência à flexão
MP	Pirofosfato de meanina
MUF	Melamina-ureia-formaldeído
OPE	Fosfato de dietil
PA	Ácido fosfórico
PF	Fenol-formaldeído

PHRR	Pico da taxa de transferencia de calor
pMDI	Polimerico dissociante de difenilmetano
PVA	Álcool polivinílico
RH	Humidade relativa
S1, S2, S3	Camada primária e secundária presente na célula da madeira
TARE	Tara da balança
THR	Libertação total de calor
TI	Tempo de ignição
TS	Inchamento de espessura
UF	Ureia-formaldeído

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto e motivação (introdução)

Nos últimos anos o homem tem-se preocupado demasiado com a emissão de poluentes e com o intuito de ajudar na redução da emissão de CO₂ a união europeia criou um modelo de economia mais limpa e competitiva a longo prazo, com o objetivo de atingir uma redução global de 80% nas emissões domésticas de dióxido de carbono até 2050, [5]. Com isso, uma das formas mais usadas para diminuir a emissão de carbono é utilizar a madeira em construções de casas e edifícios. Aproximadamente 20% das casas novas do Reino Unido e até 70% na Escócia são estruturas de madeira. Estudos realizados recentemente estimam que para cada 200 mil novas casas a serem construídas com madeira é possível armazenar cerca de 4 milhões de toneladas de dióxido de carbono a cada ano, [6], [7]. A Figura 1 representa que para cada 1 [m³] de painel uma tonelada de CO₂ é absorvida em forma de carbono.



Figura 1 - Absorção de CO₂ para cada metro cúbico de painel de madeira, [8].

De acordo com o arquiteto Michael Green: “A madeira é o material tecnologicamente mais avançado com o qual podemos construir. A terra cresce nossa comida. A terra pode crescer também nossas casas. É uma mudança ética que temos que passar”, [7]. No Japão, o maior arranha-céus feito de madeira será construído com 70 andares. Será utilizado uma mistura híbrida de madeira-aço na proporção de 9:1 de madeira para aço e tem como objetivo substituir o uso de concreto e diminuir as emissões de dióxido de carbono, além de estimular

a construção de novas estruturas em madeira, [9]. A Figura 2 representa construções feitas em madeira.



Figura 2 - Construções de madeira, [7], [10].

A recente substituição do concreto utilizado na construção civil pela madeira e painéis derivados de madeira levou a diferentes desafios, como desenvolvimento de resinas utilizadas na colagem das fibras, tecnologia utilizada na produção, medição de técnicas on-line entre outros. A adaptação dessas tecnologias à indústria de derivados de madeira foi motivada pelo requisito de melhorar a qualidade do produto para diversas aplicações e reduzir os custos de produção. Os painéis de madeira são fabricados para diversas aplicações: ambientes secos e úmidos, pavimentos, aplicações exteriores e decorativos. A emissão de formaldeído presente nas resinas estão sendo reduzidas nos últimos anos e devido às exigências normativas utilizadas no ramo da construção civil, fez-se necessário desenvolver produtos que ajudam a reduzir compostos orgânicos voláteis através de produtos retardadores de chamas, [11].

A madeira e os produtos de madeira podem perder as suas propriedades físico-químicas no decorrer do tempo, devido às condições climáticas como: temperatura, humidade, radiação ultravioleta, chuva e neve; sendo suscetíveis até mesmo a ataques de seres vivos como bactérias e fungos. Devido a isso, os produtos derivados de madeira podem perder as suas propriedades mecânicas e os sais inorgânicos presentes na resina ignífuga podem perder a sua durabilidade, ocasionando sérios problemas às construções, aumentando o fluxo de calor que contribuiria num suposto incêndio e a diminuição do tempo de ignição inicial da chama.

Segundo a EN 13501-1:2007, [12], os produtos utilizados na construção civil são classificados de acordo com sua reação ao fogo, e esta classificação decorre entre A1, A2, B, C, D, E e F, sendo F a pior classificação. Atualmente, a madeira e painéis derivados de madeira sem retardante de chamas são classificados em D, enquanto que se forem adicionadas resinas ignífugas são classificados em B. A Tabela 1 representa a classificação geral dos produtos de reação ao fogo de acordo com a EN 13501-1:2007.

Tabela 1 - Classificação de reação ao fogo dos produtos de construção, [12].

Classe	Produção de Fumo	Libertação de gotículas incandescentes	Produtos típicos
A1	-	-	Pedra, Betão
A2	s1 s2, or s3	d0 d1 or d2	Placas de gesso, lâ mineral
B	s1 s2, or s3	d0 d1 or d2	Madeira/painéis de madeira com retardante de chama
C	s1 s2, or s3	d0 d1 or d2	Revestimentos em placas de gesso
D	s1 s2, or s3	d0 d1 or d2	Madeira, painéis de madeira
E	-	- or d2	Polímeros sintéticos
F	-	-	Nenhum desempenho determinado

Sabendo que os produtos ignífugos podem sofrer deterioração da resina ignífuga e conseqüentemente perder propriedades importantes de reação ao fogo, em 2017 foi lançada uma norma europeia EN16755:2017, [4], que busca avaliar a durabilidade dos retardantes de chamas na utilização dos painéis de madeira quando expostos a condições climáticas. Esta norma exige que a durabilidade dos produtos de madeira utilizados em aplicações exteriores devem ser mantidas após a exposição climática, mas não possui nenhuma exigência sobre a reação ao fogo dos painéis de madeira utilizados em ambientes internos após o envelhecimento natural/acelerado que pode manter ou perder as propriedades de reação ao fogo, quando comparado aos painéis antes do envelhecimento climático. No pior caso a classificação pode passar da classe B para a C.

1.2 Organização da tese

Esta tese encontra-se dividida em seis capítulos, no capítulo 1 está presente uma breve introdução ao tema que está sendo abordado, bem como a organização da tese.

No capítulo 2, denominado como estado da arte, é apresentado alguns estudos já realizados sob a avaliação da durabilidade das propriedades mecânicas e de reação ao fogo dos painéis de madeira após ao envelhecimento climático.

No capítulo 3, fez-se necessário apresentar um desenvolvimento teórico sobre os painéis de madeira, principalmente sobre os tipos utilizados nesta pesquisa. Expondo a importância da utilização de madeira e painéis de madeira na construção nos dias de hoje. Descreveu-se características importantes da constituição físico-mecânica da madeira, e o processo produtivo dos painéis. Não poderia ter ficado de lado o enfoque nos tipos e características das resinas e retardantes de chamas utilizados na produção de painéis, pois para este estudo faz-se necessário o conhecimento básico de alguns fenômenos relacionado às resinas quando expostos à condições climáticas.

O capítulo 4 apresenta a descrição de como foi realizado o envelhecimento artificial de acordo com a ETAG028:2012 para os painéis submetidos à caracterização mecânica, além de ter avaliado a durabilidade das propriedades mecânicas dos painéis antes e após o envelhecimento utilizando a EN310:1993 através do teste de flexão em três pontos a fim de determinar a tensão máxima de flexão, módulo de elasticidade e força máxima de flexão.

No capítulo 5 é descrita a realização do envelhecimento climático para os painéis posteriormente submetidos ao ensaio no calorímetro de cone, de acordo com a ISO 5660, afim de avaliar a durabilidade de reação ao fogo dos painéis com retardante de chama, de acordo com a EN16755:2017.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais de todo o trabalho e a indicação de novas linhas/temas de investigação.

Capítulo 2: Estado da arte

2.1 Introdução

Nos últimos anos, devido às políticas e restrições ecológicas e ambientais, a madeira, produtos de madeira e os elementos estruturais de madeira têm sido posicionados como matéria-prima ecologicamente sustentável e renovável, com um impacto positivo nas reduções de emissões de dióxido de carbono quando utilizados na construção e em comparação com outros materiais como o aço, betão e produtos de alvenaria. As referências a uma economia competitiva baseada em baixas emissões de carbono, [5], impulsionou a sua utilização a nível arquitetónico e na indústria da construção, existindo atualmente uma exigência crescente ao nível dos requisitos de desempenho ao longo do seu ciclo de vida, como a utilização sustentável dos recursos naturais, resistência mecânica e estabilidade, segurança em caso de incêndio, entre outros, [13].

A utilização disseminada de madeira e produtos de madeira na construção levou à necessidade de desenvolvimento de novos produtos, nomeadamente painéis derivados de madeira, como painéis de partículas (PB), painéis de fibras de média densidade (MDF), madeira contraplacada, pavimentos de madeira, painéis de fibras longas e orientadas (OSB), madeira laminada cruzada (CLT), entre outros, [14].

Os produtos estruturais de madeira, quando expostos a variações significativas de humidade, podem levar ao inchamento ou retração, provocando o seu empenamento e o aparecimento de fendas, ocasionando em perdas na durabilidade, reduzindo as suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional entre outros. Estas fendas superficiais originam uma diminuição da reação e da resistência ao fogo, já que as chamas podem propagar-se pelas mesmas provocando uma taxa de carbonização da secção mais elevada e conseqüentemente um aumento da taxa de libertação de calor (HRR). Por estas razões, a utilização de tratamentos térmicos, físicos ou químicos, é decisiva para a melhoria da

estabilidade e durabilidade da madeira, tendo igualmente como consequência um aumento da resistência à degradação biológica, resistência ao fogo, resistência UV e das suas propriedades mecânicas, [15], [16].

A madeira é considerada um material combustível, e mesmo possuindo uma proteção ao fogo natural decorrente da carbonização que diminui a taxa de aquecimento, o regulamento Europeu dos produtos de construção, EN13501-1, [12], expõe que a madeira sem tratamento é classificada na classe de reação D e os produtos de menor densidade na classe E. Este sistema classifica os produtos de construção de acordo com o seu desempenho da reação ao fogo, produção de fumo e queda de gotas ou de partículas inflamadas. Quando é aplicado um tratamento com material ignífugo, os produtos de madeira podem chegar a um nível de classificação C ou B, de acordo com a Tabela 1.

2.1 Métodos de avaliação da durabilidade dos painéis de madeira

A durabilidade dos produtos naturais sofre influência direta do meio que o circula. A utilização dos painéis de madeira na construção tem-se tornado frequente nos últimos anos, mas para isso faz-se necessário o conhecimento das variáveis que podem influenciar na durabilidade e desempenho. Com o passar do tempo, as madeiras e produtos derivados de madeira vão sofrendo degradação das suas propriedades físicas e químicas gerando fragilidade de propriedades mecânicas e facilidade à degradação biológica formada por fungos e bactérias, [6]. A madeira e seus derivados são expostos a condições climáticas tais como a humidade, chuva, temperatura, radiação ultra-violeta (UV) passando por leves, moderadas e agressivas modificações nas suas propriedades físico-químicas. A qualidade dos produtos de madeira são determinadas por três parâmetros principais: tipo de madeira, adesivo ligante, condições a que são expostos os produtos e parâmetros do processo, [17], [18]. As principais formas de avaliar a durabilidade dos produtos de madeira é através do envelhecimento, sendo dividido em: envelhecimento natural e artificial.

O envelhecimento é entendido com a mudança irreversível das propriedades físicas e mecânicas de um determinado material num intervalo de tempo causando a deterioração destes materiais, e são ocorridos devidos a fatores climáticos ambientais além de sofrer influência direta ao ataque de fungos e bactérias, [19].

Para produtos de madeira com retardantes de chamas, é mais importante demonstrar a durabilidade estratificada sob condições húmidas, variações de temperatura, exposição à chuva, radiações UV, entre outros. Assim, o princípio geral para avaliar a durabilidade dos

produtos de madeira com tratamento ignífugo é a comparação do desempenho antes e depois do envelhecimento seja por exposição natural ou artificial, [20].

2.1.1 Envelhecimento natural

Os edifícios e componentes de construção são expostos constantemente a uma ampla variedade de condições ambientais, em especial a madeira e seus produtos sofrem constantemente essas degradações quando expostos a condições naturais, principalmente por ser um material orgânico, [21], [19] causando degradações devido à exposição UV e ambientes húmidos, causando retração e inchamento, [22].

Um estudo realizado recentemente no Japão analisou o efeito da mudança climática sobre a redução de resistência interna nos painéis de aglomerados. Os painéis foram expostos em diferentes localidades com diferentes radiações solares e precipitações de abril de 2004 à março de 2009 e concluiu-se que houve a rotura dos pontos de colagem interior causada pela exposição que acelerou o processo da biodegradação, [23].

Um outro estudo que buscou avaliar a durabilidade dos painéis de madeira no que diz respeito ao módulo de elasticidade (MOE) e resistência à flexão (MOR) durante uma exposição de 7 a 12 anos de diferentes painéis de madeira apresentou grandes variações nas propriedades mecânicas, onde os painéis com piores desempenho perderam mais de 50% da resistência à flexão nos primeiros 3 anos e os de melhor desempenho perderam menos de 50% de MOR após 10 anos de exposição, [24]. A Figura 3 representa a exposição dos painéis utilizados nos estudos acima.

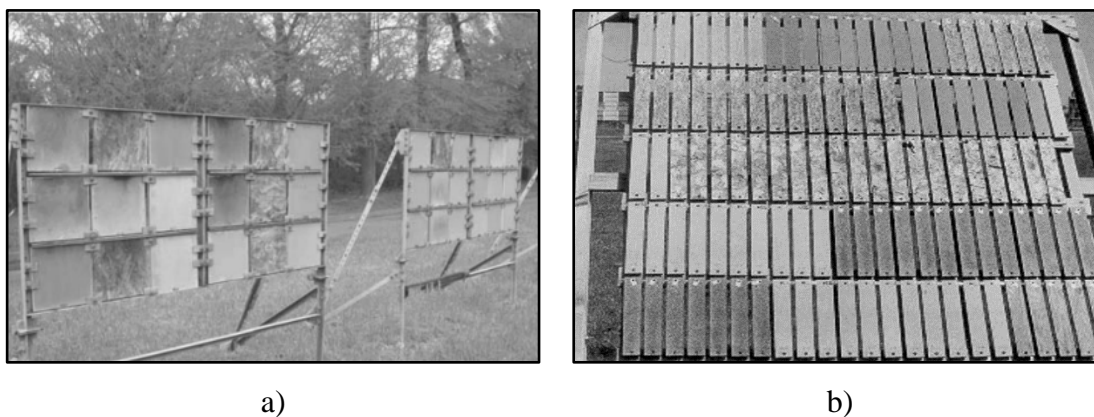


Figura 3 - Exposição natural dos painéis de madeira, [24], [23].

Em 2010, Ayrilmis *et al.* avaliaram a influência da temperatura na resistência à flexão e no módulo de elasticidade de três tipos de painéis comerciais à base de madeira (plywood, MDF e OSB), utilizando as temperaturas de -30 [°C] à +30 [°C]. Observou-se que a temperatura teve efeito significativo nas propriedades mecânicas em todos os painéis, como mostra a Figura 4. A resistência à flexão e módulo de elasticidade aumentaram com a diminuição da temperatura devido ao aumento da rigidez dos painéis causado pela formação de cristais de gelo nas paredes das células de madeira. Além disso, as propriedades de resistência dos painéis foram mais expressivas nas temperaturas positivas do que em temperaturas negativas, [25].

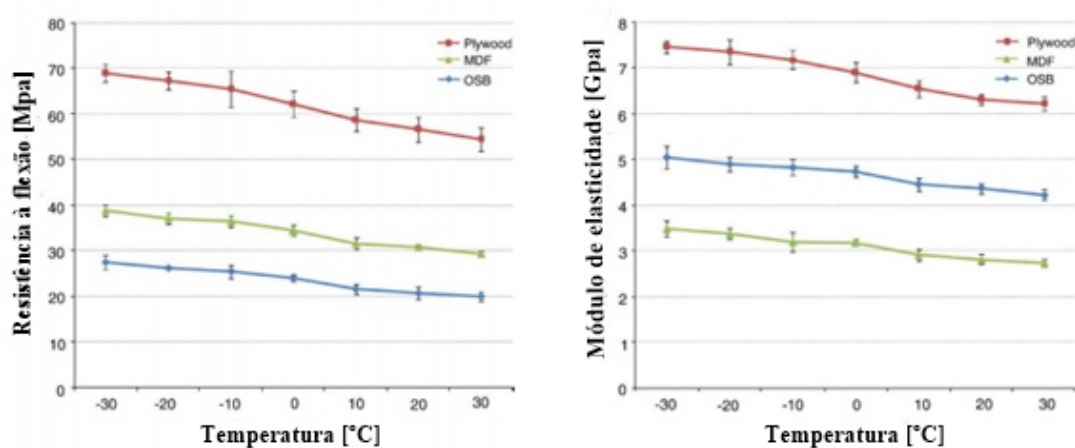


Figura 4 - Variação das propriedades mecânicas com a variação da temperatura, [25].

O problema principal dos testes de envelhecimento natural é o tempo de exposição dos painéis para a avaliação da durabilidade e a não coerência das condições climáticas com a aplicabilidade real dos painéis, uma vez que a maioria dos painéis são expostos a condições interiores, com variações de temperatura e humidade. Devido a isso, métodos de envelhecimento artificial foram desenvolvidos para a realização dos experimentos que intensificam e aceleram através de ciclos repetitivos de condições climáticas pré-determinada, [17].

2.1.2 Envelhecimento artificial

Como todo material biológico, a madeira é suscetível à degradação ambiental, pois quando a madeira é exposta ao ar livre, uma combinação complexa de fatores químicos,

mecânicos e de energia livre contribui para a degradação da madeira e painéis de madeira ocasionando na perda de durabilidade.

O método de envelhecimento artificial para produtos de madeira com retardantes de chamas são: exposição à água/humidade, variações de temperatura e radiação ultra violeta (UV). A Tabela 2 mostra alguns fatores climáticos e a sua influência nas propriedades dos produtos de madeira tratados, [20].

Tabela 2-Influência dos fatores climáticos nos painéis, [20].

Fator Climático	Efeito
Humidade	Lixiviação dos componentes
Radiação solar (UV)	Hidrólise/perda de força/degradação fotoquímica
Temperatura	Perda de força
Oxigênio	Mudança na cor
Poluentes atmosféricos	Mudanças físicas: retração, inchamento e fissuras

2.2 Durabilidade das propriedades físico-mecânicas dos painéis de madeira

Os painéis derivados de madeira são fortemente influenciados por adesivos, densidade e tecnologia de produção (secagem, desfibrilação, prensagem e altas temperaturas). Parcialmente, o comportamento relacionado com a densidade dos painéis pode ser explicado com a presença de adesivos, que tem diferentes comportamentos de sorção, ou seja, podem aderir maior quantidade de adesivo nos painéis de acordo com o tamanho das fibras/partículas. O transporte de humidade na madeira e seus derivados acontecem de acordo com leis capilares cuja velocidade de absorção da água é significativamente influenciada pela densidade do material, ou seja, quanto maior a densidade do material menor a velocidade de absorção.

Os teores de humidade de equilíbrio (EMC), equilíbrio higroscópico, para painéis como MDF, OSB e particulados são menores do que para madeira maciça e isso pode ser causado pelo método de processamento. O EMC tem uma forte influência em todas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais de madeira como: MOR, MOE, resistência da ligação interna (IB), dureza, condutividade térmica, etc.

Durante a fabricação de painéis de partículas de madeira, as partículas são fortemente comprimidas. Quando os painéis ficam húmidos, após a aplicação dos adesivos, ocorre um aumento da espessura das partículas densificadas, acompanhado por um aumento da rugosidade na superfície devido às partículas maiores que durante o processo de fabricação são expostas na parte exterior do painel. Além disso, variações de densidade dos painéis podem causar uma superfície corrugada. A Figura 5 representa um exemplo de diferentes rugosidades quando expostas a condições secas e húmidas.

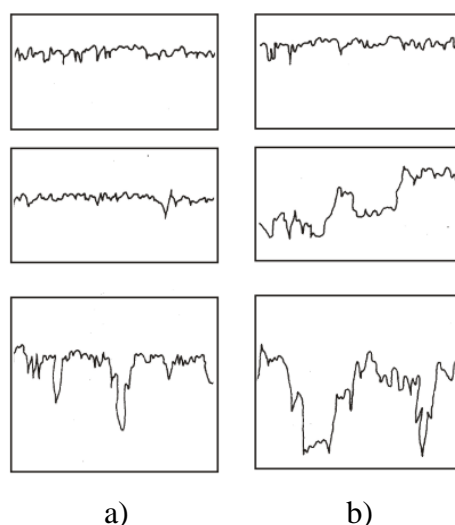


Figura 5 - Rugosidade da superfície de aglomerado de partículas: a) condição seca, b) condição húmida, [11].

O tipo de adesivo e as dimensões das partículas tem ligação direta com a durabilidade da madeira e painéis de madeira após as condições climáticas. Um forte inchamento das partículas na superfície é observado após a exposição à humidade, para o OSB a rugosidade é maior do que para o MDF. A Figura 6 mostra a diferença nas superfícies dos painéis de OSB e MDF durante o intemperismo climático, entre 2004 e 2007.

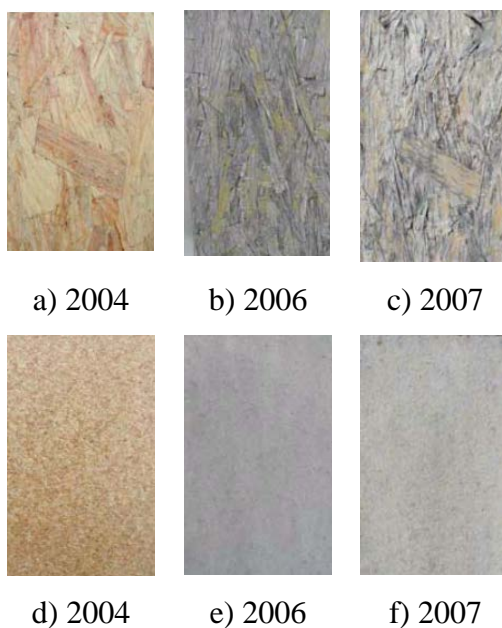


Figura 6-Influência do intemperismo natural na superfície dos painéis: OSB (a,b,c) e MDF(d,e,f), [11].

As propriedades mecânicas dos painéis a base de madeira dependem significativamente do teor de humidade (MC) e da humidade relativa (RH) em que são aplicados.

Em 2009, *Bekhta et al.* avaliaram a influência da humidade relativa (RH) nas propriedades mecânicas de MOR e MOE para três painéis de fibras: medium board (MBL), MDF e hardboard (HB). Os espécimes foram condicionados a 20 [°C] na camara climatizada para equilíbrio em cada uma das cinco condições de RH: 35, 50, 65, 80 e 95%. Os ensaios foram realizados de acordo com a EN 310:1993 com o teste de flexão em três pontos. O teor de humidade depende do tipo de painel e a água é absorvida mais rapidamente e em quantidades maiores para o MBL, menos pelo MDF e ainda menor pela HB, concluiu-se também que existe uma forte relação entre a absorção de água e a resistência à flexão. As perdas das propriedades mecânicas ocorreram com o aumento do teor de humidade. Os resultados obtidos estão representados na Figura 7, [26].

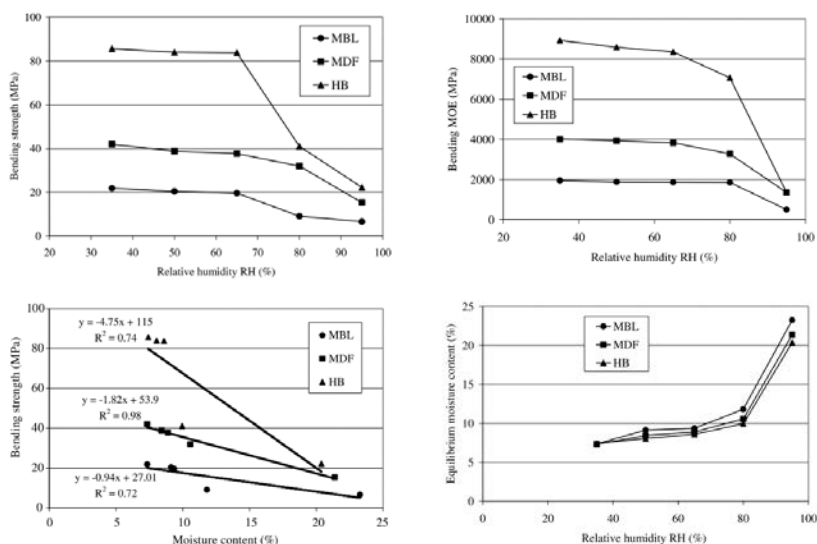


Figura 7 - Propriedades mecânicas em função da humidade relativa (RH) e quantidade de humidade no painel (MC), [26].

Em 2009, *Moya et al.* apresentaram estudos com o efeito de mudanças cíclicas na humidade relativa sobre o teor de humidade (MC) e inchamento de espessura (TS) de OSB, onde submeteram amostras de aglomerados a três ciclos alternados de humidade na faixa de 30 a 90% e descobriu-se que a maior mudança nos valores de MC e TS ocorreu na primeira semana de condicionamento das amostras, [27].

Em 2014, *Kociszewski et al.* analisaram o efeito do teor de humidade e humidade relativa nas propriedades mecânicas dos painéis de aglomerados. As amostras foram acondicionadas durante um mês no laboratório a uma temperatura de 25 [°c] variando os grupos em 55, 65, 75, 85 e 95% de HR e concluiu-se que o módulo de corte dos painéis de partículas dependem significativamente da humidade relativa na qual eles são utilizados. Assim como o teor de humidade do painel de partículas aumenta de forma não-linear com o aumento da humidade relativa. Um aumento na humidade relativa de 95% causa uma redução do módulo de cisalhamento em cerca de metade e a mudança no teor de humidade do painel em 1% resulta na mudança do módulo de corte em cerca de 4,7%, [28].

As exigências de segurança contra incêndio leva à necessidade de utilizar produtos ignífugos na fabricação de madeira e seus derivados. Os produtos químicos retardadores de fogo mais comuns usados em painéis de derivado de madeira são: sais inorgânicos, como ácido fosfórico (PA), fosfato monoamônio (MAP), fosfato diamônio (DAP), sulfato amônio, nitrogénio e composto de boro, [29].

A durabilidade dos tratamentos retardantes de chama quando expostos a condições de humidade está diretamente ligada à solubilidade da água dos produtos químicos utilizados, com exceção dos retardantes que reagem e assim formam substâncias mais complexas e insolúveis na estrutura da madeira, [30].

As propriedades mecânicas dos painéis de madeira com retardantes de chama podem ser facilmente alteradas após o condicionamento climático. Nos últimos anos, observou-se que a madeira tratada com retardante de chama usado como revestimento de telhados perdeu a eficiência durante as condições de serviço, ocasionando diversos incidentes que pode ser explicado pela alta temperatura do sol, originando a degradação de alguns tipos de retardantes de chama, [20].

O retardante de chamas esterifica o polissacarídeo da madeira liberando água, o que promove a reação de desidratação das fibras de madeira. Assim, os ácidos da madeira, especialmente quando acelerados por tratamentos ácidos retardadores de fogo e/ou exposição a altas temperaturas, hidrolisam as cadeias de celulose que são responsáveis pela resistência mecânica da fibra de madeira, [29].

Em 1995, Winandy estudou o efeito da exposição climática nas propriedades mecânicas dos painéis impregnados com retardante de chama durante 18 meses à 66 [°c] sob condições externas. Diferentes tipos de sais retardantes foram avaliados, entre eles: ácido fosfórico (PA), fosfato monoamônio (MAP), bórax e ácido bórico (BBA), formaldeído de dicianodiamida (DEF) e fosfato de dietil (OPE).

Observou-se uma perda nas propriedades mecânicas dos painéis após o intemperismo climático, pois acreditava-se que quando submetidas a temperaturas elevadas, o calor possivelmente ativa o químico presente no material retardante e o ácido presente nos produtos ignífugos aceleram o processo de degradação térmica, Figura 8.

Especificamente, o efeito dos produtos químicos retardantes nas propriedades mecânicas da madeira depende do tipo de produto ignífugo, isso mostra que os tratamentos com ácido fosfórico (PA) e fosfato monoamônio (MAP) reduziram as propriedades de resistência mais severamente.

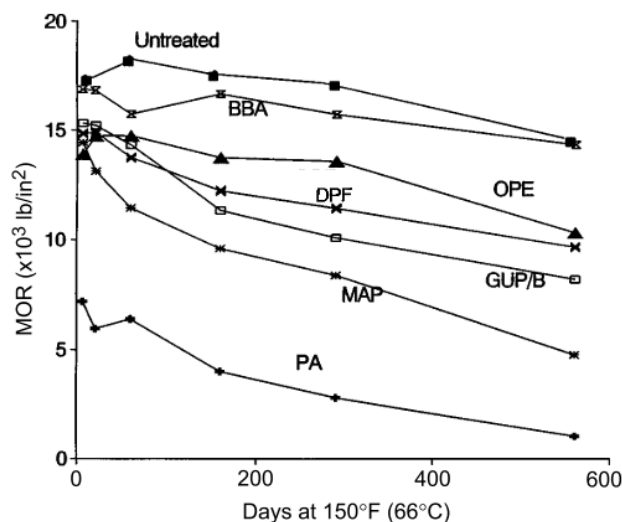


Figura 8 - Efeito da exposição em diferentes dias no módulo de rotura da madeira tratada e não tratada, [31].

Em geral, o conteúdo de hemicelulose da madeira foi significativamente reduzido dependendo diretamente do tipo de produto ignífugo. Tal efeito acontece porque os sais inorgânicos sujeitos a elevadas temperaturas degradaram as moléculas de açúcares situados na hemicelulose. A resistência à flexão nas amostras de madeira diminuíram com o aumento da resina ignífuga e a posterior diminuição do número de células de hemicelulose, [31].

Winandy avaliou também a perda percentual de hemicelulose com diferentes composições e MOR para diferentes tipos de temperaturas e duração de exposição. Para madeira não tratada e tratada com PA e BBA, Figura 9. A exposição dos painéis durante os 4 anos apresentaram perda nas propriedades de MOR e do composto dos açucares da hemicelulose, que conseqüentemente causam perdas nas propriedades mecânicas. É evidente que houve perdas nas propriedades químicas, físicas e mecânicas para todas as faixas de temperaturas e diferentes tipos de tratamentos, mas as maiores perdas foram nos painéis expostos a temperaturas superiores, [32].

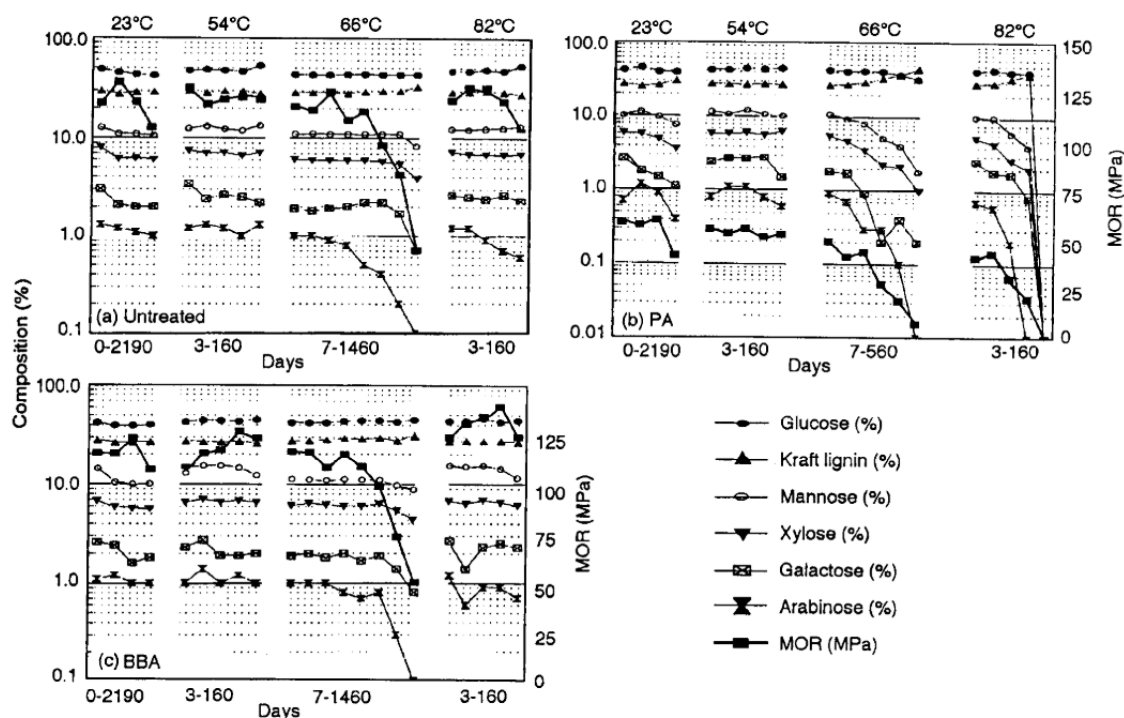


Figura 9 - Relação entre a perda na resistência à flexão (MOR) e as alterações no teor de componentes presentes na hemicelulose e celulose, [32].

Em 2005, *Ayrilmis et al.* avaliaram o efeito de vários produtos químicos ignífugos na resistência da ligação interna (IB) e na durabilidade de adesão de painéis de MDF com cinco diferentes ácidos e quantidades de 2, 4 e 6% de retenção. O ciclo utilizado para analisar a durabilidade foi de 72 horas de imersão de água a 20 [°c], 24 horas de congelamento a -12 [°c] e 72 horas de secagem em estufa a 70 [°c]. Após o condicionamento as amostras foram condicionadas a (20 ± 2) [°c] e (65 ± 2) HR.

Concluiu que os valores de IB dos painéis envelhecidos foram menores do que os não envelhecidos, podendo ser explicado por um conjunto de fatores. Os retardantes de chama podem ter causado mudanças químicas e/ou mecânicas na estrutura e na química da parede celular da madeira; alguns retardadores de chama podem inibir ou acelerar a cura de resinas, alterando o pH que é um fator necessário da resina durante a cura. A terceira é que a contaminação presente na superfície das fibras de madeira pode dificultar a adesão entre as fibras, [29].

2.3 Durabilidade na avaliação da reação ao fogo

Os retardantes de chama podem melhorar consideravelmente a reação de desempenho ao fogo, mas a durabilidade em aplicações internas e externas precisam serem abordadas.

Requisitos sobre a durabilidade do desempenho ao fogo não são mencionados explicitamente na maioria dos códigos de construção, e isto é causado pelo desconhecimento do problema e pela falta de procedimentos.

As obras de construção devem estar aptas para o uso a que se destinam, tendo em conta particular a saúde e a segurança das pessoas envolvidas ao longo do ciclo de vida das obras. Desta forma, alguns requisitos básicos devem ser levados em consideração, como a resistência mecânica e estabilidade, segurança em caso de incêndio, higiene saúde e meio ambiente, segurança e acessibilidade, proteção contra ruído, economia de energia e retenção de calor e o uso sustentável dos recursos naturais, [13].

Os problemas ligados à durabilidade de reação ao fogo ao longo do tempo são estudadas e conhecidas há muito tempo nos EUA, porém muito pouco conhecido na Europa, [33].

A impregnação de produtos retardantes de chamas na madeira e painéis de madeira, podem apresentar uma melhoria nas propriedades de reação ao fogo, no que diz respeito à diminuição da taxa de libertação de calor, do calor total libertado e do tempo de ignição.

Em 2011, Liu avaliou as propriedades de reação ao fogo entre os painéis de aglomerados de partículas (PB) com e sem retardante de chamas. O fluxo de calor utilizado foi de 75 [kW/m²] através do calorímetro de cone. O retardador de fogo utilizado foi o ácido bórico com 8% e o aglomerado não tratado, ou seja, com 0% de retardante de chama. De acordo com Figura 10, a taxa de libertação de calor (HRR) para o PB-FR foi menor do que para o PB não tratado, isso significa que a adição do retardante de chama diminuiu o fluxo de calor emitido pelo painel de madeira após a ignição, diminuindo a emissão de radiação através de calor, enquanto que o painel de PB sem retardante de chama o pico de calor emitido foi consideravelmente maior. Além disso, o PB-FR apresentou valores reduzidos de calor libertado total em comparação com o PB não tratado.

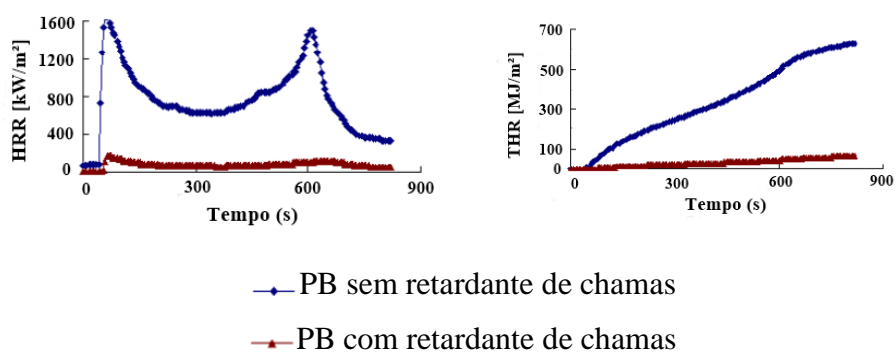


Figura 10 - Comparação de HRR e THR entre PB ignífugo e não ignífugo, [34].

Quando o painel de PB-FR estava em chamas, produzia gases incombustíveis, como dióxido de carbono, nitroso, etc, diminuindo a velocidade de combustão e a quantidade de liberação de calor. O tempo correspondente ao valor de pico da taxa de libertação de calor dos painéis de PB-FR foi significativamente superior em comparação ao PB não tratado, [34].

A adição de diferentes produtos ignífugos em diferentes proporções podem influenciar diretamente nas propriedades de reação ao fogo dos painéis. Em 2017, Liang *et al.* avaliou a eficiência de pirofosfato de melamina (MP) juntamente com a adição de hidróxido duplo (LDH) em painéis de MDF, para avaliar a influência nas propriedades de reação ao fogo. Foram utilizadas misturas em quatro diferentes proporções, como representado na Figura 11.

Designation	Proportions (g)		
	Wood fiber	MP	LDH
MDF	100	0	0
Sample(a) MDF/FR/(MP:LDH=1:1)	90	5	5
Sample(b) MDF/FR/(MP:LDH=1:2)	90	3.3	6.7
Sample(c) MDF/FR/(MP:LDH=2:1)	90	6.7	3.3
Sample(d) MDF/FR/(MP:LDH=3:1)	90	7.5	2.5

Figura 11 - Designação da composição do MDF com retardante de chama, [35].

As diferentes proporções das combinações das resinas resultaram em valores menores de pico da taxa de libertação de calor (PHRR), reduzidos em 47,2%, 32,5%, 40,2% e 40,2, respetivamente. A Figura 12 representa os resultados de HRR e THR para as amostras em diferentes proporções de resinas. Além disso, a adição de quatro proporções de compostos retardadores de chama de MP e LDH em MDF pode claramente diminuir o pico de taxa de

libertação de calor. A combinação de MP e LDH na proporção de 1:1 apresentou melhores resultados do índice de tempo de ignição, valor de pico da taxa de libertação de calor e do valor médio da taxa de libertação de calor, [35].

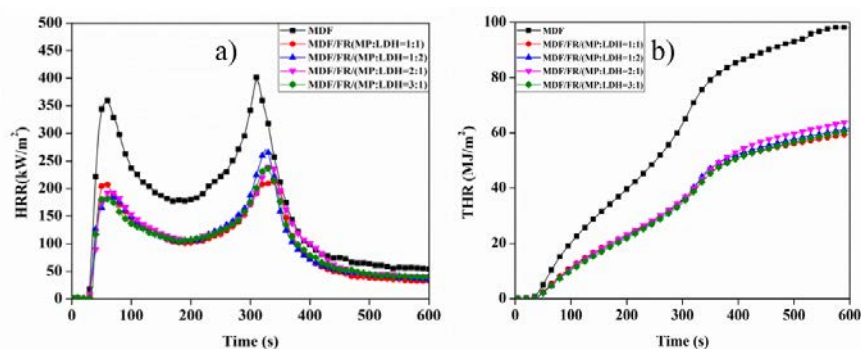


Figura 12 - Resultado dos testes no calorímetro de cone para o MDF com diferentes rácios de retardante de chama, [35].

A alta combustibilidade da madeira é uma das principais razões pelas quais muitos regulamentos e normas de construção restringem fortemente o uso da madeira como material de construção, [36]. A segurança contra incêndios fez com que as exigências normativas utilizadas na construção civil fosse aperfeiçoada, pois cada vez mais novos materiais estão sendo utilizados nas construções como produtos que evitam ou retardam a propagação de calor num eventual incêndio, [30].

Há muitas diferenças nas regulamentações entre os países europeus, tanto em número de andares permitidos em estruturas de madeira, quanto nos tipos e/ou quantidades de superfícies de madeira visíveis em aplicações internas e externas. Normalmente, oito andares é um limite prático e econômico para estruturas de madeira. A Figura 13 representa o uso de madeira como material estrutural em edifícios europeus, [36].

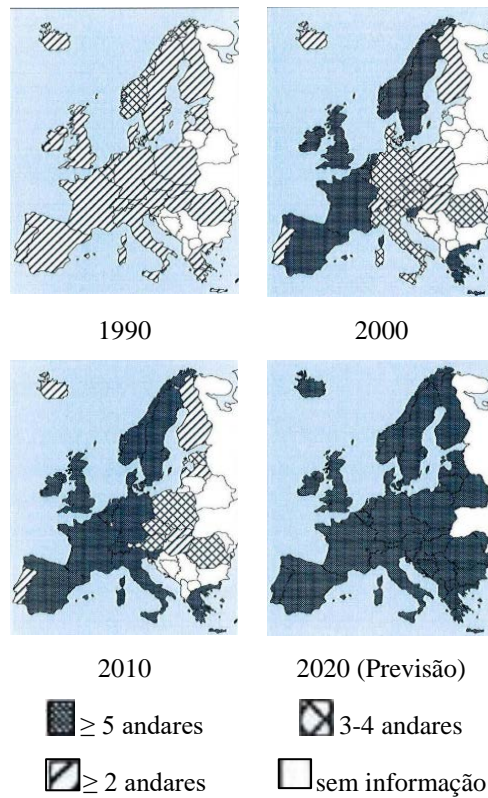


Figura 13 - Restrições do uso de estruturas de madeira para edifícios superiores, [36].

Os tratamentos dos produtos de madeira com retardante de chama pode melhorar consideravelmente a reação ao fogo. Os requisitos sobre a durabilidade dos tratamentos retardadores de fogo não são mencionadas na maioria dos códigos de construções nacionais e isso é ocasionado pelo desconhecimento do problema, [37]. A Figura 14, mostra um exemplo de exposição ao fogo em um edifício com produtos de madeira.

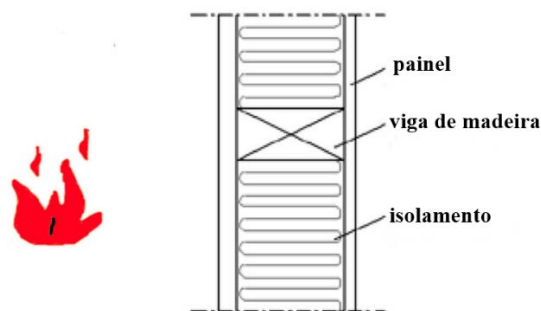


Figura 14 - Estrutura com painel de madeira exposto ao fogo, [37].

O sistema europeu de classificação das propriedades de reação aos produtos de construção civil foi introduzido por decisão da comissão de 2000, denominado como sistema Euroclasse é constituído por dois subsistemas, um para produtos de construção, com exclusão dos pavimentos, ou seja, paredes e tetos e outro subsistema semelhante para revestimentos. Ambos os subsistemas tem as classes A a F, sendo que as classes A1 e A2 são produtos não combustíveis e são apresentados na Tabela 3, [33], [38].

Tabela 3 - Visão geral das classes de reação ao fogo para produtos de construção, exceto pavimentos, [33].

Euro classe	Classe de fumaça	Gotículas em chamas	Produtos típicos
A1	-	-	Pedra, concreto
A1	s1,s2 ou s3	d0,d1 ou d2	Placas de gesso fina e lâ mineral
B	s1,s2 ou s3	d0,d1 ou d2	Placas de gesso grossa e Painéis de madeira tratadas com retardante de chamas
C	s1,s2 ou s3	d0,d1 ou d2	Revestimento em placas de gesso
D	s1,s2 ou s3	d0,d1 ou d2	Madeira e painéis a base de madeira
E	-	ou d2	Alguns polímeros sintéticos
F	-	-	Desempenho indeterminado

A durabilidade dos tratamentos retardantes de chamas quando expostos a condições húmidas está diretamente ligada à solubilidade da água dos produtos químicos utilizados. Há exceções como no caso de retardantes que reagem e formam substâncias mais complexas e insolúveis na estrutura da madeira. Os produtos ignífugos podem ser diferenciados por propriedades que limitam ou recomendam seu uso em aplicações específicas, [20]. A variação dessas propriedades é em grande parte devido à natureza dos produtos químicos usados nas formulações e complexidade e graus de reação químicas necessárias para formulá-las. As diferentes categorias usadas no Reino Unido (BWPDA, Associação Britânica de preservação da madeira e tratamento de água) e EUA (AWPA, associação americana de preservação da madeira) estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de retardantes de chamas utilizados em função das condições de aplicação, [17].

Aplicação pretendida	Tipos Reino Unido	Tipos Americanos
Uso interior com baixa HR	Tipo A - Baseado em sais inorgânicos simples. Exposição prolongada com migração de sal. Restrito para o uso com HR < 75%.	Tipo B - Se não haver restrições para um uso específico, a exigência é < 28% de conteúdo de humidade à RH de 78%. (Este tipo foi removido em 1996 por falta de uso)
Uso interior com alta HR	Tipo B - Tipo resistente à humidade baseado em sistemas semi-complexos, menos sensível a humidade relativa flutuante de alta vazão devido à menor solubilidade na água dos produtos químicos, pode ser usado em certas situações exteriores protegidas contra intempéries.	Tipo A - (Baixa temperatura) Se for especificado para uso com baixa higroscopicidade, é requerido <28% de conteúdo de humidade a 90% de RH e 27 [°C], (ASTM D 3201) Tipo A - (Alta temperatura) Para utilização em altas temperaturas como telhados e treliças, (ASTM D 5664)
Uso exterior	Tipo C - Resistente à lixiviação, baseado em resina polimérica, pode ser usada em situações internas e externas. A exposição total ao exterior pode levar à redução da eficácia, mas a uma taxa mais lenta quando comparado a outros tipos de tratamentos FR.	Utilizado ao ar livre, sujeito a chuvas, o material não deve mostrar aumento na classificação de risco de incêndio após a sujeição ao teste de chuva padrão, (ASTM D 2898-Method A or B).

Alguns procedimentos experimentais para a avaliação da durabilidade dos produtos de madeira com retardante de chamas foram desenvolvidos nos EUA desde a década de 1960 e estão disponíveis na ASTM D 2898. Estes métodos são baseados em ciclos de spray de água e secagem com ou sem exposição à radiação UV, como representado na Tabela 5




Tabela 5 - Testes de envelhecimento acelerado de produtos de madeira com retardantes de chamas usado no EUA, [20].

	ASTM D 2898		UBC 15-2- Método A	ICBO-AC 10
	Método A	Método B		
Num. Ciclos	12	42	7	252
Spray de água (h)	96	4 + 4	168	4
-L/min, m ² ,	0,3	12,2	0,3	12,2
-recirculação	Não	Pouco	Não	Pouco
Descanço , h	-	8	48	-
Secagem, h	72	4 + 4 + UV	120	4 + UV
Tempo total em semanas	12	6	14	12

O envelhecimento dos produtos derivados de madeira com retardantes de chama em ambientes de alto teor de humidade auxilia na migração dos produtos químicos ignífugos para o interior do painel e também pode causar a cristalização do sal na superfície. Outro caso é o risco de diminuição do desempenho de incêndio devido à perda de produtos químicos retardadores de fogo por lixiviação ou outro mecanismos, [37].

A norma europeia lançada recentemente EN16755:2017, [4], exige que as propriedades de reação ao fogo devem ser mantidas após o envelhecimento natural/acelerado dos painéis de madeira com aplicabilidade em ambientes externos, mas não se tem nenhuma exigência sobre a reação ao fogo dos painéis de madeira utilizados em ambientes internos, seja na classe INT 1 ou INT 2, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Requisitos para classe de desempenho de reação ao fogo dos produtos de madeira para aplicações internas e externas, [4], [37].

Classe DRF	Uso pretendido	Classe de fogo	Requisitos de desempenho para diferente usos finais	
			Prop. Higroscópicas	Reação ao fogo após o envelhecimento climático
	Ambientes seco	Classe relevante	-	-
	Ambientes húmidos	Classe relevante	-Teor de humidade limitado e mínima visibilidade de sal na superfície	-
	Ambientes externos	Classe relevante	-Teor de humidade limitado e mínima visibilidade de sal na superfície	Manter a reação ao fogo após o envelhecimento natural/artificial

Um estudo realizado recentemente, pretendeu avaliar a durabilidade das propriedades higroscópicas e do desempenho da reação ao fogo em aplicações externas (DRF EXT) utilizando envelhecimento natural e envelhecimento acelerado de acordo com o método Nordtest NT FIRE 053, [39], com dois diferentes métodos de envelhecimento. O método A com exposição a 12 ciclos de uma semana de chuva simulada e secagem, e o método B com exposição a 6 ciclos de uma semana com as mesmas condições do método A, porém com adição de radiação UV. A exposição natural foi realizada com painéis de madeira virados a sul, na vertical 90° e com a inclinação de 45°. Em ambos os testes os lados traseiros dos painéis estavam expostos ao ambiente. Os ensaios foram realizados na área de Estocolmo, na Suécia, como representa a Figura 15, [40].



Figura 15 - Envelhecimento natural dos painéis de madeira com retardantes de chama para ambientes externos, expostos a 90° e 45°, [40].

Os retardantes de chamas tradicionais são soluções aquosas de sais inorgânicos simples que podem migrar dentro da madeira quando exposto à humidade relativa no meio ambiente. A migração dos sais podem levar a perda ou mudança de desempenho nos painéis ignífugos. Este efeito pode aumentar com o aumento e variação da humidade relativa, [20]. Além disso, é evidente a partir dos dados de teste que a humidade tende a se elevar quando é acrescentado um aumento na quantidade de produtos químicos retardantes de chama. É importante que os produtores otimizem o conteúdo de produto ignífugo, não apenas por questões económicas mas para atingir o desempenho pretendido de reação ao fogo durante a vida útil e evitar comprometer a resistência à humidade, [40].

A reação ao fogo é reduzida após o envelhecimento acelerado e artificial para a maioria dos produtos retardantes. Apenas alguns produtos mantêm um alto desempenho ao fogo após exposições aceleradas e naturais. O melhor desempenho é encontrado para altos níveis de retenção e para produtos retardantes com revestimentos superficiais de proteção, como representado na Figura 16. Segundo os autores, o envelhecimento acelerado é aproximadamente equivalente a um máximo de 5 anos de exposição natural, [40].

O envelhecimento artificial utilizado foi o método A da NT FIRE 053 com exposição a 12 ciclos de uma semana de chuva simulada e secagem.

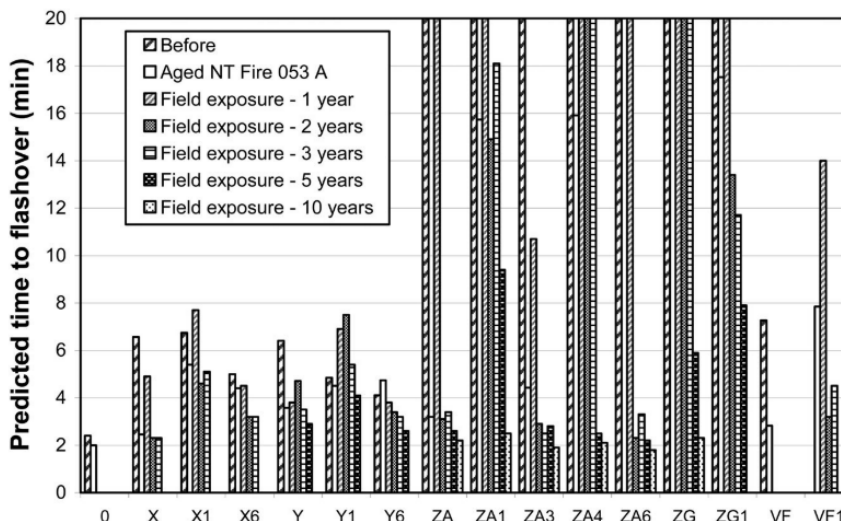


Figura 16 - Resultados do desempenho de reação ao fogo para diferentes produtos ignífugos antes e após o envelhecimento acelerado de acordo com NT FIRE 53, método A e após o intemperismo natural em um declive de 45° até 10 anos, [40].

As principais conclusões são que as propriedades de reação ao fogo da madeira com retardante de chama pode ser mantida após o envelhecimento artificial/natural se os níveis de retenção forem altos o suficiente. No entanto, existem produtos com retardantes que perdem as suas propriedades melhoradas de reação ao fogo durante a exposição climática, [40].

Necessita-se o desenvolvimento de mais estudos na avaliação da durabilidade de reação ao fogo. Para isso a ETAG 028:2012, [1], e posteriormente EN16755:2017, [4], confirma a necessidade de avaliar o desempenho de reação ao fogo após o envelhecimento climático, seja por meio de métodos artificiais ou naturais. A Tabela 7 representa como deve ser feito a análise da durabilidade de reação ao fogo para os painéis de derivados de madeira com retardantes de chama, a fim de saber se os produtos ignífugos perdem ou mantêm a classe de reação ao fogo.

Tabela 7 - Desempenho da durabilidade de reação ao fogo, [1].

Produtos de construção com exceção de pavimentos	
Fluxo de calor	50 kW/m ²
Taxa de liberação de calor	- Classe B: $HRR_{30s\ med.}$ 150 kW/m ² durante 600s após a ignição e THR_{600s} maior do que 20% comparado ao teste antes da exposição. - Classe C: $HRR_{30s\ med.}$ 220 kW/m ² durante 600s após a ignição e THR_{600s} maior do que < 20% comparado ao teste antes da exposição.

Capítulo 3: Caracterização dos painéis de madeira

3.1 Introdução

Para o estudo da avaliação da durabilidade dos painéis de madeira, faz-se necessário o entendimento dos fenômenos ligados à degradação da madeira sob a influência das condições climáticas, como variações na humidade e temperatura. As resinas utilizadas na produção dos painéis podem sofrer degradações dependendo da composição química, pois algumas resinas se degradam com as variações climáticas e outras podem possuir um comportamento melhorado principalmente frente à humidade.

Os painéis de madeira podem sofrer diferentes tipos de processos, no que diz respeito a parâmetros de prensa, temperatura, seleção de fibras/partículas, entre outros. O MDF se caracteriza por possuir fibras de madeira pequenas e bem compactadas, enquanto que o PB possui partículas de madeira maiores e o OSB possui partículas longas e orientadas em uma determinada direção.

3.2 Madeira maciça: características físicas e químicas

3.2.1 Estrutura macroscópica da madeira

A árvore cresce inicialmente no sentido vertical e com o passar do tempo forma-se camadas sucessivas que se vão sobrepondo ao redor das camadas mais antigas. Ao cortar transversalmente um tronco, pode-se observar as camadas de crescimento sendo possível avaliar a idade da árvore através dos anéis de crescimento, [41].

A Figura 17 representa a anatomia interna de um tronco de madeira. A casca protege a árvore contra agentes externos, dividindo-se em duas camadas: camada externa, que é composta por células mortas e camadas internas, formadas por tecidos vivos moles húmidos. O lenho é composto por albúrnio e cerne, e são as partes resistentes do tronco sendo que o albúrnio é a parte jovem, mais permeável, menos denso e mais suscetível ao ataque de fungos e bactérias. O cerne é a parte mais densa e mais resistente. A medula é a parte central que provem do crescimento vertical, onde ocorre a parte menos resistente e são responsáveis por se ligarem entre si através de diferentes camadas para transportar e armazenar a seiva, [41], [19].

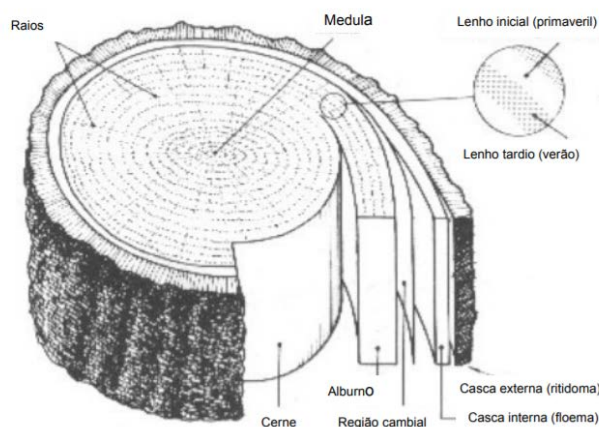


Figura 17 - Seção transversal de um tronco de madeira, [41].

3.2.2 Parede celular

A parede celular é constituída por diversas camadas diferenciando-se através de sua estrutura e composição química. Em termos de ultra estrutura, a parede celular é formada por diversas camadas (ver Figura 18). A lamela média (LM) encontra-se entre as células, promovendo sua união, enquanto que a parede primária é um camada fina constituída por celulose, hemicelulose, pectina e proteínas embutidas em lenhina. A camada secundária contém os elementos S1, S2 e S3.

A madeira possui a característica de anisotropia, isto é, suas propriedades físicas diferem ao longo dos diferentes eixos. Além disso, as paredes celulares da madeira podem conter lignina, e essa propriedade é importante para tornar as paredes impermeáveis à água e também pode ser associada ao agente que fornece rigidez e resistência à compressão, [6].

Por outro lado, os extrativos são compostos por um conglomerante de outras substâncias que incluem matéria corante, fenólicos, terebentina, ácidos graxos, resina e intermediários metabólicos simples, e são responsáveis por definir a coloração da madeira e dão a esta 60-90° em S3, casando um bloqueio mecânico e levando a alta rigidez da célula geral. Devido a sua espessura que corresponde cerca de 90% da parede celular secundária e baixo valor do ângulo de microfília, a camada S2 é responsável pela alta resistência à tração. Em contrapartida, o aumento do ângulo de microfília diminui a resistência à tração e aumenta a sua durabilidade. A camada S2 corresponde a aproximadamente 85% da espessura da parede celular sendo a camada com maior influência nas propriedades da célula, [41], [42], [43].

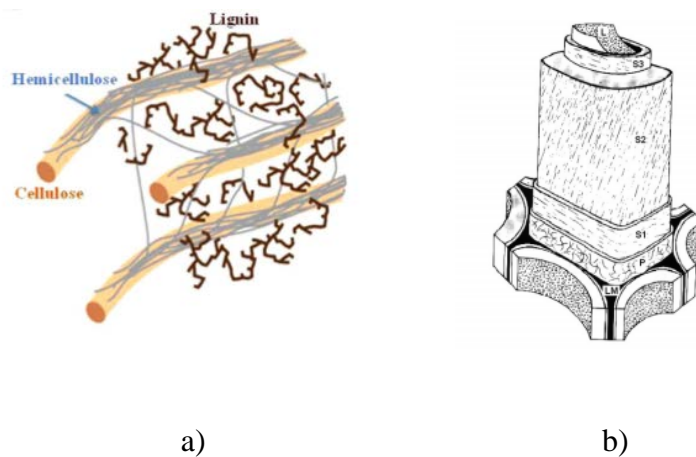


Figura 18 - Estruturas importantes na madeira: a) células importantes na estrutura b) representação esquemática de uma célula vegetal, [43], [6].

3.3 Painéis derivados de madeira

O ciclo de carbono dos produtos de construção da madeira está representado na Figura 19. As florestas absorvem CO_2 , criando uma esponja de carbono e produzem O_2 , em seguida a madeira é cortada e convertida em madeira serrada que são utilizadas para biomassa, produção de painéis e fabrico de pasta de papel. A madeira é então utilizada na construção tornando-se uma outra esponja de carbono e podem continuar a absorver carbono após a sua utilização na construção através da reciclagem. E por fim, a energia é recuperada a partir dos resíduos dos produtos de madeira, substituindo os combustíveis fósseis. A produção, o transporte e a compostagem produzem CO_2 , [44].

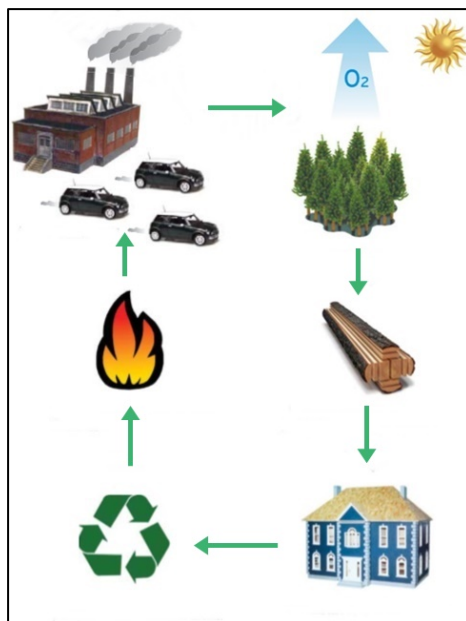


Figura 19 - Ciclo de carbono dos produtos de construção em madeira, [44].

Painéis à base de madeira é um termo utilizado para referir uma gama de diferentes tipos de placas que usam como material em comum a fibra, partícula ou lascas de madeira com excelentes propriedades de engenharia. O E49, [45], é um órgão que se preocupa com todos os aspectos da indústria e setor à base de madeira e mede o desempenho dos painéis de madeira, adesivos, revestimentos, coberturas e define que um produto é classificado painel derivado de madeira quando a sua espessura é consideravelmente menor do que sua largura ou comprimento, [11]. Estes produtos são classificados de acordo com a sua configuração física e são divididos em painéis laminados, painéis de fibras e painéis de partículas aglomeradas. Ver Figura 20.

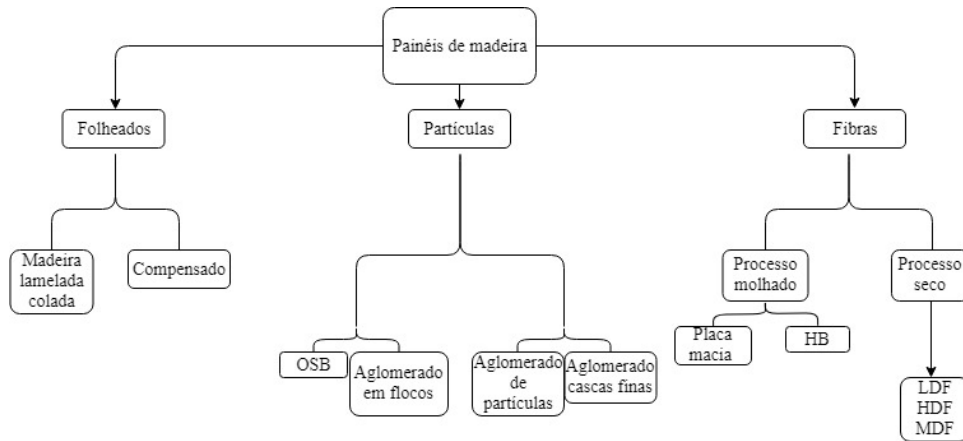


Figura 20 - Fluxograma representativo dos diferentes tipos de painéis de madeira, [11].

Os produtos derivados da madeira caracterizam-se por serem produtos que surgem da desintegração da madeira e uma posterior agregação a partir da aplicação de pressão, temperatura, e outras variantes de processo, além de adições de resinas sintéticas, aglutinantes minerais e aditivos, [46]. A Figura 21 expõe diferentes tipos de painéis.

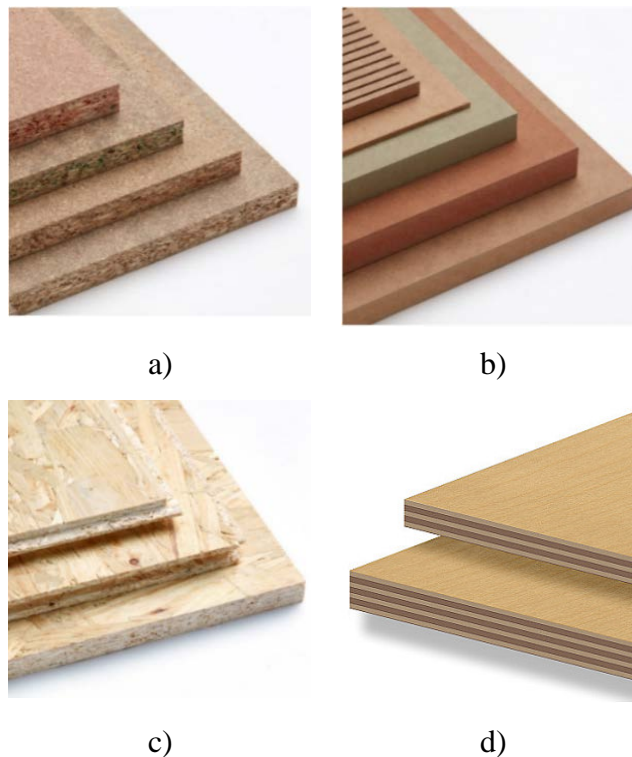


Figura 21 - Exemplo de produtos derivados de madeira: a) aglomerados de partículas (PB); b) fibras de média densidade (MDF); c) aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB), d) painel contraplacado (Plywood), [8].

3.3.1 Aglomerado de Partículas (PB)

A indústria europeia de painéis de partículas (*Particle Board*) vem experimentando um crescimento muito grande na produção, desde 2013. A federação europeia dos fabricantes de aglomerados, MDF e OSB é composta por 25 países membros e representa todos os fabricantes de produção de painéis derivados de madeira na europa, foram responsáveis pela produção de 30,25 milhões de [m³] de painéis de aglomerados. Em 2016, a produção de aglomerado foi cerca de 0,8% a mais do que em relação a 2015 e este número continua a crescer. A Figura 22 mostra a produção e a capacidade das indústrias compostas pela federação europeia dos fabricantes de aglomerados (EPF) nos anos de 2011 à 2016, [47].

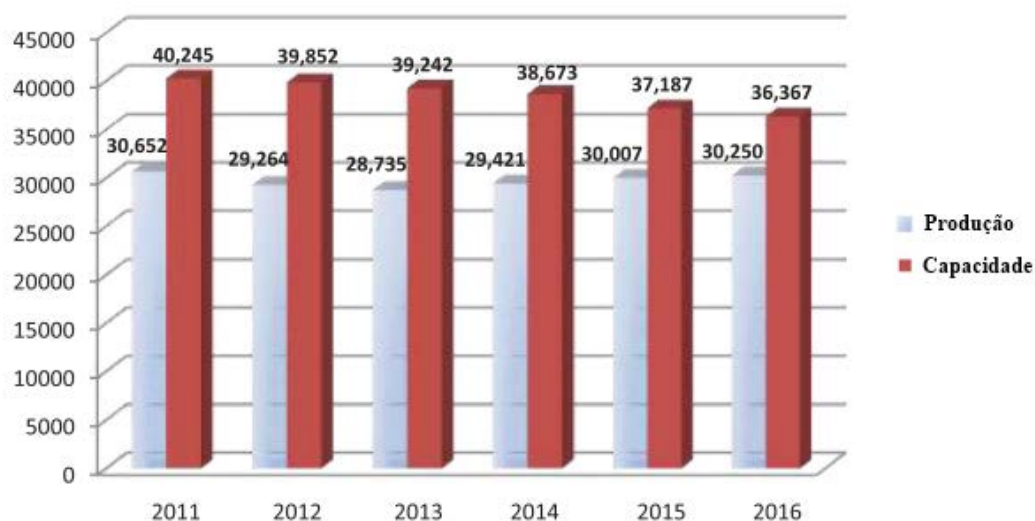


Figura 22 - Produção e capacidade das indústrias europeias de painéis de aglomerados, [47].

Diversos tipos de painéis de aglomerados são produzidos na europa, seja para uso estrutural e não estrutural, com diversas aplicabilidades, sendo utilizados para ambientes secos, húmidos, com retardante de chamas e utilizados para cofragem. A Figura 23 representa alguns tipos de painéis de aglomerados de partículas usuais.

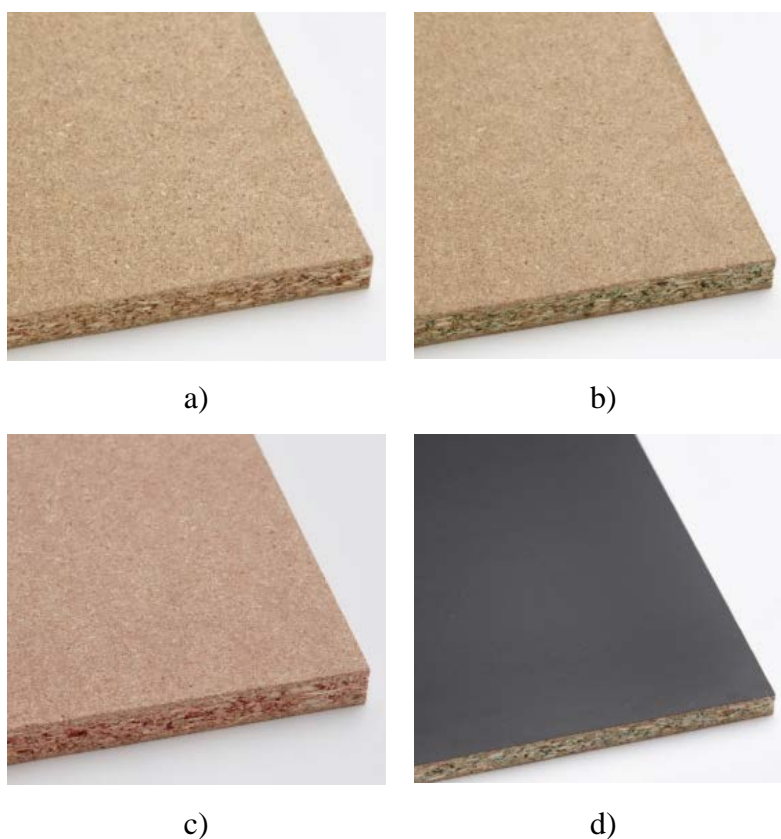


Figura 23 - Tipos de painéis de PB: a) ambientes secos; b) ambientes húmidos; c) retardante de chamas e d) cofragens, [8].

3.3.1.1 Processo produtivo do Aglomerado de partículas (PB)

Os painéis de aglomerados de partículas são produzidos em múltiplas camadas de diferentes tamanhos de partículas, e na camada externa do painel são usadas partículas com menores dimensões em relação às partículas do interior da placa, possibilitando um revestimento do painel de boa qualidade.

Os toros de madeira maciça são cortados em pequenas partículas e transformados em cavacos e que por meio de moinhos e secadores acabam por ser enviadas ao classificador em forma de peneiras vibratórias, giratórias e classificatórias a ar, cujo propósito é separar o material grosso (camada interna) e o material mais fino (camada externa). Com isso, as partículas posteriormente passam por um processo de secagem com o objetivo de retirar a humidade que ao entrar costuma ser superior a 50 % e na saída, cerca de 2 e 8 %. As partículas são armazenadas em um silo para a adição da resina ligante e emulsão para

melhorar a estabilidade dimensional do painel, [48]. A Figura 24 mostra o processo produtivo dos painéis de aglomerados.

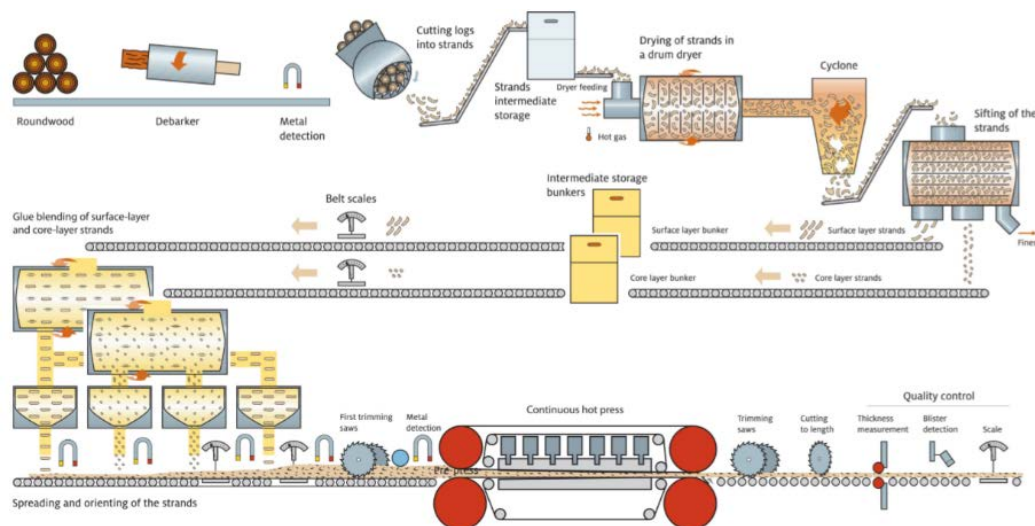


Figura 24 - Processo produtivo dos painéis de aglomerados, [8].

3.3.2 Fibras de média densidade (MDF)

Os painéis de MDF (*Medium Density Fiberboard*) foram desenvolvidos primeiramente nos EUA. Produzidos basicamente por um processo húmido que produz muita água poluída e que requer tratamento antes do descarte. Dessa forma, processos semi-secos foram desenvolvidos na década de 1950 ocasionando produção de painéis ecologicamente limpos. Na Europa a primeira instalação foi construída na antiga República Democrática Alemã em 1973, e partir de então a produção dos painéis de MDF tem crescido exponencialmente até os dias de hoje, [11].

A produção de painéis de MDF representa cerca de 70 % de todo o mercado de painéis de fibras na Europa. Dados recentes mostram que a capacidade do MDF europeu nos países membros da Federação Europeia do Setor dos Painéis Derivados da Madeira (EPF) atingiu uma capacidade de produção de 14,7 milhões de [m³] em 2016, e foram produzidos para o mesmo ano, cerca de 12 milhões de [m³]. Existem diversos tipos de MDF produzidos na Europa para as mais diversas aplicabilidade: ambientes secos, ambientes húmidos, MDF com

retardante de chamas, MDF flexível utilizados em curvaturas, entre outros. A Figura 25 mostra alguns tipos de painéis de MDF usualmente fabricados, [47].

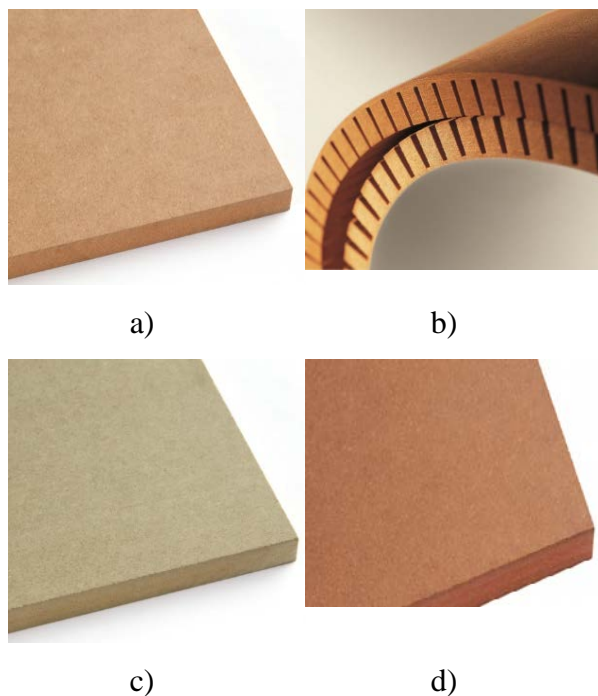


Figura 25 - Tipos mais usuais de MDF: a) ambientes secos; b) flexíveis; c) ambientes húmidos e d) com retardantes de chama, [8].

A utilização dos painéis de MDF apresenta vantagens como boa trabalhabilidade, a alta relação entre a massa específica e a resistência mecânica, homogeneidade das fibras no interior do painel e ausência de defeitos, [49].

O MDF é constituído basicamente por um composto de fibras finas lignocelulósicas que são ligadas a uma resina sintética denominada ureia-formaldeído (UF), melamina-ureia-formaldeído (MUF) que são indicados para manter a uniformidade dimensional da superfície e manter a adesão das fibras e resinas pMDI com alta resistência à humidade, [17]. O processo existe através de calor e pressão e são fabricados numa vasta faixa de espessuras, de 2 a 100 [mm] com densidades de 500 a 900 [kg/m³].

3.3.2.1 Processo produtivo dos painéis de MDF

O processo produtivo dos painéis de MDF consiste em várias etapas, a primeira delas é a obtenção de pequenos pedaços de madeira que posteriormente é fragmentado em partículas menores que são denominados cavacos. Os cavacos que tem tamanhos uniforme são colocados num tanque que fica em repouso 24 horas submersos em água, posteriormente secos e com o aumento da temperatura no tanque. A lignina que está presente nas camadas intermoleculares é amolecida, resultando em fibras mais resistentes e flexíveis.

Os cavacos passam por uma centrifugadora para serem ligados a resinas, catalisadores e/ou aditivos que acabam por possui elevada humidade, acarretando uma série de problemas. Por esse motivo o cavaco passa por um processo de secagem dentro de um silo com a injeção de ar seco e quente. Desta forma, o conjunto de cavacos já secos são entrelaçados e unidos formando pequenos blocos de aglomerado que serão encaminhados para a pré-prensagem, o que evita a separação e deslizamento das fibras da manta durante a prensagem a quente. Esta prensagem a quente consiste em prensar os painéis através de calor e pressão ocasionando em um painel com diferenças significativas de densidades no interior e exterior do painel, tornando-se um painel mais denso no exterior do painel, [50], conforme Figura 26.

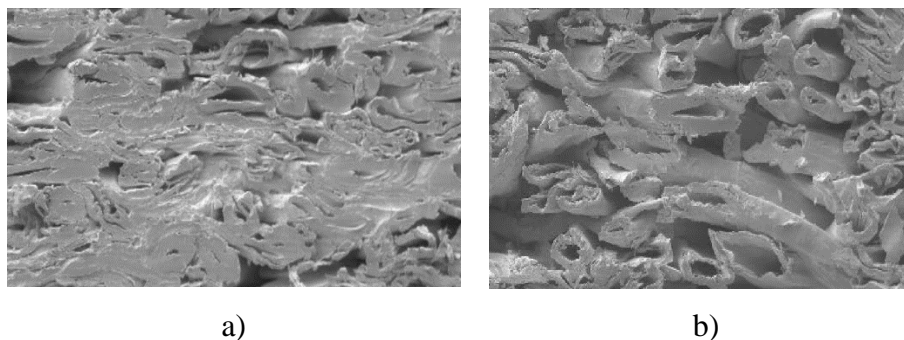


Figura 26 - Representação da diferença de densidade no MDF: a) camada externa; b) camada interna, [50].

Por fim as chapas são arrefecidas normalmente à temperatura ambiente, cortadas e armazenadas, [51]. A Figura 27 apresentada a sequência do processo de fabricação do MDF, apresentado pela Sonae Arauco, [8].

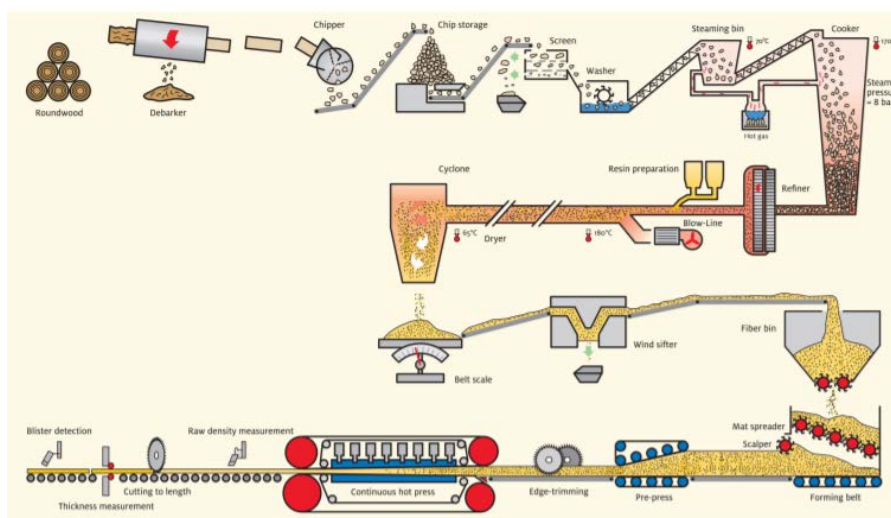


Figura 27 - Processo de produção industrial do MDF, [8].

3.3.3 Aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB)

Os painéis denominados OSB (*Oriented Strand Board*) tiveram sua origem nos EUA a partir da década de 70. Conforme a procura foi crescendo, a partir dos anos de 1996 e 1997 surgiram indústrias de painéis OSB na Europa, Ásia e China. As principais vantagens da utilização deste painel em relação à madeira sólida são muitas, principalmente o facto de ter um maior rendimento em relação ao volume dos toros, além de possuir uma densidade média que confere uma rigidez satisfatória ao painel em termos de aplicação estrutural, [52].

Cálculos recentes revelam que a produção de OSB, nos países membros da EPF aumentaram 6,9 % no ano de 2016 e ultrapassaram 5,4 milhões de metros cúbicos. Com o mercado em rápido crescimento, a produção europeia de painéis deverá aumentar ainda mais em 2017, [47].

O OSB é classificado como um painel de uso estrutural, produzido por fibras em formato retangular e incorporado com resinas e parafinas orientados perpendicularmente à superfície e consolidada por meio de prensagem a quente.

Os painéis de fibras longas e orientadas passam basicamente por cinco etapas no processo produtivo. Inicialmente toda a madeira bruta é descascada e cortada ao longo das suas fibras passando posteriormente por um processo de secagem e mistura de uma

composição de resinas à prova de água e emulsão de parafina. A orientação das fibras são feitas em formação de camadas cruzadas conferindo melhor estabilidade dimensional e propriedades mecânicas e podem estar dispostos perpendicular à camada externa ou de forma aleatória, [53], como mostra a Figura 28.

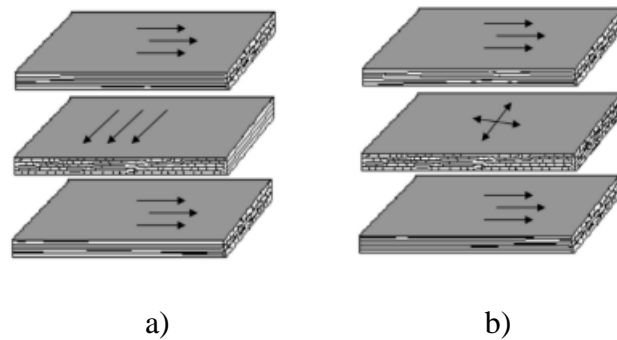


Figura 28 - Disposição das camadas do painel OSB: a) Orientação perpendicular à camada interna; b) orientação aleatória da camada interna, [53].

Por fim, o colchão entra na prensa contínua com elevadas temperaturas e pressão e são cortadas de acordo com a exigência comercial, [54], representado na Figura 29.

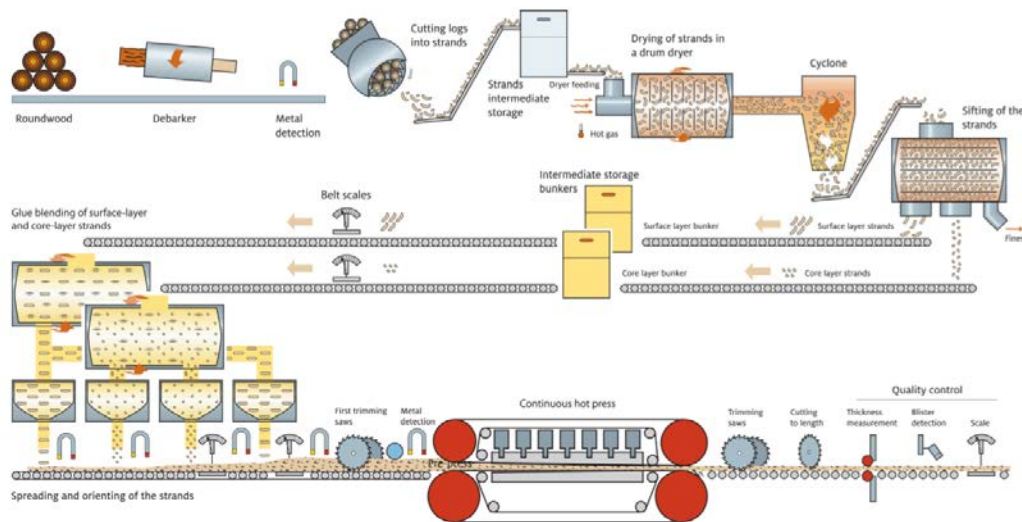


Figura 29 - Processo de fabricação dos painel OSB, [8].

Os painéis de aglomerados de partículas longas e orientadas (OSB) possui excelentes propriedades mecânicas sendo ideal para a construção civil, podendo ser utilizado em estruturas, paredes, pisos, componentes de vigas, etc. Além disso, possui uma excelente vantagem em relação ao uso da madeira maciça uma vez que os painéis possuem um alto

grau de aproveitamento dos toros evitando-se o desperdício, sendo que sua principal limitação está na baixa estabilidade dimensional. O OSB quando em contato com a humidade apresenta maior inchamento em espessura e expande linearmente. Com isso, diversas pesquisas foram desenvolvidas para melhorar esse fenómeno, dentre as quais pode-se citar: a modificação química, preenchimento e o tratamento térmico, [55].

Segundo a EN 300 (2002) as tiras de madeira utilizada na produção dos painéis OSB possuem um comprimento maior que 50 [mm] e espessura menor que 2 [mm], unidas por adesivos. Além disso, os painéis de OSB são classificados em quatro tipos, de acordo com a sua aplicação. O OSB1 é utilizado para uso geral em interiores, incluindo mobiliário, e em ambientes secos; OSB2 são painéis estruturais para uso em ambientes secos; OSB3 painéis estruturais para uso em condições de ambiente húmido e por fim, OSB4 utilizado em estruturas de elevada capacidade de carga com especificação de ambiente húmido, [46].

As condições de serviço são definidas no Eurocódigo 5 de acordo com as classes de risco, classe 1 a classe 3. A classe de serviço 1 corresponde a condições ambientais secas, definidas por uma temperatura ambiente de 20 [°c] e uma humidade relativa que só pode exceder os 65% em algumas semanas ao ano. Na classe de serviço 2 a temperatura do ambiente é de 20 [°c] e a humidade relativa que só pode exceder os 85% em algumas semanas ao ano. No caso da classe 3, o ambiente é classificado como muito húmido, podendo possuir uma humidade relativa superior a 85%, [56].

3.1 A influência do tipo de resina e da densidade das fibras nas propriedades físico-mecânicas

As propriedades físico-mecânicas dos painéis está diretamente relacionada com a densidade da matéria-prima, isto é, o tipo de madeira com que o painel é produzido. Dessa forma, para fabricar uma placa de resistência adequada, as partículas devem ser comprimidas pelo menos 5% acima de sua densidade natural, que a prática corresponde a aproximadamente 50% de sua densidade natural. Este grau de compressão é necessário para se obter um bom contato entre os cavacos e conseqüentemente proporcionando uma melhor resistência mecânica, [11]. Além disso, o tipo da resina e a sua quantidade apresenta relação direta com as propriedades mecânicas e de estabilidade dimensional dos painéis, [49].

O grau de compactação é uma relação importante para estimar a resistência do painel e é definida como a relação entre a massa específica do painel e a massa específica da

madeira. Essa relação pode ser modificada utilizando espécies de madeira com menor massa específica para a mesma massa específica do painel. Além disso, painéis com uma maior massa específica podem proporcionar aos painéis maior resistência mecânica, mas geralmente apresentam menor estabilidade dimensional, relacionado com a libertações de tensões de compressão, [57].

Em 2007, Iwakiri *et al.* analisaram a influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas dos painéis de aglomerado MOE e MOR em flexão estática e ligação interna utilizando painéis com densidade de 0,60, 0,70, 0,80 e 0,90 [g/cm³], partículas de *Pinus* spp e resina ureia-formaldeído como aglutinante. Com base nos resultados obtidos, os painéis de aglomerados com maiores massas específicas apresentaram valores superiores de MOE e MOR em flexão estática e ligação interna, elevando de 6,472 [MPa] com densidade de 0,61 [g/cm³] para 15,592 [MPa] com densidade de 0,85 [g/cm³], [57].

Em 2010, Eleotério *et al.* avaliaram a influência dos teores de resinas e massa específicas nas propriedades mecânicas dos painéis de MDF. Utilizou fibras de *Pinus* spp com teores de resinas de (6, 8, 12 e 14 %) e massas específicas (600 a 800) [kg/m³] e concluiu que o MOR e MOE e adesão interna (IB) apresentaram comportamento diretamente proporcional ao teor de resina e à massa específica. O inchamento em espessura e absorção de água apresentam um comportamento inversamente proporcional a essas variáveis, [49].

3.2 Resinas sintéticas e retardante de chamas utilizadas na produção dos painéis

O uso de adesivos nos materiais já é antigo. Os primeiros papiros utilizava uma cola constituída a base de pasta de farinha e na primeira guerra mundial os adesivos eram predominantes a base de proteínas animais. Com o passar dos anos tornou-se necessário criar resinas sintéticas com propriedades de resistência à infiltração de água, resistência a fungos e bactérias entre outros, [58].

As resinas sintéticas são utilizadas na produção dos produtos derivados de madeira com o objetivo de aderir as partículas de madeira e de outros materiais lignocelulósicos. Grande parte das resinas sintéticas são feitas à base de formaldeído, nomeadamente ureia-formaldeído (UF) e melamina-ureia-formaldeído (MUF) e fenol-formaldeído (PF), Diisocianato de difenilmetano (MDI) e outros, [59].

3.2.1 Resinas à base de Ureia-formaldeído (UF)

A resina de ureia-formaldeído foi sintetizada pela primeira vez em 1844 por Bernhard Tollens e foi desenvolvida para a colagem de madeira pela IG Company (Alemanha) em 1929. É amplamente utilizada em várias indústrias de fabricação de painéis à base de madeira, correspondendo a 90% dos adesivos utilizados em painéis, [60]. Este tipo de resina é mais utilizada na produção de painéis de aglomerados para uso interno, devido ao seu baixo custo e por não apresentar uma boa resistência a ambientes húmidos, onde algumas falhas na linha de aderência podem ser observadas com o envelhecimento acelerado, [17], [11]. As resinas ureia-formaldeído curadas podem ser hidrolisáveis sob a ação de água ou humidade, ocasionando quebras das suas ligações devido à presença de moléculas de água e uma perda nas características físico-mecânicas do material, [58]. A Figura 30 representa a molécula de ureia-formaldeído.

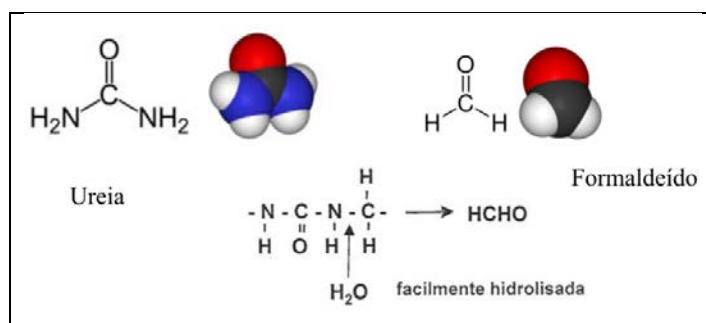


Figura 30 - Representação da molécula de ureia e formaldeído, [58].

Como produto dessa reação química, tem-se a emissão de formaldeído que se mostra altamente tóxico para saúde humana. Devido a este problema, muitas pesquisas se desenvolveram para buscar soluções na redução de emissões de formaldeído. Um estudo buscou avaliar a influência na adição de álcool polivinílico (PVA) e anilina na resina e concluiu-se que esses compostos modificaram a resina UF. Os resultados mostraram que o teor de formaldeído livre diminuiu e a resistência ao corte e a resistência à absorção de água aumentou significativamente. Outros estudos descreveram que o uso de carbonato de cálcio (CaCO_3) preenchido com nano partículas de ureia-formaldeído reduziram o formaldeído

livre, embora não conseguisse melhorar a resistência à água das resinas ureia-formaldeído, [60].

3.2.2 Resinas à base de melamina-ureia-formaldeído (MUF)

As resinas de melamina-ureia-formaldeído resultam da combinação das resinas ureia-formaldeído com melamina. A adição da melamina confere-lhes maior resistência à humidade. A adição de melamina fornece grupos aminados sem introduzir grupos hidrolisáveis na rede, como mostra a Figura 31. Devido ao seu custo elevado, é comum adicionar misturas na fabricação de painéis combinando UF/MUF, gerando um produto um pouco mais resistente à humidade, [58], [47].

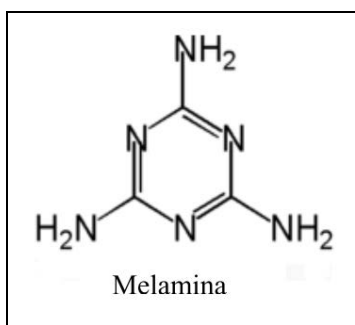


Figura 31 - Molécula de Melamina, [58].

3.2.3 Adesivos Poliuretanos (MDI-pMDI)

Os principais componentes dos adesivos poliuretanos são o álcool e isocianatos. O isocianato é um termo geral para uma variedade de ésteres, que se baseia principalmente na síntese de fosgênio em indústria tradicionais de síntese. Como o adesivo de isocianato possui isocianato (-NCO) com alta reatividade, pode ser ligado com hidroxila (-OH) em material de celulose macro celular e também pode reagir com água. Comparando com as tradicionais resinas de ureia-formaldeído à base de água e resinas de fenol-formaldeído, o adesivo de isocianato possui alta resistência de colagem, tempo de prensa curto, resistência à água e

excelente capacidade de resistência a fatores ambientais, e o mais importante, não libera formaldeído, [60], [17]. Em suma, este adesivo produz fortes ligações químicas com boa durabilidade que reagem com a água existente na superfície da madeira impedindo a degradação das células mecânicas da madeira através da humidade, [58].

As moléculas de pMDI espalha facilmente ao longo do lúmen das células e microfissuras devido ao seu baixo peso molecular e alta capacidade de molhabilidade. Sendo assim, foi proposto que a impregnação do adesivo funciona como um mecanismo de ligação que “repara” as células mecanicamente danificadas da madeira, [54].

Em 2001, Stockel estudou o comportamento micromecânico entre as resinas UF e pMDI e concluiu que as moléculas de pMDI quando difundidos, não fragmenta mecanicamente a estrutura como a UF, tornando a cadeia de partículas de madeira mais flexível e menos propensa a concentração de tensão devido a aplicação de forças externas ou a mudanças de humidade. Além disso, a UF quando em contato com o substrato da madeira leva à fragilização enquanto que o pMDI deixa a parede da célula mecanicamente inalterada e possivelmente levando a um efeito de amolecimento, [54].

3.2.4 Retardantes de chama

Os produtos retardantes de chamas tem a principal característica de reduzir a inflamabilidade da madeira e seus produtos, criando uma barreira à propagação da chama ou gerando gases não combustíveis. Os químicos impregnados nos painéis aceleram a formação de uma camada carbonizada, retardam o fogo através da fusão, evaporação ou decomposição térmica, [58]. Os retardadores de combustão mais comuns são os sais inorgânicos, que possibilitam alcançar um desempenho favorável frente ao fogo.

Os produtos químicos retardadores de chama normalmente contém fósforo e nitrogênio. Ácido bórico e bórax são amplamente utilizados nos produtos de madeira, o bórax elimina a propagação de chamas enquanto o ácido bórico aumenta a carbonização e é por isso que geralmente são misturados quando usadas. O polifosfato de amônio cria um efeito de camada de carbono na combustão bloqueando o acesso de oxigênio e calor, o que inibe a combustão e reduz a quantidade de fumo. Na madeira e derivados de madeira, os

componentes de boro são preferidos devido às suas características de resistência térmica, [61].

Os painéis de aglomerados de partículas (PB) possuem o produto retardante de chamas na forma sólida, normalmente granulados com tamanho de partículas entre 200 e 600 micrómetro, [47]. Os principais sais utilizados são: fosfato de amônio, sulfato de amônio, ácido bórico, cloreto de zinco e borato de sódio, [62]. Estes retardantes de chamas são misturados no cavaco de madeira no estágio de mistura.

Para a produção de painéis de MDF-FR (MDF com retardante de chama) são utilizados normalmente produtos ignífugos em soluções aquosas (40-60% de conteúdo de sólidos), tais como fosfatos de monoamônio e diamônio, ácido bórico e bórax. Na Europa, o MDF-FR são produzidos utilizando exclusivamente adesivos MUF (15-18% de teor de melamina), [29], [47].

3.3 Comportamento dos materiais poliméricos na reação ao fogo

A madeira é um material polimérico natural, com a sua estrutura química ser constituída basicamente de carbono e hidrogênio e por isso são altamente combustíveis. Quando exposto ao calor excessivo e ao fogo a combustão da matriz polimérica ocorre, sendo composta por dois fatores: agentes redutores e agente oxidante, sendo que o comburente é geralmente o oxigênio do ar, [63]. O ciclo de vida da combustão depende da quantidade de calor libertado durante a combustão, quando a quantidade de calor liberado atinge um certo nível, mais combustíveis são produzidos. O ciclo é representado na Figura 32.

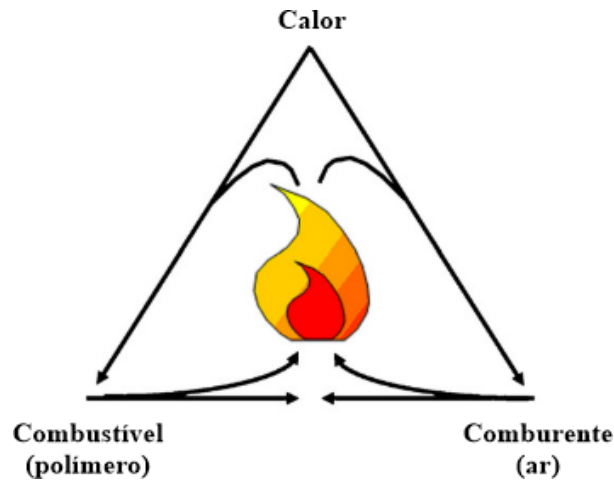


Figura 32 - Ciclo de vida da combustão, [63].

O aumento da temperatura incidido no material através de uma fonte de calor faz com que ocorram cisões de ligação da matriz polimérica. Com isso, a fração volátil dos fragmentos poliméricos difundem-se no ar e criam uma mistura gasosa combustível que inflama quando atinge a autoignição, libertando calor, [63].

3.3.1 Propriedades de reação ao fogo

Algumas características do comportamento ao fogo são importantes para o estudo da reação ao fogo dos materiais, nomeadamente: tempo de ignição (TI), taxa de libertação de calor (HRR), perda de massa, tempo de extinção da chama, índice de oxigénio limitante (LOI), poder calorífico, densidade e toxicidade do fumo e propagação da chama na superfície. As propriedades mais relevantes são descritas nas secções seguintes, [63].

3.3.1.1 Tempo de ignição (TI)

A ignição é uma importante propriedade de reação ao fogo pois possibilita determinar o início da combustão dos materiais. As resinas orgânicas normalmente usadas em compósitos podem inflamar num curto período de tempo após serem expostas ao fogo. Normalmente, a ignição ocorre quando a superfície de uma amostra exposta ao fogo é

aquecida até a temperatura de decomposição endotérmica relacionada com a temperatura de ignição.

O tempo de ignição geralmente são determinados experimentalmente devido à dificuldade em modelar os mecanismos de ignição dos diferentes constituintes dos materiais, e devido às complexas reações de decomposição das matrizes de resinas e fibras combustíveis, além de se degradarem quimicamente, carbonizarem e liberar gases voláteis, fumos, originando fendas e delaminação.

No entanto muitos modelos foram propostos para entender a ignição de certos materiais poliméricos. Lyon *et al.* relatam que a ignição ocorre quando houver energia térmica suficiente numa superfície capaz de iniciar a decomposição térmica, passando de um combustível sólido para gasoso, através do calor de gaseificação por unidade de massa h_g , temperatura ambiente T_0 e a capacidade calorífica do material na temperatura ambiente c_0 , de acordo com a equação (1), [64].

$$T_{ign} = \sqrt{\left[\frac{T_0 h_g}{c_0} \right]} \quad (1)$$

3.3.1.2 Taxa de libertação de calor (HRR)

A taxa de libertação de calor é a propriedades de reação ao fogo mais importante porque o calor liberado por um material em combustão pode fornecer a energia térmica adicional necessária para o crescimento e a propagação de um incêndio. A taxa de libertação de calor é a energia térmica produzida por unidade de área da superfície, quando os produtos de decomposição inflamáveis se inflamam e entram em combustão. O valor de pico da taxa de libertação de calor (PHRR) ocorre em um período de tempo muito curto de tempo e muitas vezes logo após a ignição, sendo um bom indicativo de inflamabilidade máxima de um material.

Diferentes tipos de comportamento típico de queima dão origem a curvas características da HRR versus tempo, alguns ilustrados na Figura 33. Em (a) observa-se na amostra um aumento inicial na formação de HRR até que a camada carbonizada seja formada

e à medida que a camada carbonizada se torna espessa, resulta numa diminuição da HRR. Em (b) representa um material não carbonizado de espessura intermédia e o pico de HRR (PHRR) aumenta em comparação com amostras não carbonizadas de espessura elevada, uma vez que sua origem está entre o comportamento não carbonizado e o de materiais de baixa capacitância térmica. Em (c) observa-se o comportamento de um material com carbonização, como é a madeira e seus derivados, apresentando um pico de HRR antes da carbonização e um segundo pico de HRR à medida que a temperatura vai aumentando ao longo da espessura da amostra libertando mais compostos orgânicos voláteis.

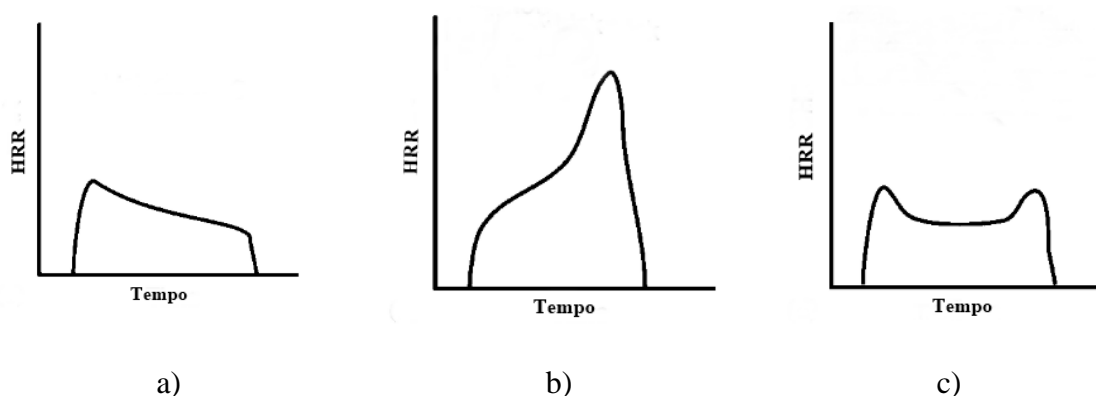


Figura 33 - Curvas de HRR típicas para diferentes comportamentos, [65].

3.3.1.3 Perda de massa

A perda de massa é outra característica importante no estudo de reação ao fogo e fornece uma medida quantitativa da quantidade de materiais que se decompõe ao longo da exposição ao fogo ou à ação térmica. Desta forma, a taxa de decomposição dos compostos orgânicos de um material pode ser determinada ao longo de um incêndio, [64].

A Figura 34 representa curvas características para painéis de madeira de MDF com diferentes tipo e proporções de resinas ignífugas. Inicialmente, o painel não apresenta perda de massa até por volta de 200 [°c]. Em seguida, a amostra aumenta significativamente a perda de massa com o aumento do tempo devido a decomposição térmica da matriz polimérica. Por volta dos 600 [°c] ocorre uma mudança na taxa de perda de massa pois boa parte do material degradou-se e atinge um valor constante devido a degradação da matriz polimérica [35].

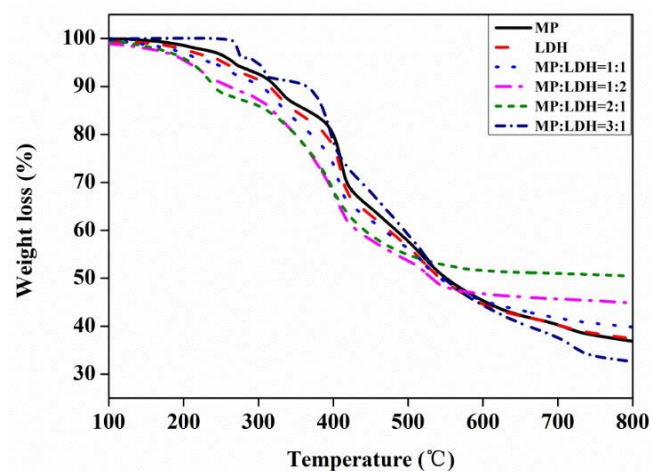


Figura 34 - Taxa de perda de massa nos painéis de MDF, [35].

3.3.1.4 Produção de fumo e Toxicidade da fumaça

Uma das principais preocupações de segurança em compósitos poliméricos é a produção de fumo denso durante um incêndio causada pela combustão, por pequenos fragmentos de fibras e partículas de carbono ultrafinas (cinzas e fuligem). A exposição a curto prazo de pessoas exposta à fumaça não apresenta riscos sérios para a saúde, mas a densificação da fumaça faz com que reduza a visibilidade, causa desorientação e dificulta o combate ao fogo. Por esta razão de segurança, muitos materiais compostos foram caracterizados.

Embora no âmbito da caracterização da reação ao fogo o parâmetro mais significativo seja a taxa de libertação de calor, geralmente são os gases tóxicos libertados durante a combustão que representam o maior perigo à saúde. Desta forma, muitas análises podem ser feitas a fim de determinar o composto nocivo ao ser humano, por exemplo, sabe-se que laminados de poliéster libertam CO, CO₂ e compostos orgânicos voláteis. Os laminados fenólicos produzem CO, CO₂, tolueno, metano, acetona e compostos aromáticos voláteis, [64].

Capítulo 4: Avaliação da Durabilidade das propriedades mecânicas

4.1 Introdução

Neste capítulo será abordado de forma detalhada como foi realizado a preparação das amostras para o envelhecimento artificial com ciclos de temperatura e humidade durante dez dias de condicionamento utilizado para a avaliação da durabilidade das propriedades mecânicas dos painéis derivados de madeira, com o objetivo de comparar a perda das propriedades antes e após o envelhecimento climático e avaliar a redução dessas propriedades para os painéis sem resinas ignífugas e com as resinas ignífugas.

Os materiais avaliados no estudo são o MDF Standart sem retardante de chamas e o MDF ignífugo utilizados para ambientes secos, PB do tipo P2 sem retardante de chamas e com retardante de chamas, utilizados em ambientes secos e por fim, os painéis de OSB4 sem retardante de chamas para ambientes húmidos.

Inicialmente as amostras foram cortadas em placas quadradas e devidamente preparadas para o envelhecimento acelerado. Após o envelhecimento, as amostras dos painéis foram cortadas em provetes seguindo as recomendações da EN 310:1993, [2], em seguida os provetes foram submetidos à câmara climática até que atingissem o equilíbrio higroscópico e posteriormente serem submetidos aos testes de caracterização mecânica, como mostra a Figura 35. Para o estudo da caracterização mecânica, é utilizado o teste de flexão em três pontos com a determinação do módulo de elasticidade (MOE), resistência à flexão (MOR) e força máxima na flexão.



Figura 35 - Representação da sequência utilizada para a caracterização mecânica.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Envelhecimento artificial

O envelhecimento artificial utilizado neste estudo foi realizado segundo a ETAG 028:2012, [1]. De acordo com a ETAG existem quatro tipos de envelhecimentos artificiais para avaliar a durabilidade dos produtos retardantes de chamas e são classificados de acordo com a condição final de uso, ou seja, os ciclos são escolhidos de acordo com o ambiente ao qual o painel será submetido. Podem ser avaliados os produtos que contém tintas e vernizes, produtos intumescentes, encapsulados, superfícies tratadas e impregnadas.

O tipo X é destinado a todas as condições ambientais, (internas, semi-expostas e expostas), o tipo Y é destinado a condições internas e semi-expostas. Semi-exposto inclui temperaturas abaixo de zero, mas nenhuma exposição à chuva e exposição limitada a UV. O tipo Z1 é destinado a condições internas (excluindo temperaturas abaixo de zero) com alta humidade e por fim, o tipo Z2 é destinado a condições internas (excluindo temperaturas abaixo de zero) com classes de alta humidade diferentes de Z1. Toda estas informações estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Determinação das condições climáticas para as diferentes condições de uso, [1].

Condição final de uso			
X	Y	Z1	Z2
Temperatura	Temperatura	Temperatura	Temperatura
Humidade	Humidade	Humidade	-
Chuva	-	-	-
Radiação ultravioleta	-	-	-

De acordo com as recomendações da ETAG 028:2012, [1], cada tipo de retardante de chama deve passar por diferentes condições climáticas de envelhecimento. Para o tipo X, deve-se submeter as amostras ao ciclo de exposição descrito para produtos retardantes de chama do tipo Y por 48 horas seguido de uma exposição de 24 horas, constituído em 4 horas de exposição a humidade, 4 horas de secagem, 4 horas de humidade, 4 horas de secagem e 8 horas de descanso, deve-se repetir este ciclo por um total de 1000 horas (6 semanas). Em seguida, um spray de água uniformemente fino deve ser aplicado constantemente a uma taxa de $(12 \pm 0,8)$ [l/min] por [m²] de superfície de amostra e a temperatura não deve exceder 32 [°C].

Por fim, é necessário secar as amostras a uma temperatura de (63 ± 3) [°C] de forma que esta temperatura seja atingida dentro de 15 minutos a partir do início de secagem e o controlo desta temperatura deve ser realizada com termopares protegidos da radiação direta das lâmpadas a 2,5 [cm] da superfície da amostra. É necessário acompanhar a secagem com o movimento do ar em toda a face da amostra a uma taxa de pelo menos 7,6 [m/min]. Deve-se alternar a posição das amostras dentro do equipamento de exposição.

Para o envelhecimento climático utilizando o retardante de chama do tipo Y, as amostras devem ser submetidas inicialmente durante 8 horas a uma temperatura de (27 ± 2) [°C] e (90 ± 5) % de humidade relativa (RH), 16 horas a (23 ± 2) [°C] e (50 ± 3) % RH, totalizando 24 horas. O próximo ciclo consiste em 8 horas a (-20 ± 2) [°C] em ambiente seco e 16 horas a (23 ± 2) [°C] e (50 ± 3) % RH. A duração total do envelhecimento artificial deve ser de 10 dias, sem interrupção.

Para o tipo Z1 deve ser realizado o envelhecimento artificial inicialmente com 8 horas a (27 ± 2) [°c] e (90 ± 5) % RH e 16 horas a (23 ± 2) [°c] e (50 ± 3) % RH, totalizando 1 ciclo de 24 horas. O teste deve decorrer em 10 dias sem interrupção. Por fim, o retardante de chama do tipo Z2 deve utilizar 8 horas a (25 ± 2) [°c] e (70 ± 5) % RH e 16 horas a (23 ± 2) [°c] e (50 ± 3) % RH, com a duração do total do teste de 10 dias sem interrupção, [1].

4.2.2 Preparação dos painéis para exposição climática

Este estudo concentra-se em analisar a durabilidade dos painéis de derivados de madeira utilizando diferentes tipos com e sem resina ignífuga, aglomerados de partículas do tipo P2, com retardante de chamas (FR) e sem retardante de chamas (NFR) designados por PB-P2-FR e PB-P2-NFR e painéis de fibras de média densidade standard (ST), MDF-ST-NFR e MDF-FR. Também foi utilizado o material de aglomerado de partículas longas e orientadas apenas sem retardantes de chama, designado por OSB4-NFR. A Figura 36 mostra os painéis que foram cedidos pela empresa Sonae Arauco, [8].

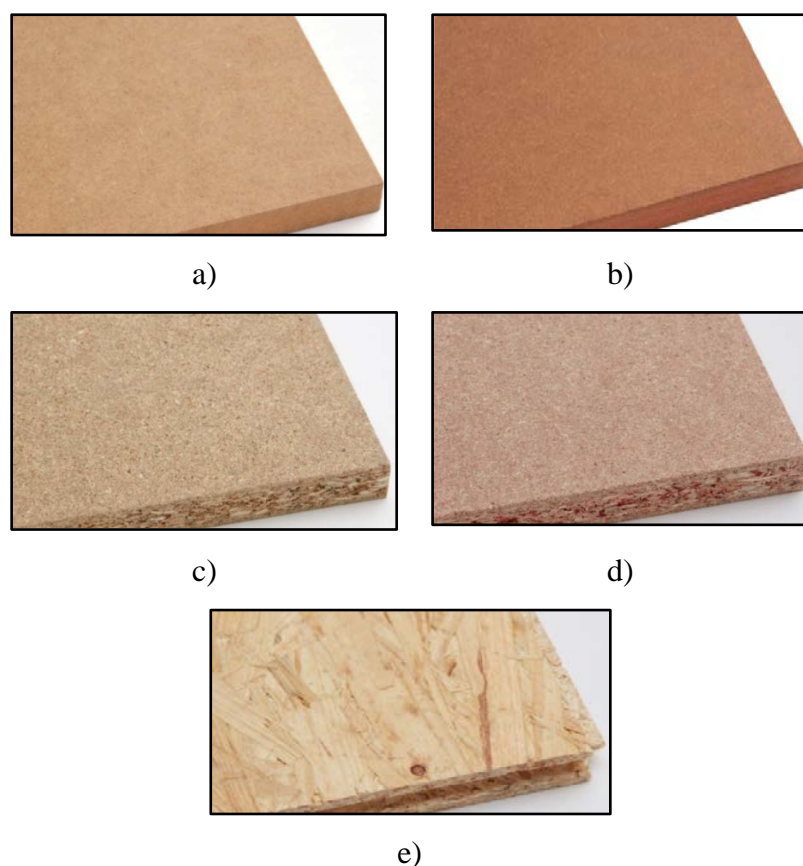


Figura 36 - Painéis de derivados de madeira: a) MDF-ST-NFR; b)MDF-FR; c)PB-P2-NFR; d)PB-P2-FR e e) OSB4-NFR, [8].

Os painéis de madeira podem ser fabricados com diferentes tipos de resinas. A resina UF é indicada para aplicações em ambientes secos por possuir baixa resistência à humidade, por outro lado, tem-se a possibilidade de misturar a resina UF com a MUF, tornando a resina um pouco mais resistente à humidade. As resinas pMDI são recomendadas para ambientes húmidos, por possuir uma boa durabilidade protegendo as propriedades físico-mecânica dos painéis por muito tempo, [58], [47], [54], [60], [17].

O painel PB do tipo P2 tem aplicabilidade para ambientes secos e possui excelentes propriedades de maquinabilidade e versatilidade, podendo ser utilizado em salas, quartos, escritórios e ensino, desporto e lazer, portas e construções. Para os painéis fabricados com UF/MUF a constituição químico-física deste tipo de painel consiste em: 85% de partículas de madeira, 4-7% de água, 8-10% de resina ureia formaldeído (UF) / melamina ureia-formaldeído (MUF) e quantidade de parafina menor que 1,5%. Para os painéis fabricados com pMDI a constituição físico-química consiste em: 85% de partículas de madeira, 4-7% de água, 8-10% de resina PMDI e uma quantidade de parafina menor do que 1,5%, [66].

Para o painel PB-P2 ignífugo a aplicabilidade e a composição físico-química é a mesma, porém com adição de um composto ignífugo, com capacidade retardante de chama, [66].

O MDF do tipo Standard tem aplicabilidade para ambientes secos e possui propriedades excelentes de maquinabilidade, versatilidade e lacagem. Sua constituição físico-química apresenta cerca de 80% de fibras de madeira, 4-11% de água, UF/MUF de 9-25% e parafina de 0,5-3%. Para os painéis com pMDI tem-se: 90% de fibras de madeira, 5-9% de água, 3,5% de pMDI, 0,5-3% de parafina. Para os painéis de MDF ignífugo as propriedades de composição físico-química são as mesmas porém continua desconhecido o composto utilizado como produto retardante de chama, [67].

O painel OSB4 possui excelentes propriedades de durabilidade, emissões reduzidas, hidrófugo e estabilidade dimensional podendo ser utilizado em pavimentos e construção civil. As propriedades físico-químicas consiste em: 90% ou mais de partículas de madeira, 4,5% de água em forma de humidade, 3,5% de PMDI e 0,5-2% de parafina, [68].

Apesar de ser fundamental para o estudo, não se sabe qual a real constituição física e química dos painéis utilizados, pois os fatores que mais são influenciados pela envelhecimento climático é a composição de fibras/partículas e composição química da resina utilizada. A Tabela 9 mostra a composição física e química dos painéis.

Tabela 9 - Propriedades físicas e químicas dos painéis, [8].

Composição física dos painéis (%)	Tipo de painel		
	MDF	PB	OSB
Fibras/partículas de madeira	80	85	90
Água	4 - 11	4 - 7	4,5
Resina UF/MUF	9 - 25	8 - 10	-
Resina pMDI	-	-	3,5
Parafina	0,5 - 3	1,5	0,5 - 2

A Tabela 10 representa as principais propriedades mecânicas dos painéis segundo a ficha técnica do fabricante, de acordo com as faixas de espessuras.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas dos painéis do fabricante [8].

Painel	Espessura [mm]	Resistência à flexão		Módulo de elasticidade	
		[MPa]		[GPa]	
		0°	90°	0°	90°
MDF-FR	13-19	20	-	2,2	-
MDF-ST-NFR	13-19	20	-	2,2	-
PB-P2-FR	14-20	11	-	1,6	-
PB-P2-NFR	14-20	11	-	1,6	-
OSB4-NFR	18-25	26	14	4,8	1,9

Os painéis, nas suas dimensões originais fornecidas, foram cortados com uma serra circular em amostras de dimensões 600x600 [mm] e protegidas em todo o seu contorno com uma fita adesiva de alumínio. Com esta proteção lateral pretende-se anular a absorção de humidade por estas superfícies laterais, transportada por forças capilares, [11], durante a exposição à ação climática. A Figura 37 representa a serra de corte circular e as dimensões ao qual foram submetidos cada painel.

Foram obtidas duas amostras de cada tipo de painel que foram cortados em provetes e que posteriormente foram submetidos ao teste de flexão com série de peças de teste transversais e longitudinais, ou seja, à 0° e 90° em relação ao processo de produção das

placas, afim de avaliar se há diferença dos resultados nas duas orientações, [2]. A Figura 38 mostra a preparação dos painéis que foram utilizados para a caracterização mecânica.

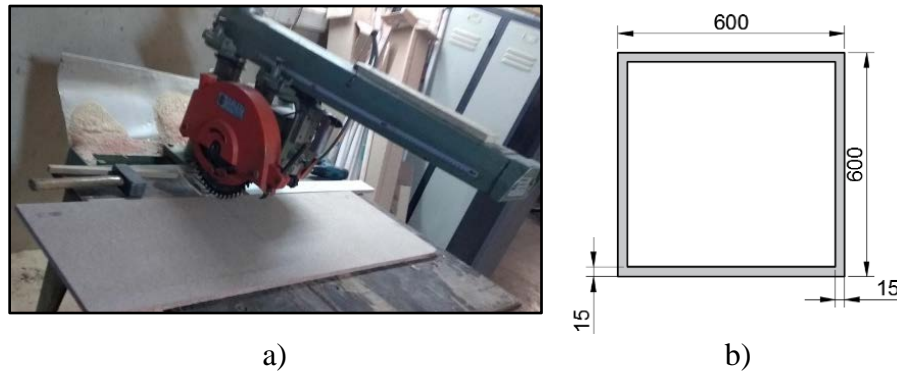


Figura 37 - Obtenção das amostras para o envelhecimento: a) serra circular, b) dimensões de corte dos painéis.

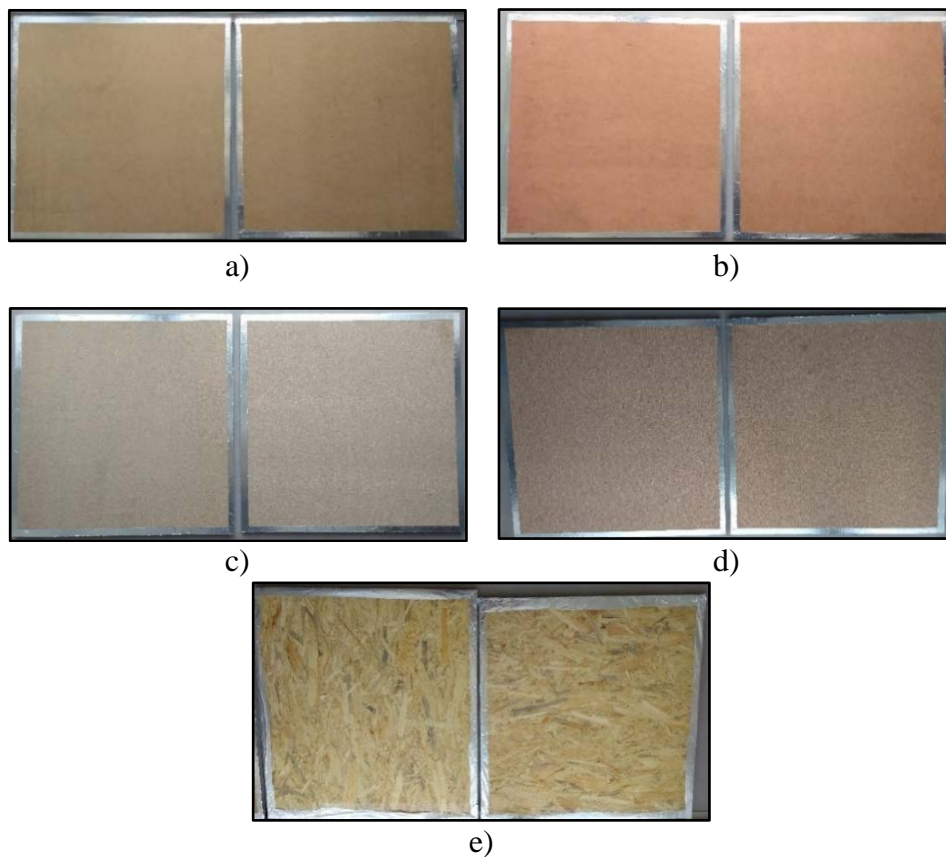


Figura 38 - Amostras utilizadas nos testes de envelhecimento: a) MDF-ST-NFR; b) MDF-FR; c) PB-P2-NFR; d) PB-P2-FR; e) OSB4-NFR.

Para os testes de envelhecimento artificial, foi utilizada uma camara climática ambiental ACS DM600 da Discovery que pode ser utilizada para diversas aplicações

ambientais. A temperatura no seu interior pode ir de -40 a 180 [°c] e humidade relativa de 10 a 98 [%]. A máquina possui ainda um sistema MyKratos ligado ao computador/tablet para auxiliar o usuário no controle de ciclos automáticos, [69]. A Figura 39 representa a máquina climática utilizada para a realização do envelhecimento.



Figura 39 - Máquina ACS DM 600 (esq.), painéis expostos no interior da camara de climática (dir.)

Para o presente estudo, foram utilizadas as condições climáticas de temperatura e humidade correspondentes às condições de uso Z1 (ver Tabela 11), atendendo a que os produtos derivados de madeira utilizados têm aplicabilidade para uso interno. Este ciclo de exposição é repetido durante 10 dias ininterruptos. A Figura 40 representa o painel da camara climática em funcionamento.

Tabela 11- Condições climáticas para as condições de uso Z1,[1].

Etapa	T [°c]	RH [%]	t [h]
1	27 ± 2	90 ± 5	8
2	23 ± 2	50 ± 3	16
Tempo total	-	-	24



Figura 40 - Painel eletrônico da máquina: a) condições climáticas da 1ª etapa; b) condições climáticas da 2ª etapa.

4.2.1 Preparação dos provetes para os ensaios de flexão estática

Com o intuito de avaliar a durabilidade das propriedades mecânicas dos painéis de madeira, foi utilizado a EN 310:1993, [2], que determina a utilização do ensaio de flexão em três pontos e para o cálculo da resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e força máxima na flexão. Esta norma prescreve os provetes com comprimento 20 vezes a sua espessura nominal [t] para a distancia entre os apoios denominado por l_1 , adicionado de 50 [mm] para o comprimento total l_2 do provete, como mostra a Figura 41.

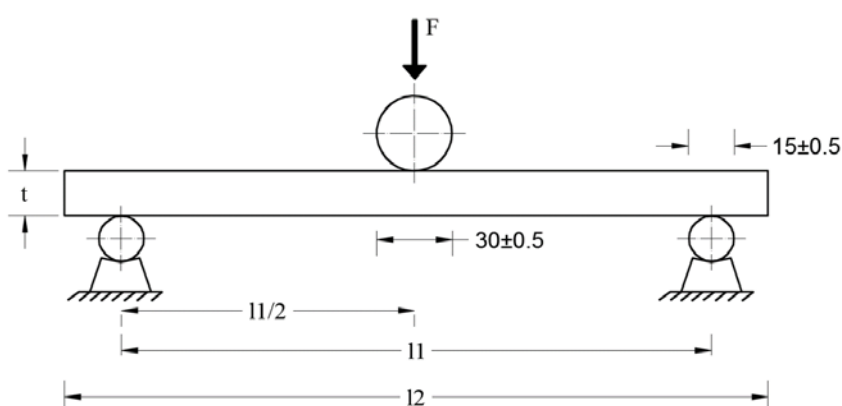


Figura 41 - Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos.

Os ensaios de flexão estática foram determinados para a direção paralela 0° e perpendicular 90°, como solicitado pela EN 310:1993, [2], no intuito de confirmar se há alguma diferença no módulo de elasticidade, resistência à flexão e força máxima na flexão. Foram divididos em dois grupos entre provetes envelhecidos (AGED) e não envelhecidos (NAGED).

Foram produzidos e ensaiados 191 provetes, dispostos na Tabela 13, representando aproximadamente 10 para cada série. Em algumas das séries foram ensaiados 9 provetes devido a problemas na produção dos mesmos ou devido a testes que não foram executados corretamente. Metade dos provetes foram ensaiados com a parte superior voltada para cima e metade com a parte inferior voltada para cima, como mostra a Figura 42. A Tabela 12 apresenta informações pertinentes às dimensões dos provetes de cada tipo de painel.

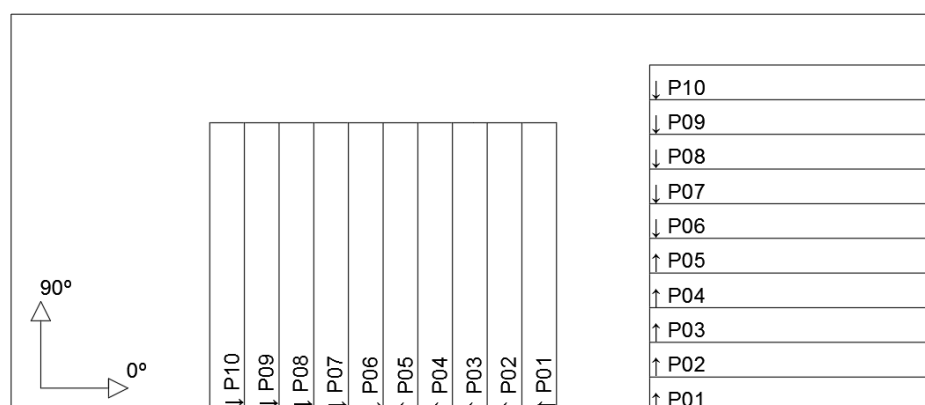


Figura 42 - Esquema dos provetes cortados para a caracterização mecânica.

Tabela 12 - Dimensões dos provetes utilizadas para o teste de flexão estática.

Painel	Largura (b) [mm]	Espessura (t) [mm]	Distancia entre os suportes (l1) [mm]	Comprimento total (l2) [mm]
MDF-ST-NFR-0°/90°	50	16	320	370
MDF-FR-0°/90°	50	16	320	370
PB-P2-NFR-0°/90°	50	15	300	350
PB-P2-FR-0°/90°	50	15	300	350
OSB4-NFR-0°/90°	50	18	360	410

Tabela 13 - Numero total de provetes utilizados em cada série.

Painel	N° Provetes			
	Não Envelhecido		Envelhecido	
	NAGED		AGED	
	0°	90°	0°	90°
MDF-ST-NFR	9	10	9	9
MDF-FR	10	10	9	9
PB-P2-NFR	10	9	9	9
PB-P2-FR	10	10	9	10
OSB4-NFR	10	10	10	10
N° Total	49	49	46	47

A Figura 43 representa os provetes cortados.



Figura 43 - Obtenção dos provetes após corte das amostras.

Previamente à execução dos ensaios de resistência mecânica, os provetes foram submetidos ao condicionamento atmosférico para garantir o equilíbrio higroscópico. Segundo a norma EN310, o condicionamento deve ser realizado com uma temperatura de (20 ± 2) [°c] e humidade relativa de (65 ± 5) %. Considera-se que os provetes atingem o ponto de equilíbrio mássico, quando duas pesagens consecutivas num intervalo de 24h não resulte numa variação de massa superior a 0,1% (aproximadamente 0,10g). Após o terceiro dia de condicionamento, os provetes foram alternados dentro da camara entre as pesagens com o intuito de que fossem contemplados igualmente pelas condições estabelecidas. Foram

necessários seis dias para que todos os provetes atingissem o equilíbrio higroscópico. A Figura 44 expõe a forma com que os provetes foram colocados dentro da máquina.

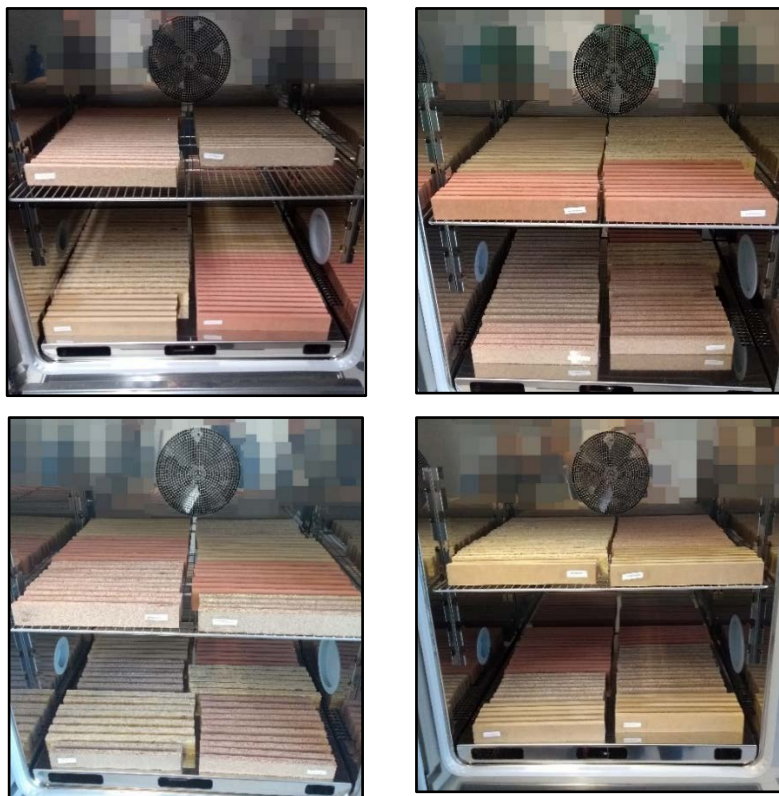


Figura 44 - Condicionamento climático dos provetes.

A norma sugere que os cilindros utilizados nos apoios devem ter 15 [mm] de diâmetro e o sistema de aplicação de carga a meio do provete 30 [mm]. Para além destes componentes foi ainda necessário maquinar extensões do sistema de flexão em três pontos necessários para os ensaios do OSB4, devido a estes provetes possuírem um comprimento superior aos restantes. A Figura 45 e Figura 46 apresentam o desenho cad dos suportes que foram maquinados, conceção das peças prontas e o suporte na máquina.

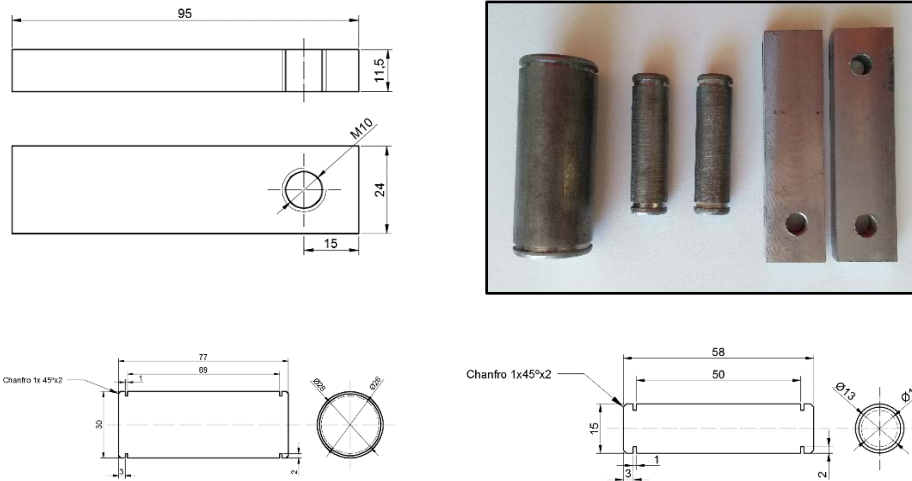


Figura 45 - Suportes maquinados para atender à norma EN310.



Figura 46 - Distância máxima entre os apoios sem o suporte (esq.) e com o suporte (dir.).

4.2.2 Procedimento do ensaio de flexão

Para o teste de flexão em três pontos foi utilizado a máquina de ensaios universal INSTRON 3382, representado na Figura 47. Fez-se necessário medir a espessura e largura de cada provete no teste de forma que a espessura deve ser medida utilizando a intersecção da diagonal e a largura medida no meio do provete. Os dados das medidas da largura e comprimento total dos provetes está no Anexo A1.



Figura 47 - Máquina universal INSTRON 3382.

Os ensaios de resistência à flexão (MOR) foram realizados de acordo com a EN310:1993 de forma que o incremento da carga foi ajustado de forma a garantir que a carga máxima fosse atingida em 60 ± 30 segundos, aplicada no centro do provete. Para tal foram considerados os valores de resistência à flexão existentes na ficha técnica dos produtos, e considerando as dimensões geométricas reais dos provetes, a taxa de aplicação de carga foi determinada através da Equação 2, dividindo a força máxima pelo tempo de teste igual a 60 segundos.

A resistência à flexão foi calculada considerando a carga máxima localizada no meio do provete $F_{m\acute{a}x}$, a distancia l_1 entre os apoios, a largura b do provete, a espessura do provete t de acordo com a Equação 2.

$$MOR = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x} \times l_1}{2 \times b \times t^2} \quad (2)$$

O m3dulo de elasticidade (MOE) foi calculado, utilizando-se a regi3o linear da curva de leituras de carga *versus* deforma3o3o, levando em conta a for3a F_2 com seu incremento de deforma3o3o a_2 e a for3a F_1 e seu incremento a_1 , ambos presente no regime el3stico, de forma que F_2 equivale a 40% da $F_{m\acute{a}x}$ e F_1 10% da $F_{m\acute{a}x}$, de acordo com a Equa3o3o 3.

$$MOE = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 (a_2 - a_1)} \quad (3)$$

A Figura 48 ilustra alguns testes realizados e a Figura 49 representa algumas amostras ensaiadas antes e depois dos testes de flexão em três pontos.

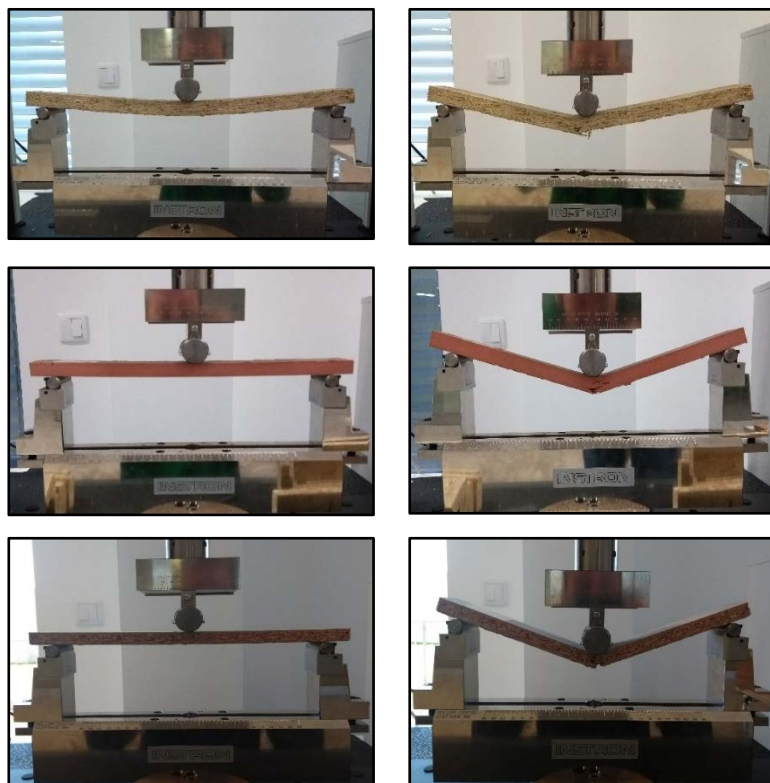


Figura 48 - Teste de flexão em três pontos, antes do teste (esq.) e após o teste (dir.).

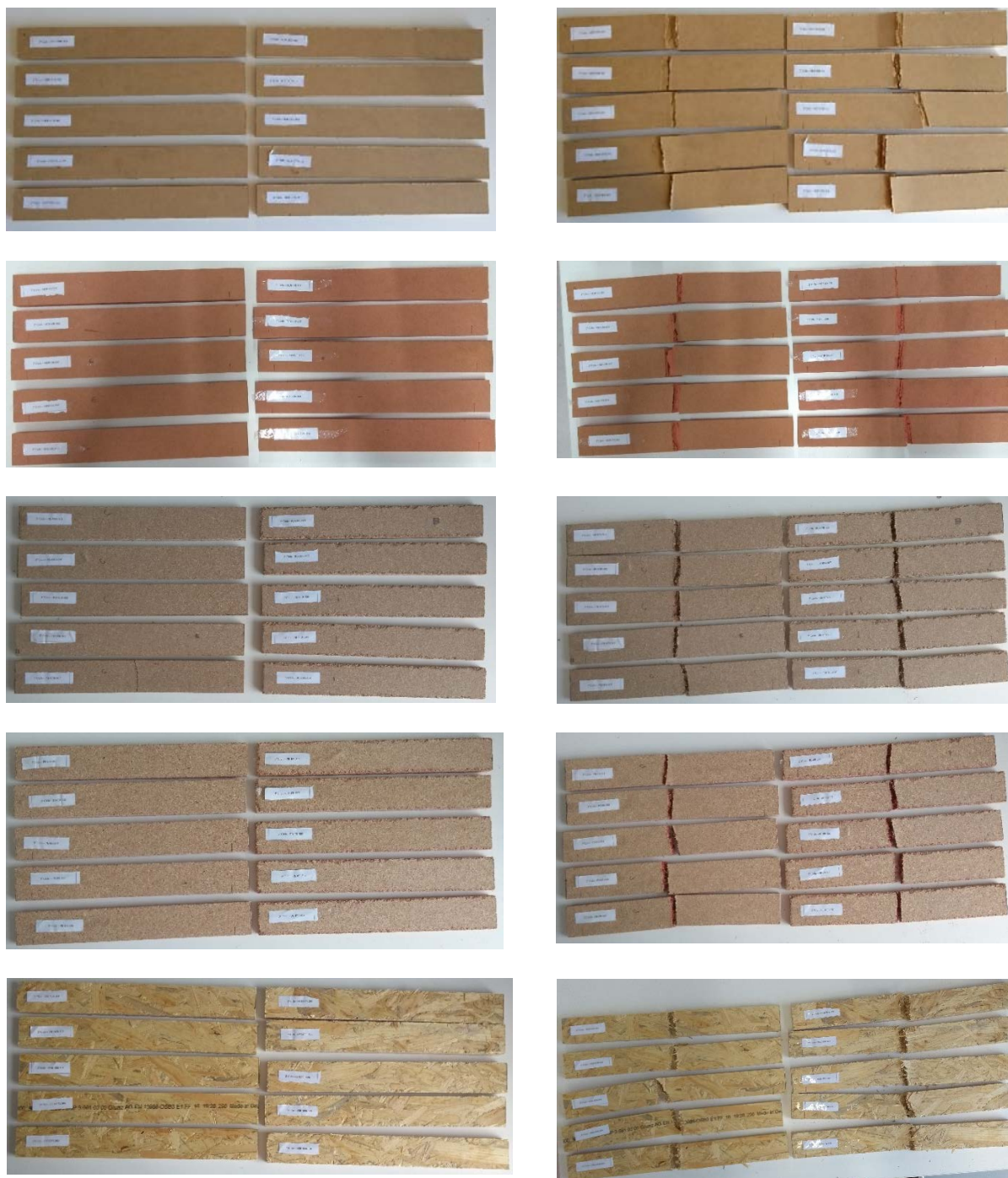


Figura 49 - Representação de alguns provetes submetidos ao teste de flexão em três pontos.

4.3 Resultados experimentais

Após o envelhecimento climático os painéis de PB-P2-FR cristalizou sais inorgânicos ignífugos em seu exterior como mostra a Figura 50, principalmente devido a esses painéis serem fabricados apenas com produtos ignífugos sólidos, [47].O surgimento dos sais na

superfície ocorre devido a lixiviação dos produtos ignífugos após os ciclos de humidade, além de uma suposta ocorrência de migração dos produtos ignífugos para o interior do painel, [40].

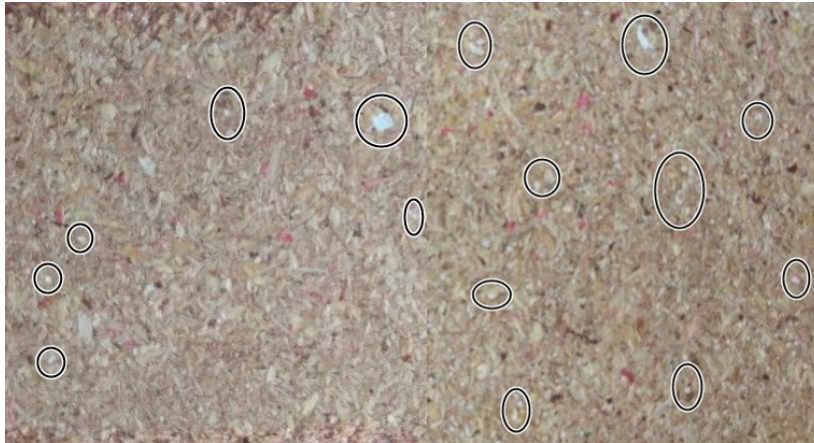


Figura 50 - Aparecimento de cristais de sais inorgânicos decorrente do envelhecimento climático.

Para os painéis de MDF-FR não foi possível notar a cristalização dos sais na superfície, pois segundo fabricante, este tipo de painel possui um comportamento ao fogo melhorado e pode ter sido produzido com produtos ignífugos líquido, perdendo apenas a coloração dos painéis, (ver Figura 51).



Figura 51 - Perda da coloração nos painéis de MDF-FR: antes do envelhecimento (esq.) e após o envelhecimento (dir.).

Primeiramente faz-se uma análise das perda das propriedades mecânicas para os painéis não ignífugos (NFR) de PB-P2, MDF-ST e OSB4 a 0 e 90°. São apresentados os gráficos obtidos apenas para os painéis a 0°, pois não houve uma diferença significativa entre direções paralelas e perpendiculares com exceção do OSB4.

A Figura 52 representa os valores das propriedades mecânicas de todos os provetes ensaiados e a média entre os painéis envelhecidos e não envelhecidos para os painéis de MDF sem retardante de chamas ensaiados ao corte de 0°, MDF-ST-NFR-0°. Os valores para os provetes ensaiados a 90°, estão dispostos no anexo A.

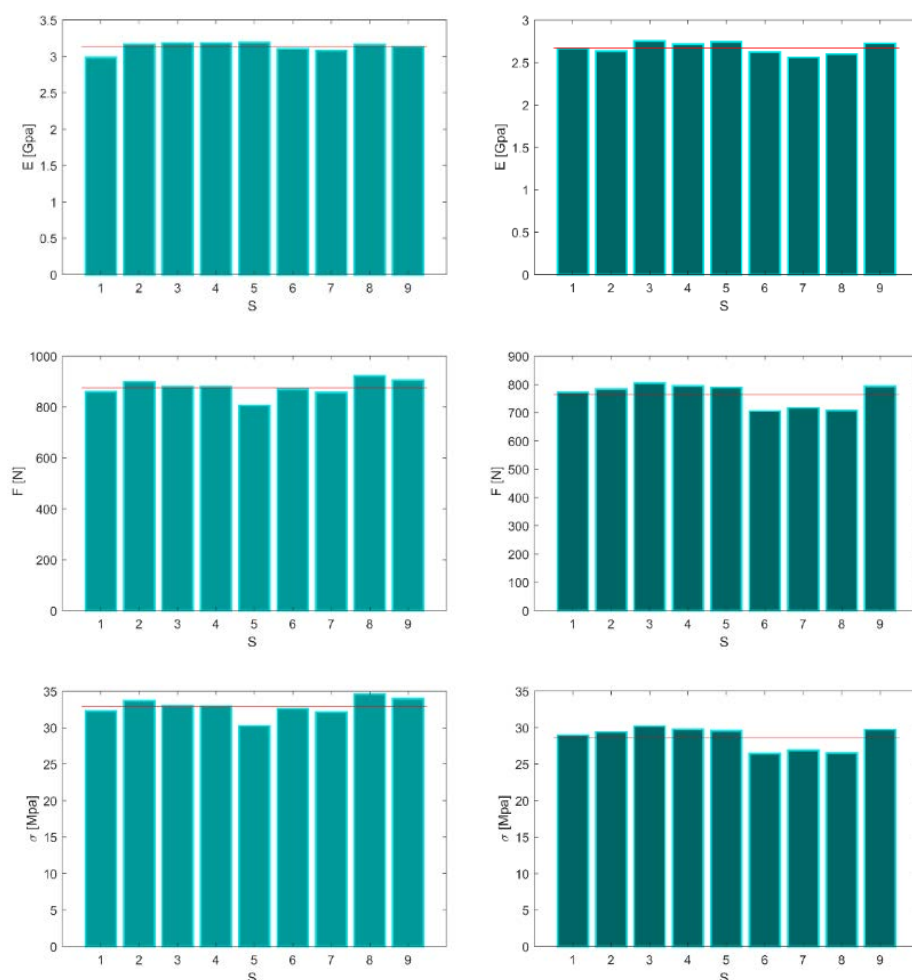


Figura 52 - Propriedades mecânicas MDF-ST-NFR a 0°; provetes não envelhecidos (esq.) e provetes envelhecidos (dir.).

O teor de humidade de equilíbrio (EMC) dos painéis de MDF é menor do que dos painéis de aglomerados e isso origina valores superiores de resistência mecânica, pois quanto maior o EMC, menores são as propriedades mecânicas dos painéis, [11].

Os painéis de MDF standard sem retardante de chama, apresentaram uma queda nas propriedades mecânicas de MOR (σ), MOE (E) e F máxima na flexão, (F). Os painéis de

madeira podem possuir valores diferentes entre os provetes devido a disposição interior das fibras ou partículas de madeira após a prensa no processo produtivo, ou devido a uma má uniformidade da resina utilizada para aderência das fibras/partículas. Contudo os painéis de MDF se caracterizam por possuírem uma maior homogeneidade no seu interior devido ao tamanho reduzido das fibras de madeira ocasionando em valores próximos entre os provetes.

As propriedades mecânicas do MDF-ST-NFR caíram após o envelhecimento artificial. A tensão máxima de ruptura (MOR) observada para os painéis não envelhecidos foi de 32,832 [MPa] em média, enquanto que o conjunto de provetes que foram submetidos ao envelhecimento apresentou o valor médio de 28,609 [MPa], isto é, representou uma perda de quase 4,22 [MPa] ou 12,86%. Outra propriedade importante avaliada foi o Módulo de elasticidade (MOE) que apresentou uma queda de aproximadamente 14,81% e conseqüentemente a perda da força máxima resistida pelo material antes do seu rompimento total, e isto pode ser justificado devido à resina de melamina-ureia-formaldeído possuir perda de sua resistência quando submetida a umidade por tempo relativamente curto, [70].

Apesar das propriedades físico-mecânicas dos painéis de MDF serem quase uniforme independente das direções, observou-se uma redução maior nas perdas das propriedades para os provetes cortados à 90°, atingindo uma redução de 15,68% e 16,77% para valores de MOR e MOE, respectivamente. A Tabela 14 expõe os valores médios para as propriedades mecânicas do MDF-ST nas duas orientações de corte. Os painéis envelhecidos apresentaram uma maior deflexão vertical em [mm] e conseqüentemente uma maior deformação [mm/mm], Figura 53.

A resina melamina-ureia-formaldeído (MUF) pode ter amolecido, facilitando o aumento de uma maior deformação e conseqüente um decréscimo no módulo de elasticidade. Além disso, os provetes envelhecidos obtiveram o rompimento em diferentes deformações, não mantendo a linearidade como no caso dos painéis não envelhecidos, isso pode ser explicado devido aos painéis possuírem diferentes densidade de fibras e resina no exterior do painel facilitando a entrada de umidade durante o processo de envelhecimento, ocasionando diferenças na deformação sofrida durante o teste.

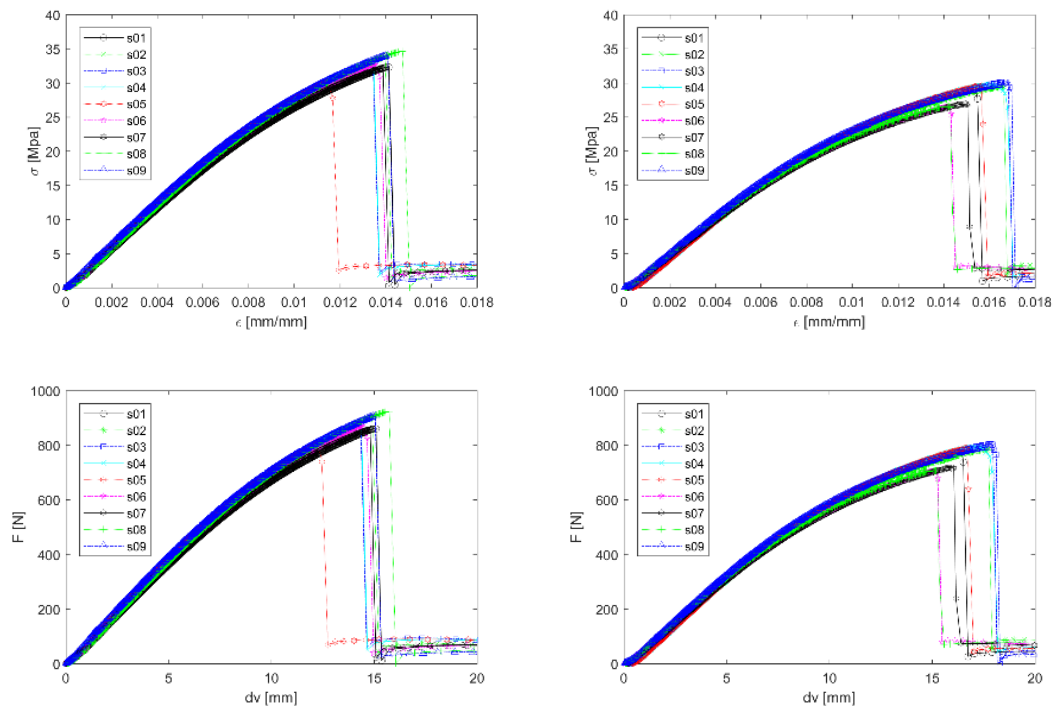


Figura 53 - Gráficos de MOR e F_{\max} do MDF-ST-NFR a 0° , não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

Os painéis de MDF com retardantes de chamas MDF-FR, também apresentaram quedas nas propriedades mecânicas, porém estas reduções foram significativamente menores se comparado ao MDF standard. Os provetes ensaiados a 0° apresentaram um valor médio de 30,214 [MPa] para não envelhecido e 28,354 [MPa] para os envelhecidos, representando uma queda de 6,15% nas propriedades de tensão máxima na flexão e cerca de 11,25% para o módulo de elasticidade; partindo de 3,181 para 2,823 [Gpa] para os painéis não envelhecidos e envelhecidos, respectivamente.

Figura 54 mostra a perda das propriedades mecânicas antes e após o envelhecimento climático.

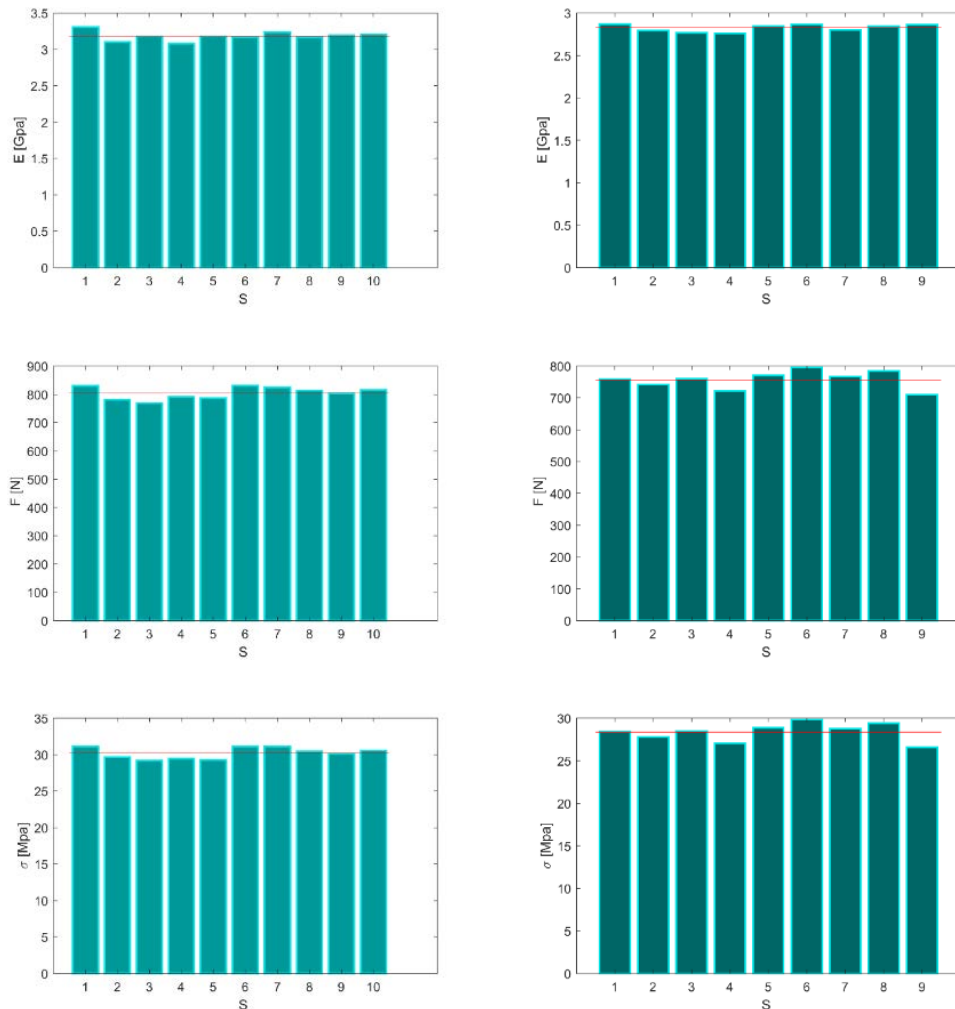


Figura 54 - Propriedades mecânicas MDF-FR a 0°; provetes não envelhecidos (esq.) e provetes envelhecidos (dir.).

Os painéis de MDF-FR também apresentaram uma maior deformação vertical, onde observou-se uma maior deformação nos provetes envelhecidos que pode ter ocorrido devido a infiltração da humidade que acabou alterando as propriedades da resina ignífuga, deixando-o material mais flexível, (Figura 55).

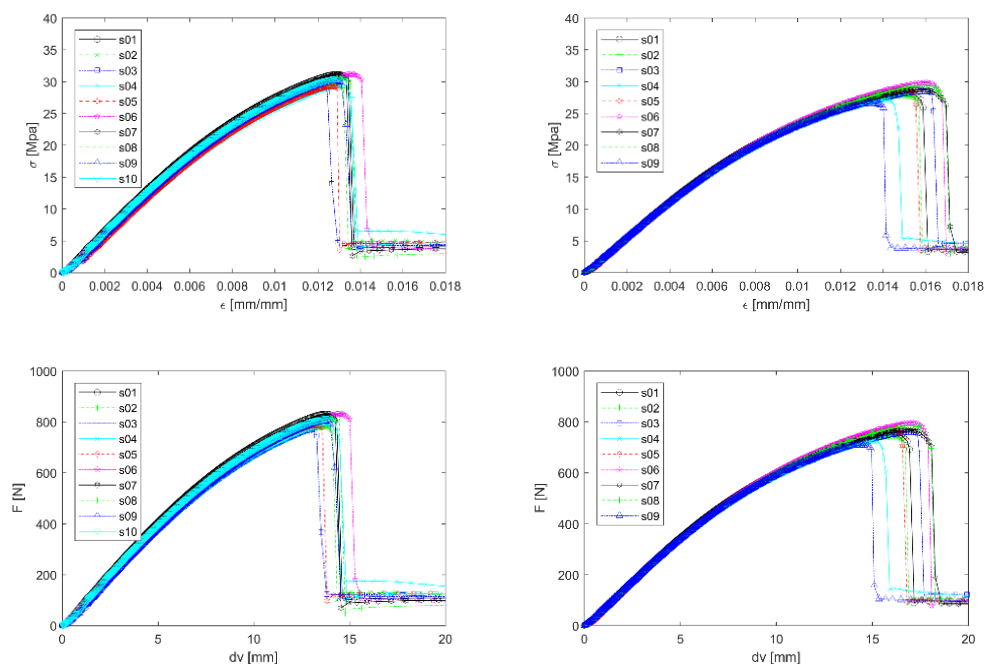


Figura 55 - Gráficos de MOR e F_{máx} do MDF-FR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

Um fator importante a ser levado em consideração é a perda percentual dos valores das propriedades mecânicas a fim de avaliar e comparar as perdas entre os painéis sem a resina ignífuga e com a resina ignífuga, que neste caso apresenta reduções muito menores nos painéis ignífugos.

Os painéis de MDF com retardante de chamas, MDF-FR apresentaram valores menores de propriedades mecânicas em comparação ao painel de MDF-NFR devido a adição de reagentes retardadores de fogo que provoca uma redução da resistência interna e módulo de flexão, [58]. A adição de produtos ignífugos no fabrico de painéis causa um pouco de incompatibilidade entre as resinas pois os ácidos presentes na resina ignífuga hidrolisam as cadeias de celulose e conseqüentemente causam a redução da molécula de celulose, que são responsáveis pela resistência da fibra de madeira, ou seja, a redução do comprimento das moléculas de celulose causa uma redução nas propriedades de resistência mecânica macro, [29], e isto explica o fato dos painéis de MDF *standart* apresentarem valores de módulo de flexão (MOR) de 32,832 [MPa] contra 30,214 [MPa] para o MDF sem resina ignífuga e com resina ignífuga (Tabela 14).

Os valores das reduções nas perdas de propriedades mecânicas para ambos os tipos de painéis foram maiores para os provetes ensaiados à 90°.

Tabela 14 - Comparação da redução das propriedades mecânicas dos painéis de MDF.

Painel	MOR [MPa]			MOE [Gpa]		
	NAGED	AGED	Red. [%]	NAGED	AGED	Red. [%]
MDF-ST-NFR-0°	32,832	28,609	12,86	3,132	2,668	14,81
MDF-ST-NFR-90°	31,866	26,869	15,68	3,118	2,595	16,77
MDF-FR-0°	30,214	28,354	6,15	3,181	2,823	11,25
MDF-FR-90°	29,533	27,316	7,50	3,211	2,815	12,33

Os painéis de aglomerados de partículas apresentaram uma perda significativa de propriedades mecânicas antes e após o envelhecimento climático (ver Figura 56). O aglomerado incha consideravelmente mais do que outros tipos de painéis porque infiltra mais umidade devido ao tamanho das suas partículas o que acaba causando vazios no seu interior acumulando umidade, causando tensões internas e possivelmente rachaduras, [11].

O valor médio da tensão de ruptura caiu de 11,591 para 9,767 [MPa] representando uma perda de aproximadamente 1,82 [MPa] e 15,73%. O módulo de elasticidade (MOE) apresentou uma queda de 2,307 para 1,808 [GPa], uma redução de 21,62%. Essas perdas nas propriedades mecânicas podem ter ocorrido através de falhas decorrente do inchamento e retração à medida que os provetes ganharam e perderam umidade, causando alterações na umidade da madeira e a deterioração da resina UF/MUF. Os valores médios das perdas das propriedades mecânicas para os painéis com e sem retardante de chamas a 0 e 90° estão dispostos na Tabela 15.

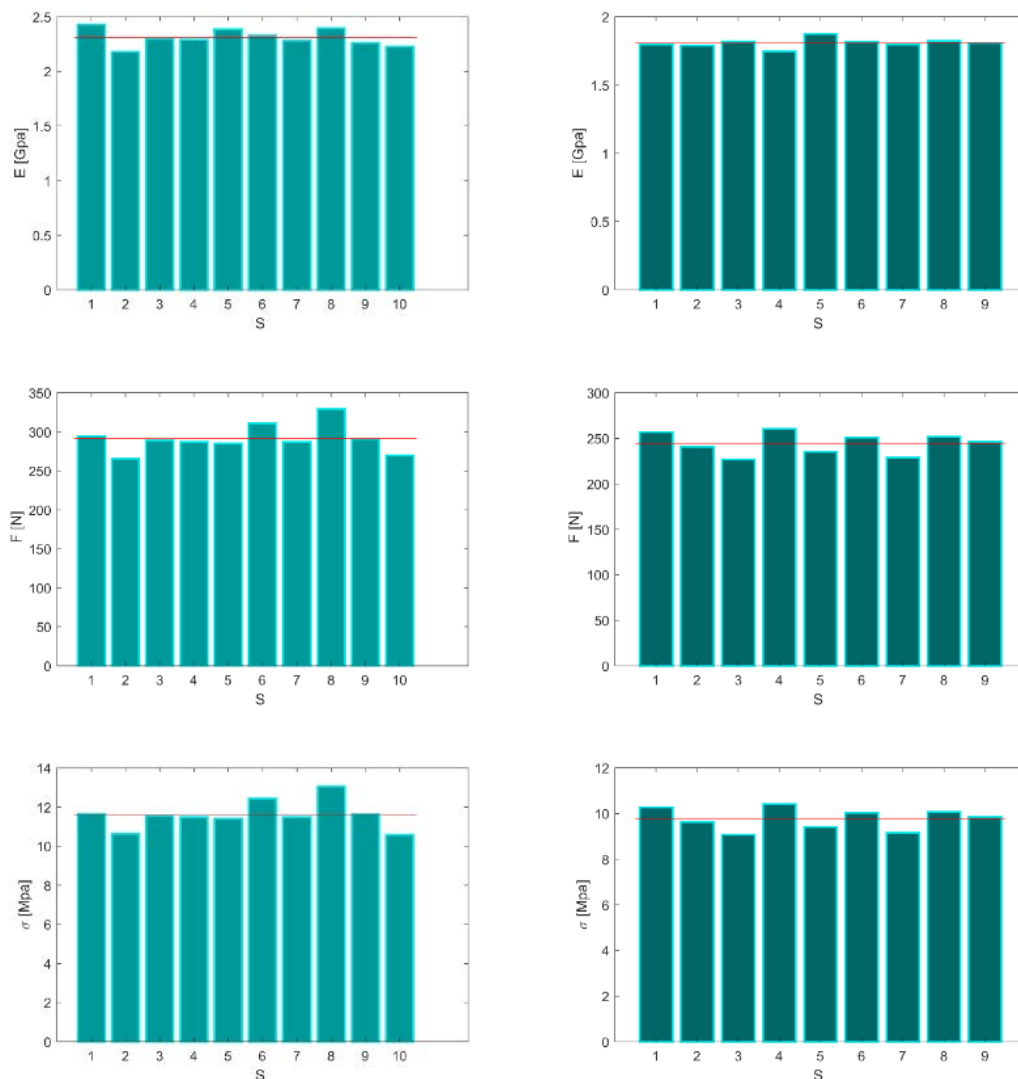


Figura 56 - Propriedades mecânicas PB-P2-NFR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).

Semelhante aos painéis de MDF, observou-se uma deformação maior dos provetes envelhecidos em comparação aos não envelhecidos, representado pela Figura 57.

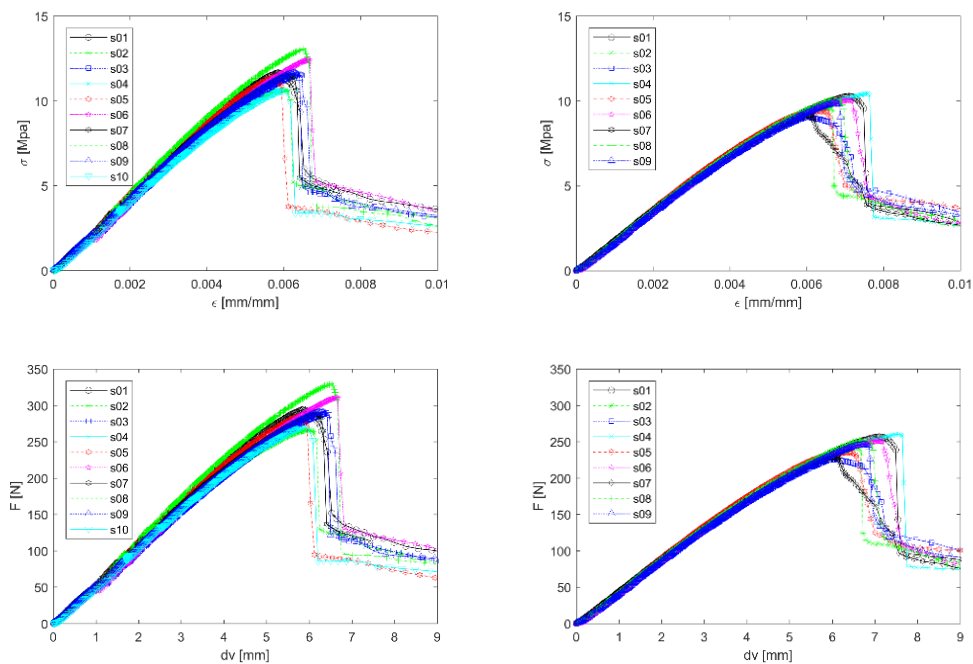


Figura 57- Gráficos de MOR e Fmáx do PB-P2-NFR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

A perda nas propriedades de MOR e MOE para os painéis ignífugos (PB-P2-FR) foram bastante significativas, ver Figura 58 e Figura 59. Para o painel não envelhecido, o valor médio da tensão de rotura e módulo de elasticidade foi de 11,09 [MPa] e 2,54 [GPa], enquanto que os valores de MOR e MOE para os painéis envelhecidos foi de 9,22 [MPa] e 1,74 [Gpa], respetivamente. As perdas observadas foram bastante acentuadas, chegando a 16,84% para MOR e 31,38% para MOE. As reduções para os provetes cortados a 90° foi de 16,01% e 26,41% para MOR e MOE, respetivamente.

A grande redução nas propriedades mecânicas observadas nos painéis ignífugos de aglomerados pode ter sido ocasionado devido aos sais inorgânicos presentes na composição do produto retardante migrar para o interior do painel e acentuar o ataque às células presentes nas partículas de madeira que conferem a resistência mecânica, e podem também cristalizar estes sais na superfície do painel.

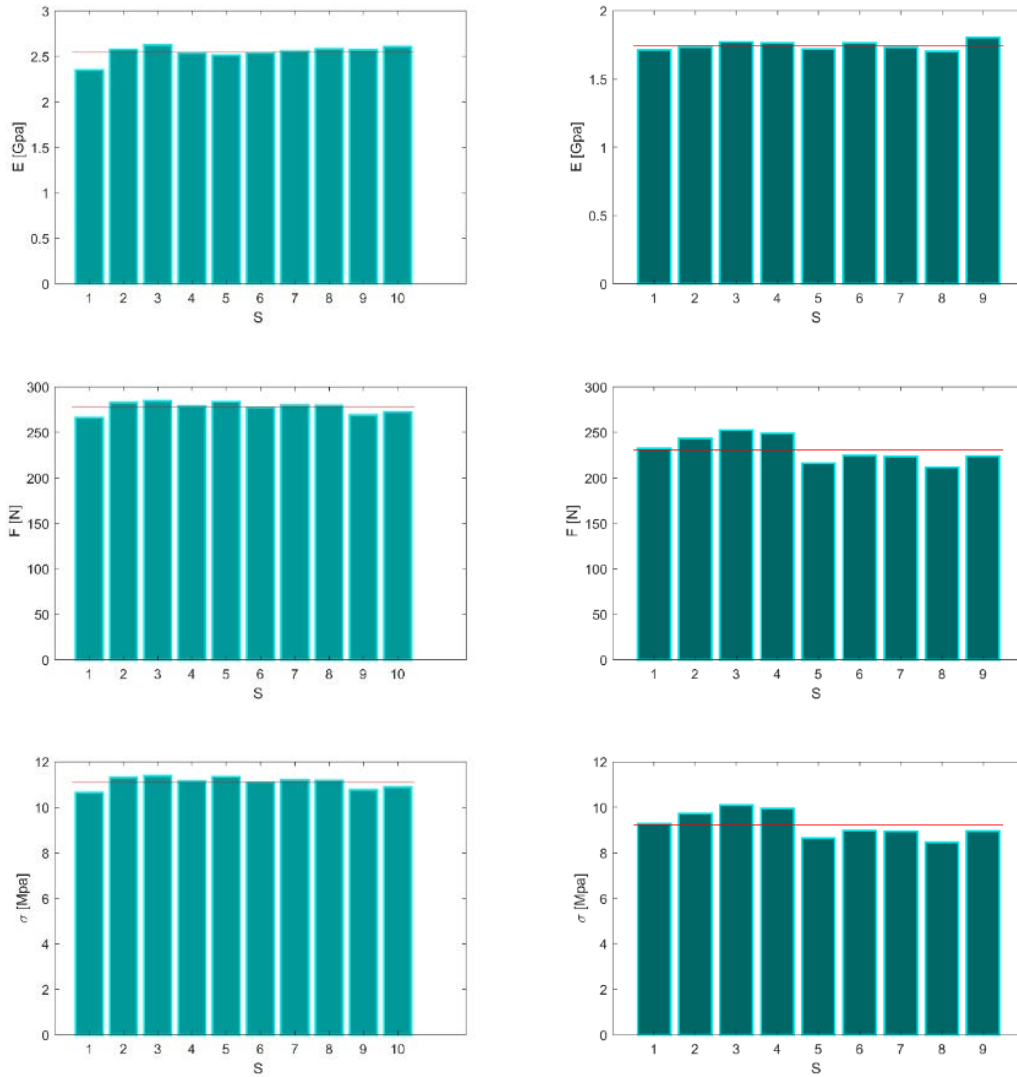


Figura 58 - Propriedades mecânicas PB-P2-FR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).

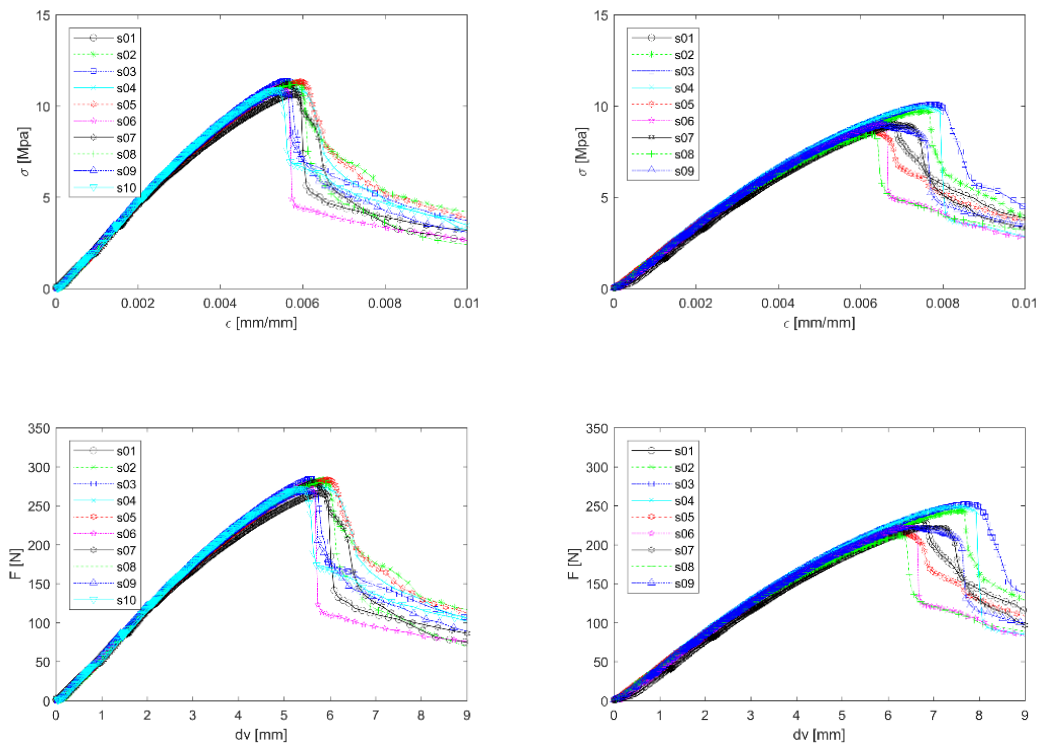


Figura 59 - Gráficos de MOR e F_{máx} do PB-P2-FR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

Notoriamente as reduções observadas no painel com tratamento ignífugo (PB-P2-FR) foi maior do que para o painel não tratado com retardante de chama (ver Tabela 15). A redução do MOR para o painel *standart* P2 a 0 e 90° foram de 15,736 e 11,372 % e para os painéis ignífugos de 16,845 e 16,015 %. A redução nos valores de MOE foi mais acentuado de 21% para os provetes sem retardante de chama e de 31% para os painéis tratados com retardante de chama, que é explicado pela alta concentração de humidade no interior do painel causado pela deterioração dos sais inorgânicos que são higroscópicos e tem esse efeito intensificado com o aumento da humidade relativa, [20].

Tabela 15 - Comparação da redução das propriedades mecânicas dos painéis de PB.

Painel	MOR [MPa]			MOE [Gpa]		
	NAGED	AGED	Red. [%]	NAGED	AGED	Red. [%]
PB-P2-NFR-0°	11,591	9,767	15,736	2,307	1,808	21,629
PB-P2-NFR-90°	11,519	10,209	11,372	2,355	2,065	12,314
PB-P2-FR-0°	11,095	9,226	16,845	2,543	1,745	31,380
PB-P2-FR-90°	11,845	9,948	16,015	2,729	2,008	26,419

Os painéis de OSB4-NFR comportaram-se de modo distinto dos restantes, principalmente porque não houve uma redução das propriedades mecânicas. Este facto pode ser explicado pelo tamanho das partículas de madeira serem bem maiores e ser fabricado com a resina pMDI, [68], onde os grupos hidroxilos da madeira reagem com os grupos isocianatos presentes na resina, formando fortes ligações químicas com boa durabilidade agindo como proteção para ambientes extremamente húmidos, facilitando a penetração da resina no poros da madeira devido ao tamanho reduzido das suas moléculas, [58]. A alta resistência da resina pMDI não ocasionou uma redução das propriedades mecânicas após o envelhecimento. Os resultados gerais médios do OSB4 estão dispostos na exposto na Tabela 16.

Para os provetes ensaiados com a direção paralela, os valores de MOR antes e após o envelhecimento foram de 21,79 e 22,094 [MPa], respetivamente. Os valores de MOE para os provetes não envelhecidos foi de 3,93 [GPa] enquanto que para os painéis envelhecidos foi de 3,70 [GPa]. A redução percentual nas perdas das propriedades de MOE foi de aproximadamente 5,74%, que foi ocasionado por um amolecimento da resina de pMDI, deixando o material menos rígido do que antes do envelhecimento. A Figura 60 representa os valores de todos os provetes ensaiados ao corte de 0°.

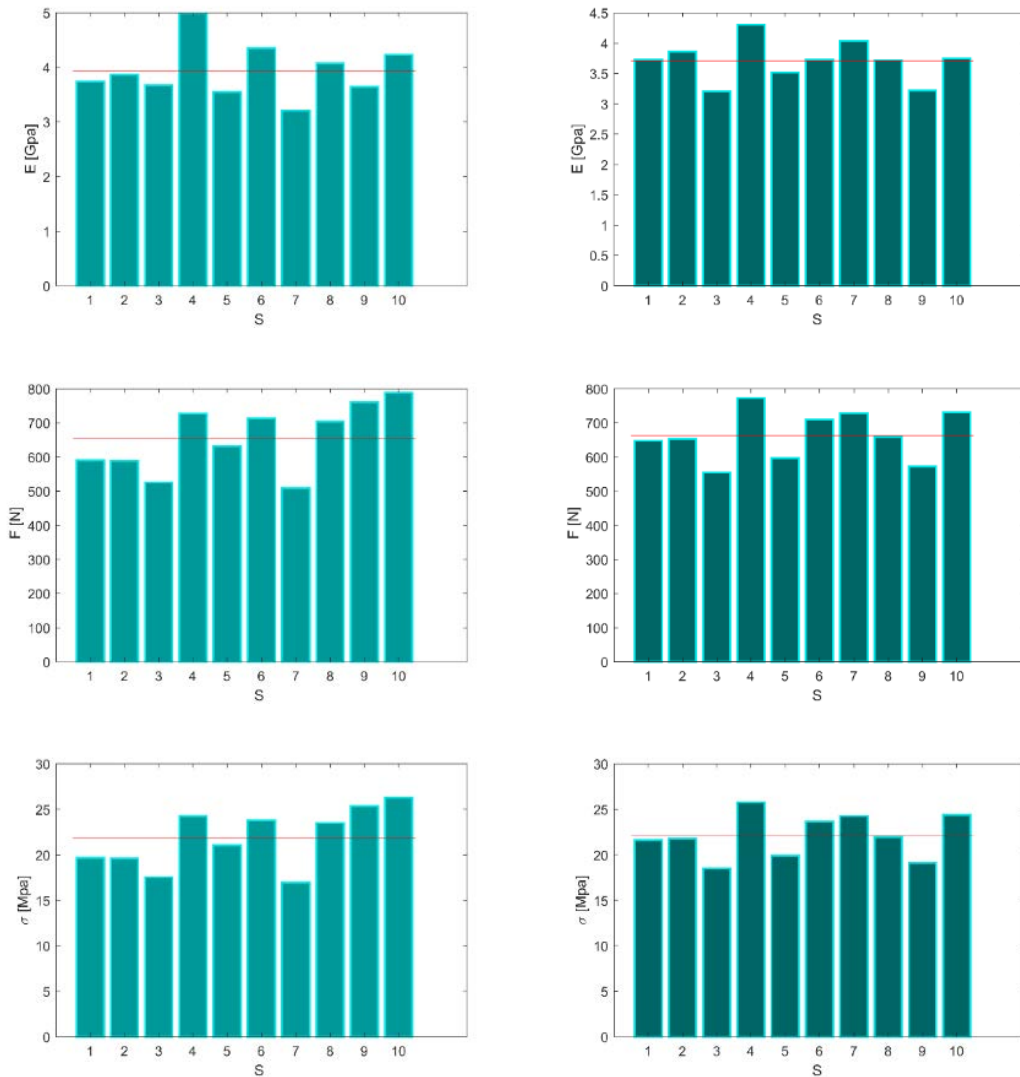


Figura 60 - Propriedades mecânicas OSB4-NFR a 0°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).

Os graficos dos ensaios de resistência à flexão e da força com o deslocamento para os painéis OSB4-NFR-0° estão dispostos na Figura 61.

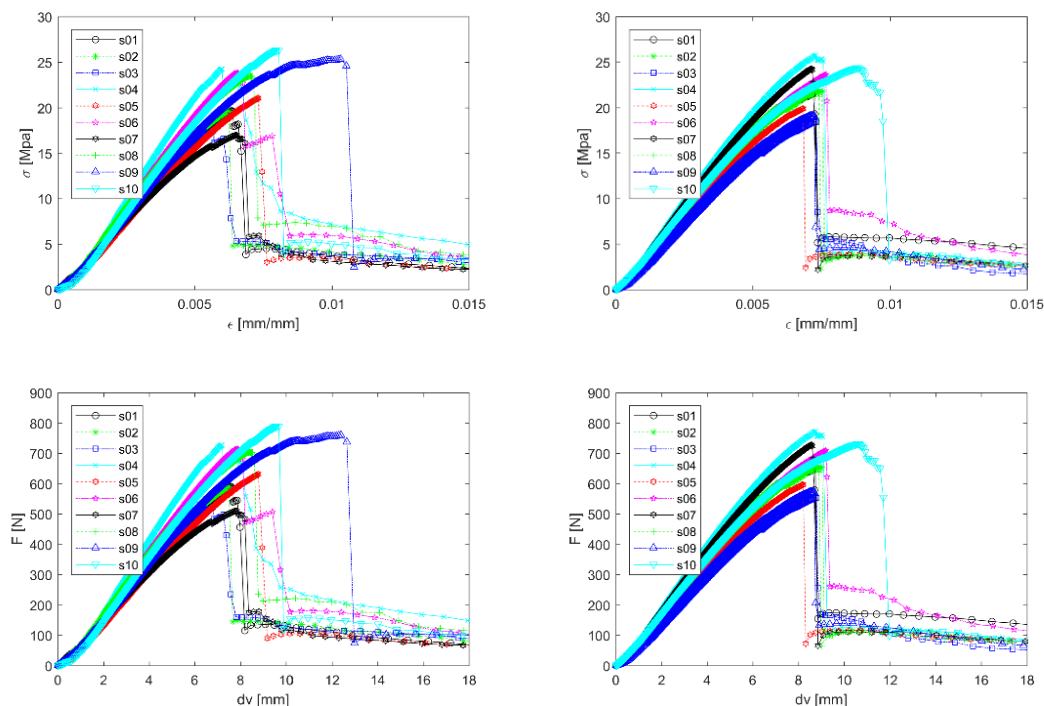


Figura 61 - Gráficos de MOR e F_{máx} do OSB4-NFR a 0°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

Como citado anteriormente, uma das diferenças dos painéis do tipo OSB4 em relação aos outros tipos de painéis utilizados neste estudo, é que há uma diferença significativa nos valores de MOR e MOE sobre as direções à 0 e 90°, pois este tipo de painel é composto por três camadas alternadas sobre diferentes orientações de fibras, onde as camadas exteriores possuem as mesmas direções enquanto que a camada interior possui a orientação perpendicular a estas, [53].

Desta forma, a perda nas propriedades mecânicas passaram de 13,55 [MPa] para os provetes não envelhecidos e 14,76 [MPa] para os não envelhecidos ao corte de 90°. Semelhante aos painéis ensaiados a 0°, estes painéis apresentaram uma pequena redução nos valores de módulo de elasticidade, passando de 1,87 para 1,83 [GPa], percentualmente uma redução de apenas 2,13%. A Figura 62 e Figura 63 representa os valores individuais de cada provete bem como os gráficos de tensão, e força em função do deslocamento.

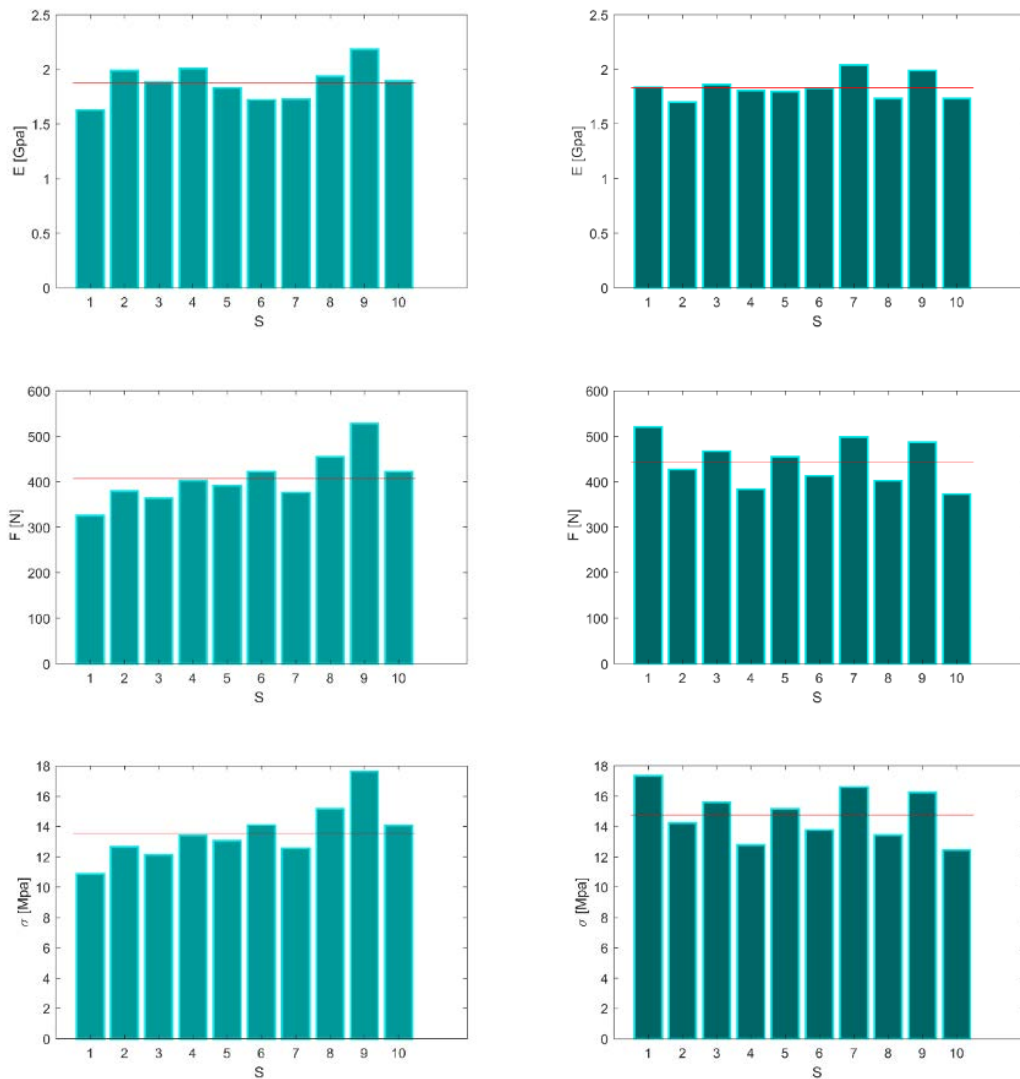


Figura 62 - Propriedades mecânicas OSB4-NFR a 90°, amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).

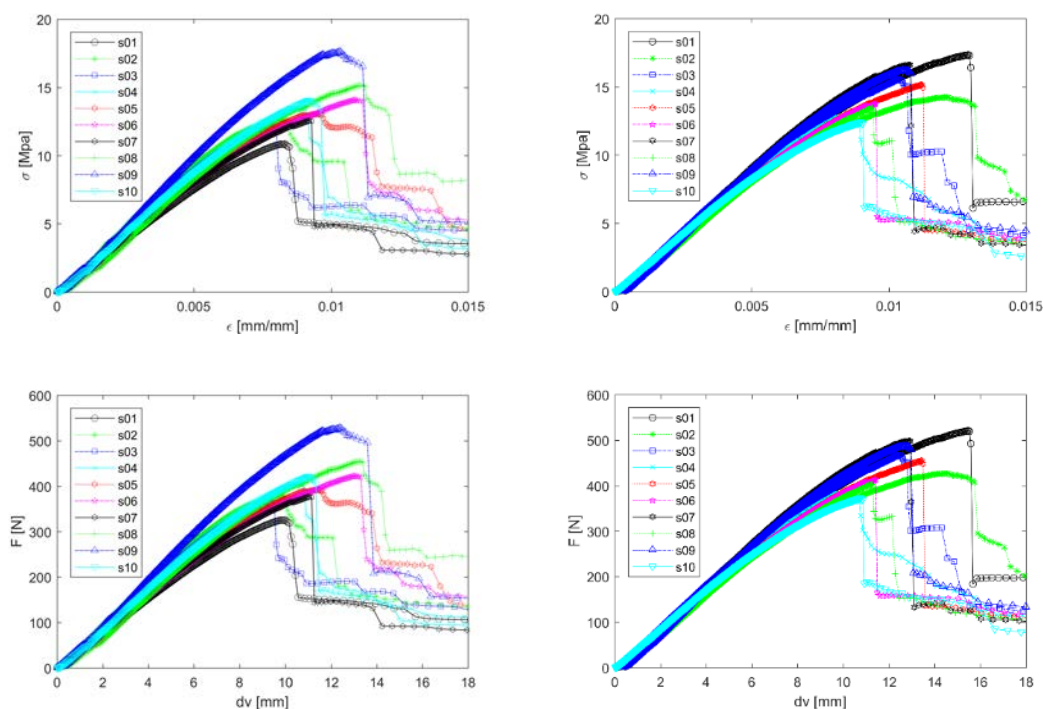


Figura 63 - Gráficos de MOR e F_{\max} do OSB4-NFR a 90°, não envelhecidos (esq.) e envelhecidos (dir.).

Um pequeno decréscimo nos valores de MOE após a exposição pode estar relacionado com o amolecimento da resina de PMDI que após a exposição climática de humidade e temperatura acaba se tornando mais flexível, originando uma redução do módulo de elasticidade.

O facto de não ter havido uma redução nos valores de MOR está relacionado com a resistência da resina contra humidade e degradação das partículas do painel. Além disso, os valores dos ensaios individuais de cada provete, como visto acima, possuem uma considerável variação decorrente do rompimento total da fibras em diferentes posições do provete. Nem todos os provetes de OSB4 romperam pelo centro, alguns atingiram a rotura pela ligação das diferentes fibras próximas do centro.

Tabela 16 - Comparação das propriedades mecânicas antes e após o envelhecimento do OSB4.

Painel	MOR [MPa]			MOE [MPa]		
	NAGED	AGED	Red. [%]	NAGED	AGED	Red. [%]
OSB4-NFR-0°	21,796	22,094	-	3,932	3,706	5,75
OSB4-NFR-90°	13,558	14,760	-	1,879	1,832	2,13

4.4 Conclusões

Os tipos de resina e a sua quantidade são de fundamental importância para a avaliação da durabilidade dos painéis de madeira. Os painéis de MDF e PB, segundo o fabricante, são para interiores secos e pode ter sido utilizado com resinas UF e MUF, porém a quantidade de ambas as resinas são desconhecidas, variando de 9-25% para os painéis de MDF e 8-10% para os painéis de PB. As perdas das propriedades mecânicas foram maiores nos painéis de PB devido a utilização reduzida de resina UF/MUF, diferente do ocorrido para os painéis de MDF.

Para os painéis OSB4, pode-se considerar que não houve perda de propriedades mecânicas após o envelhecimento devido a este tipo de painel ser utilizado para ambiente extremamente húmido por possuir a resina pMDI (diisocianato de polímero) cujo a principal característica é boa durabilidade. Quando difundido nas paredes celulares não fragmenta mecanicamente a estrutura, mantendo inalterada as propriedades físico-mecânicas.

Notavelmente, houve-se uma redução menor nas propriedades mecânicas do MDF-FR quando comparado ao MDF-ST-NFR, supostamente devido ao maior número de resina MUF e possuem uma alta compactação das fibras e o adesivo impregnado ocasiona uma maior superfície de contato, propiciando uma melhor durabilidade e protegendo as fibras de madeira. Enquanto que os painéis de PB-P2-FR apresentaram uma perda maior do que os painéis PB-P2-NFR, devido cristalização de pequenos sais na superfície e também migração dos sais para o interior do painel.

Todos os painéis obtiveram perdas das propriedades mecânicas, com exceção do OSB4. Os painéis também apresentaram uma redução no módulo de elasticidade após o

envelhecimento devido a uma maior deformação ocorrida por um suposto amolecimento da resina com as variações da humidade e temperatura.

Capítulo 5: Avaliação da durabilidade da reação ao fogo

5.1 Introdução

A reação ao fogo é caracterizada através do comportamento de um determinado material quando exposto a um cenário de incêndio. Para determinar as propriedades de reação ao fogo um dos testes mais usados é o realizado no calorímetro de cone. O calorímetro de cone avalia um conjunto de propriedades de reação ao fogo, expondo o material á ação de um fluxo de calor por radiação. Os resultados avaliados nesta pesquisa pode ser usado para melhorar as investigações ao utilizar produtos retardantes de chama nos painéis de madeira, pois os testes efetuados no calorímetro de cone pode ser muito próximo da realidade de um incêndio, [71].

Os painéis foram cortados e devidamente preparados para o envelhecimento acelerado de acordo com a ETAG 028:2012, [1] e a EN16755: 2017, [4]. Após o envelhecimento, as amostras foram cortadas nas devidas dimensões exigida pela ISO 5660, [3] e submetidas ao condicionamento atmosférico com o objetivo de atingir o equilíbrio higroscópico e posteriormente serem submetidas ao teste de reação ao fogo. O fluxograma representado na Figura 64 exemplifica como realizado os procedimentos.

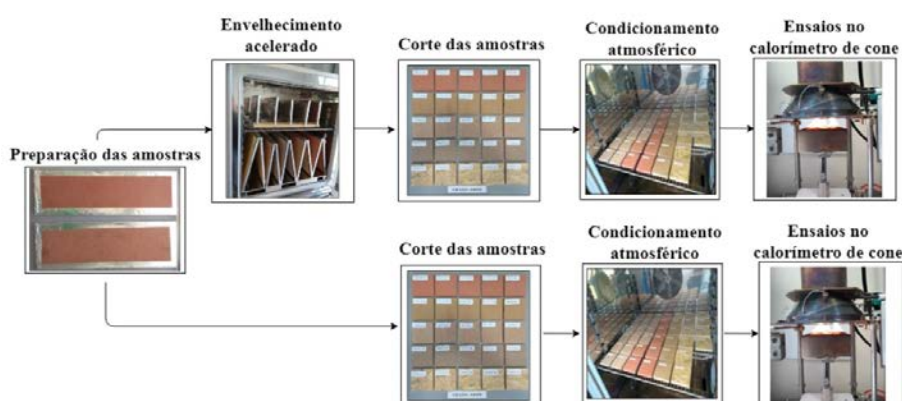


Figura 64 - Fluxograma representativo de realização dos procedimentos para o teste no calorímetro de cone.

A análise do desempenho da durabilidade dos painéis ignífugos após o envelhecimento foi realizada de acordo com a especificação da EN 16755:2017, [4], através de análises de taxa de libertação de calor e do calor total libertado. O conjunto de testes realizados no calorímetro de cone não pretende ser utilizado para a classificação inicial da classe de reação ao fogo, mas para a verificação ou manutenção da classe de reação ao fogo inicial devido ao seu desempenho da durabilidade, cujas condições são apresentadas na norma mencionada.

5.2 Procedimento experimental utilizado na avaliação da reação ao fogo

5.2.1 Envelhecimento artificial

As amostras foram submetidas ao envelhecimento climático nas mesmas condições climáticas de temperatura e de humidade dos provetes utilizados na caracterização mecânica. Para simular o efeito da exposição às condições climáticas numa única face, as amostras foram isoladas numa das faces com uma película de polietileno e depois com uma folha alumínio, de acordo com as especificações da ETAG 028, como mostra a Figura 65.

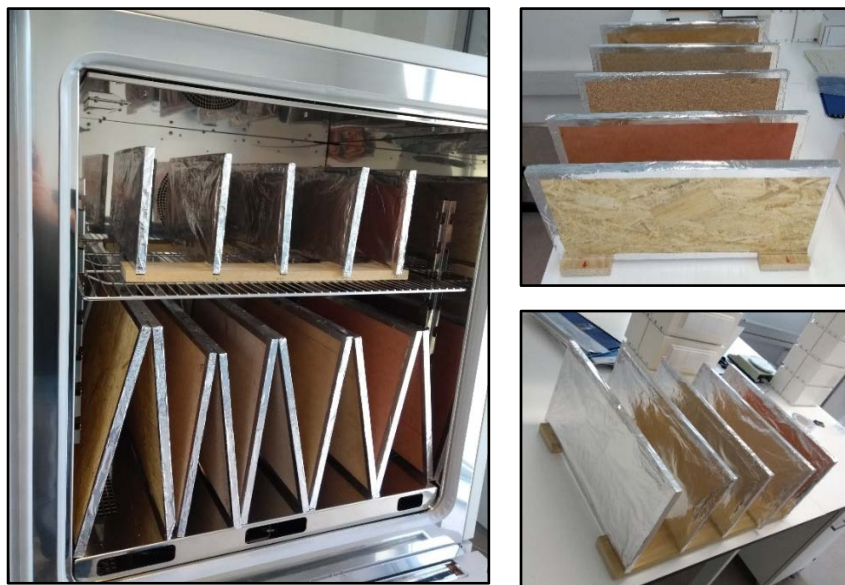


Figura 65 - Amostras submetidas ao envelhecimento climático: camara climática (esq.) e amostras devidamente preparadas (dir.).

5.2.2 Avaliação da reação ao fogo

O equipamento de avaliação da reação ao fogo designado de calorímetro de cone, ou na sua versão mais simples calorímetro de perda de massa, permite a obtenção do comportamento ao fogo dos materiais quando expostos a um fluxo de calor de radiação constante. No decurso dos testes é possível determinar-se a taxa e a perda de massa da amostra, a taxa de libertação de calor, o calor total libertado entre outras propriedades de reação ao fogo. A Figura 66 representa a indicação dos principais componentes do equipamento e do sistema de controlo: (1) termopilha com calibração por meio de três termopares, (2) resistência elétrica cónica, (3) sistema de suporte do medidor de fluxo de calor, (4) suporte das amostras, (5) sistema de ignição 6) célula de carga. A unidade de controlo é composta por: (7) interruptores de ignição, (8) controlador da célula de carga e (9) controlador de temperatura.

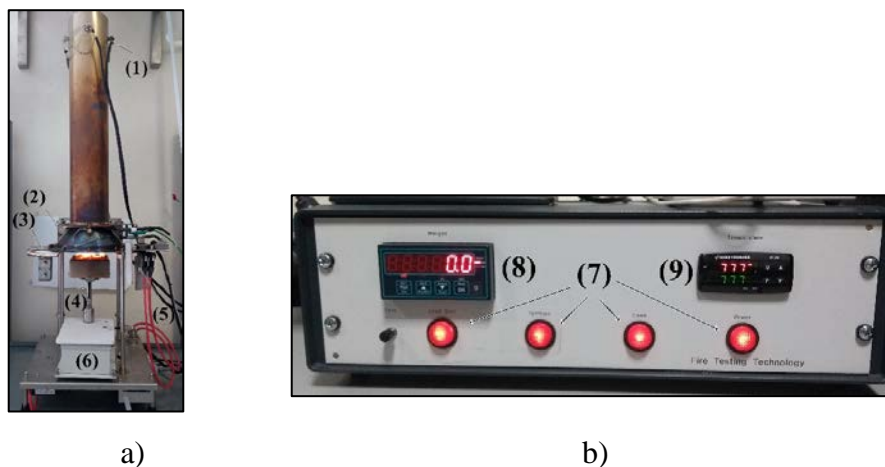


Figura 66 - Calorímetro de perda de massa: a) Principais componentes da máquina, b) painel eletrônico de controle.

5.2.2.1 Calibração do equipamento

Para realizar a aquisição dos dados de evolução de massa, foi utilizada a célula de carga com precisão de 0,1 g e tempo de resposta de 1 segundo e capacidade máxima de 200 gramas. Antes do início de cada teste, procedia-se à calibração da mesma.

A ETAG:028 juntamente com a EN16755:2017 estabelece que o fluxo de calor utilizado para a avaliação de desempenho da reação ao fogo de produtos de construção, excluindo pavimentos, deve ser de 50 [kW/m²]. Para isso, a temperatura da resistência cônica foi ajustada para produzir o fluxo de calor pretendido e medido pelo sensor de fluxo de calor posicionado a uma distância de 25 [mm] da base de cone. A Figura 67 representa o painel com a temperatura utilizada nos testes e o medidor do fluxo de calor.

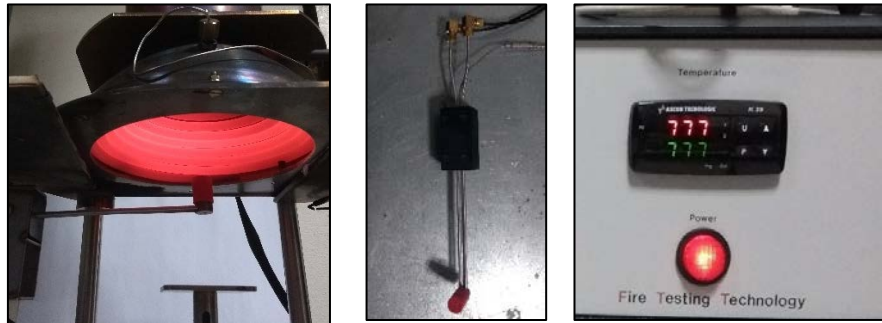


Figura 67 - Temperatura utilizada nos testes e medidor do fluxo de calor.

A medição da taxa de libertação de calor, através do sinal de medição da termopilha requer a calibração prévia da mesma. Esta calibração é realizada para o fluxo de calor e para a distância à base do cone pretendida, com um queimador (Figura 68), através de várias medições e caudais de gás metano em combustão, apresentados na Tabela 17, gerando uma reta de calibração.

Tabela 17 - Fluxo de calor e caudal de gás utilizado na calibração.

Etapa	Fluxo de calor [kW/m ²]	Caudal de metano [l/min]
1	5	8,38
2	4	6,70
3	3	5,03
4	2	3,35
5	1	1,68
6	0,75	1,26
7	0,5	0,83
8	0,25	0,42

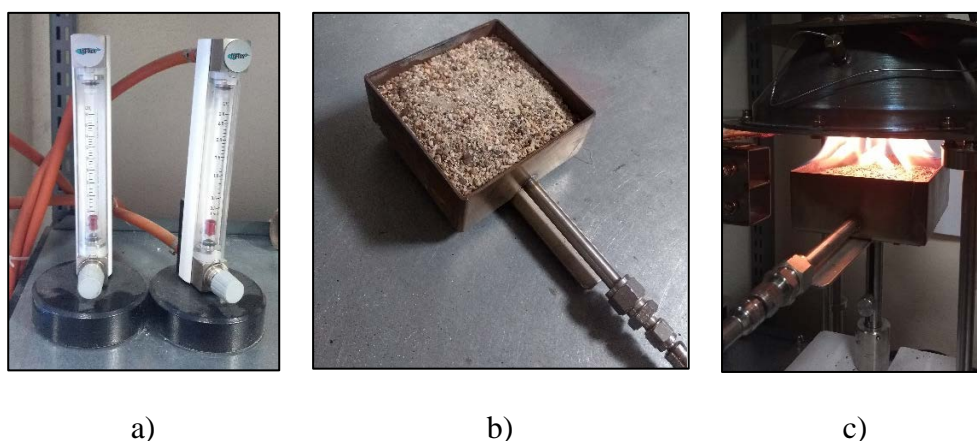


Figura 68 - Procedimentos para calibrar a taxa de libertação de calor: a) regulador do caudal de gás, b) queimador e c) execução do procedimento.

5.2.2.2 Execução dos testes

Os ensaios começam pela calibração da célula de carga cujo suporte é colocado vazio sobre a balança para “zerar” as medições e posterior colocação da amostra para teste. Depois de atingir e estabilizar a temperatura de 777 [°c], correspondente ao fluxo, são introduzidas as informações relativas à amostra, como a massa inicial e a sua espessura, entre outras informações que possam ser relevantes à caracterização da mesma.

O início dos testes é antecedido por um período de equilíbrio do sistema de 60 [s], seguido da colocação da amostra no porta amostras sobre a célula de carga. Logo após o início do teste é colocado o ignitor sobre a amostra para que potencie a ignição dos gases voláteis libertados, como se pode ver na Figura 69.

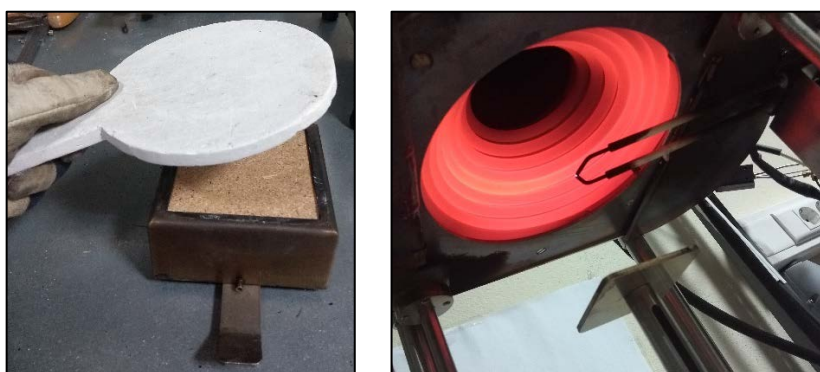


Figura 69 - Placa de gesso utilizada para proteger a superfície da amostra (esq.) e ignitor elétrico (dir.).

5.2.2.3 Caracterização das amostras

Os provetes foram obtidos através dos painéis fornecidos pela empresa Sonae Arauco, e cortados com dimensões de 100x100 [mm], conforme as recomendações da ISO5660-1, [3]. O número total de provetes testados para cada tipo de painel e condição climática está disposto na Tabela 18. A tabela apresenta ainda a classificação de reação ao fogo apresentada na ficha técnica de cada painel.

Tabela 18 - Designação e número de amostras.

Painel	Reação ao fogo inicial	Nº amostras	
		Não Envelhecida NAGED	Envelhecida AGED
MDF-FR	B-s2, d0	5	5
MDF-ST-NFR	D-s2, d0	5	5
PB-P2-FR	B-s1, d0	5	5
PB-P2-NFR	D-s2, d0	5	5
OSB4-NFR	D-s2, d0	5	5

As amostras envelhecidas (AGED) e não envelhecidas (NAGED) foram cortadas de acordo com as especificações exigidas pela norma ISO 5660 e submetidas ao condicionamento para o equilíbrio higroscópico em um ambiente com a temperatura de (23 ± 2) [°c] e humidade relativa de (50 ± 5) % de até atingir o equilíbrio mássico. O conceito de massa constante é atingido quando duas pesagens sucessivas em um intervalo de 24 horas não difere em 0,1% da massa da amostra. A Figura 70 representa como foi realizado o condicionamento.



Figura 70 - Condicionamento climático das amostras.

Após o pico da taxa de libertação de calor (HRR) a camada física protetora decorrente da combustão superficial limita a transferência de matéria como gases voláteis e oxigênio, como resultado, a quantidade de fases de decomposição produzido é significativamente diminuída, fazendo com que menor quantidade de calor seja libertada, [63].

Apenas uma pequena parte da amostra que não foi exposta ao fogo, localizada na parte oposta à face ao qual foi submetido o teste, apresenta um aumento na taxa de HRR devido a uma rápida decomposição da resina, [64].

Os painéis não envelhecidos MDF-NFR apresentam um valor inferior do calor total libertado em relação aos envelhecidos, como disposto na Figura 72. A média de HRR_{30s} apresentou valores de 94,094 [kW/m²] para as amostras não envelhecidas e 120,916 [kW/m²] para as envelhecidas. O calor total libertado (THR) é de 56,874 e 67,754 [MJ/m²] para as amostras não envelhecidas e envelhecidas, respetivamente. Em termos de massa residual, observou-se uma queda de 1 para 0,3 nos painéis não envelhecidos, enquanto que para os painéis envelhecidos essa perda foi de 1 para aproximadamente 0,35, ou seja, as amostras do painéis não envelhecidos obtiveram um valor médio de perda de massa menor do que os envelhecidos.

Nas amostras envelhecidas verificou-se que após a superfície exposta à radiação carbonizar, libertou mais calor pois a camada densa do MDF pode ter agido como uma barreira impedindo que os gases de combustão fossem libertados numa fase inicial, mas com o aparecimento de fendas decorrentes da carbonização, os gases saíram e houve um aumento significativo da chama. Este fenómeno não foi notado nas amostras envelhecidas, pois a variação da humidade e temperatura imposta com o processo de envelhecimento pode ter fragilizado a camada superior do MDF e originando uma dispersão da resina, deixando-a mais uniforme fazendo com que libertasse o calor mais uniformemente.

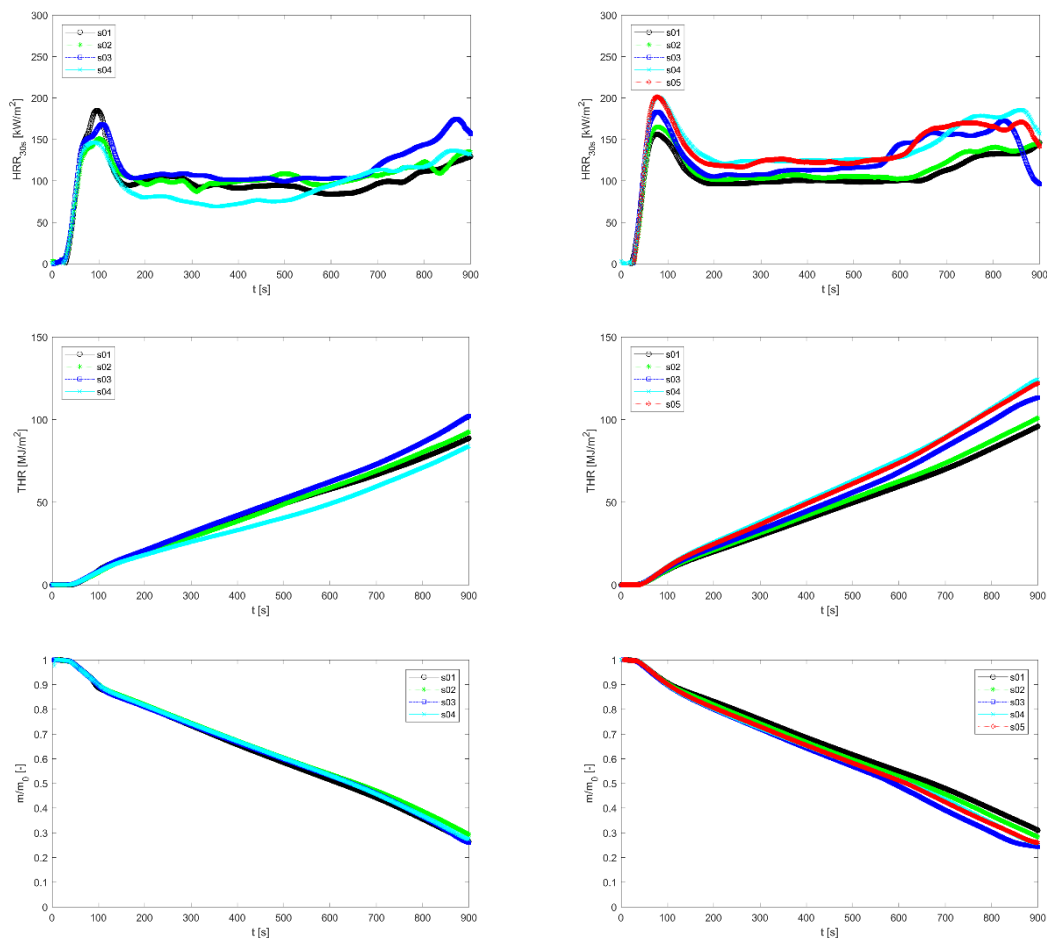


Figura 72 - Reação ao fogo dos painéis de MDF sem retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).

Os painéis de MDF-FR apresentaram uma excelente capacidade de reação ao fogo. A baixa taxa de libertação de calor deve-se ao fato dos painéis não entrarem em ignição devido a um melhoramento nas propriedades da resina ignífuga. Além disso, a comparação das amostras envelhecidas e não envelhecidas, mostra que a taxa de libertação de calor foi praticamente a mesma, mostrando um comportamento equivalente mesmo após o processo de envelhecimento climático para ambientes húmidos, apesar de ser um painel com características e aplicações para ambientes secos (ver Figura 73). A perda de massa foi praticamente a mesma entre as amostras envelhecidas e não envelhecidas, e diferente que diferente dos outros tipos de painéis de madeira, apresentou uma queda muito baixa na massa residual devido a não combustibilidade das amostras. A massa residual foi de aproximadamente 1 para 0,55 para as amostras envelhecidas e não envelhecidas.

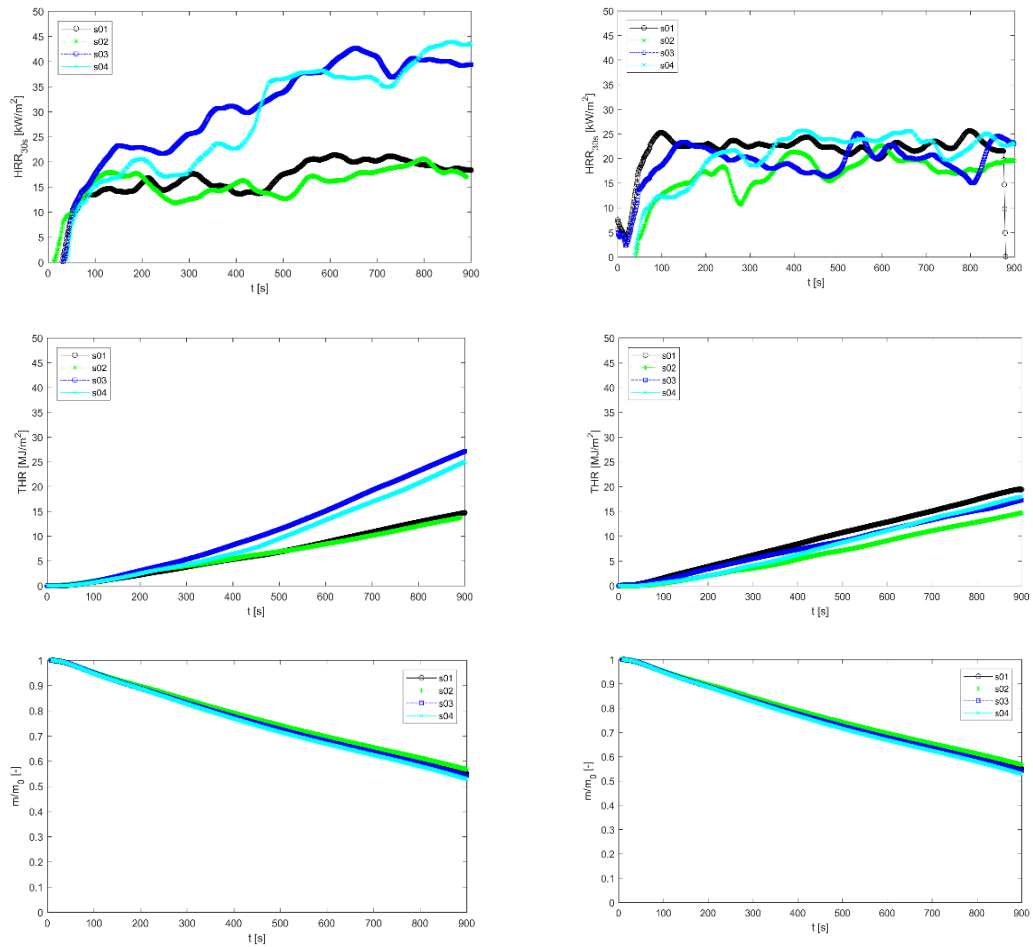


Figura 73 - Reação ao fogo dos painéis de MDF com retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).

Os painéis de MDF-FR em termos de durabilidade mantiveram o seu comportamento de reação ao fogo conforme ilustra a Tabela 19. A taxa de libertação de calor foi inferior a 150 [kW/m²] e não houve um aumento da taxa de libertação de calor após a exposição ao envelhecimento acelerado.

Tabela 19 - Resultados dos testes de reação ao fogo dos painéis de MDF.

Amostra	MDF-ST-NFR				MDF-FR			
	NAGED		AGED		NAGED		AGED	
	HRR_{30s} [kW/m ²]	THR_{600s} [MJ/m ²]	HRR_{30s} [kW/m ²]	THR_{600s} [MJ/m ²]	HRR_{30s} [kW/m ²]	THR_{600s} [MJ/m ²]	HRR_{30s} [kW/m ²]	THR_{600s} [MJ/m ²]
S01	83,77	57,76	100,49	59,48	21,11	8,75	20,19	12,83
S02	95,69	58,56	102,39	62,49	16,16	8,41	22,61	9,07
S03	102,66	62,18	143,72	68,00	39,08	15,04	23,87	11,05
S04	94,25	48,91	128,08	75,25	37,45	13,21	17,96	9,38
S05	-	-	129,87	73,53	-	-	-	-
Média	94,09	56,85	120,91	67,75	28,45	11,35	21,16	10,58

Os painéis de aglomerado de partículas sem retardante de chama PB-P2-NFR apresentaram um aumento das propriedades de reação ao fogo após o envelhecimento climático. Verificou-se um aumento do tempo de ignição de 32,20 [s] para 41,75, [s] para os painéis não envelhecidos e envelhecidos, respetivamente.

No que diz respeito a taxa de libertação de calor (HRR), os painéis de aglomerados sem retardante não envelhecidos apresentaram uma taxa média de 111,55 [kW/m²] enquanto que a taxa média para os testes após o envelhecimento foi de 75,03 [kW/m²]. Representa uma melhoria nas propriedades de reação ao fogo, libertando em média menos 32,74% de calor em comparação às amostras não envelhecidas. Consequentemente, o calor total libertado (THR) apresentou uma melhoria de 27,86%, evidenciando que, após o envelhecimento as propriedades de reação ao fogo, ao que nestas duas características se refere, foram melhoradas.

A perda de massa foram praticamente as mesmas durante o teste para os painéis envelhecidos e não envelhecidos, isto é, a massa residual para as amostras de PB passaram de 1 para 0,25 para ambas as situações. A Figura 74 representa os gráficos dos ensaios de reação ao fogo dos painéis de PB-P2 sem retardante de chamas.

Os painéis de madeira sem retardante de chamas são classificados na classe de reação ao fogo inicial de D-s2,d0, segundo a norma Europeia Harmonizada EN13986, [72], como apresentado na Tabela 3.

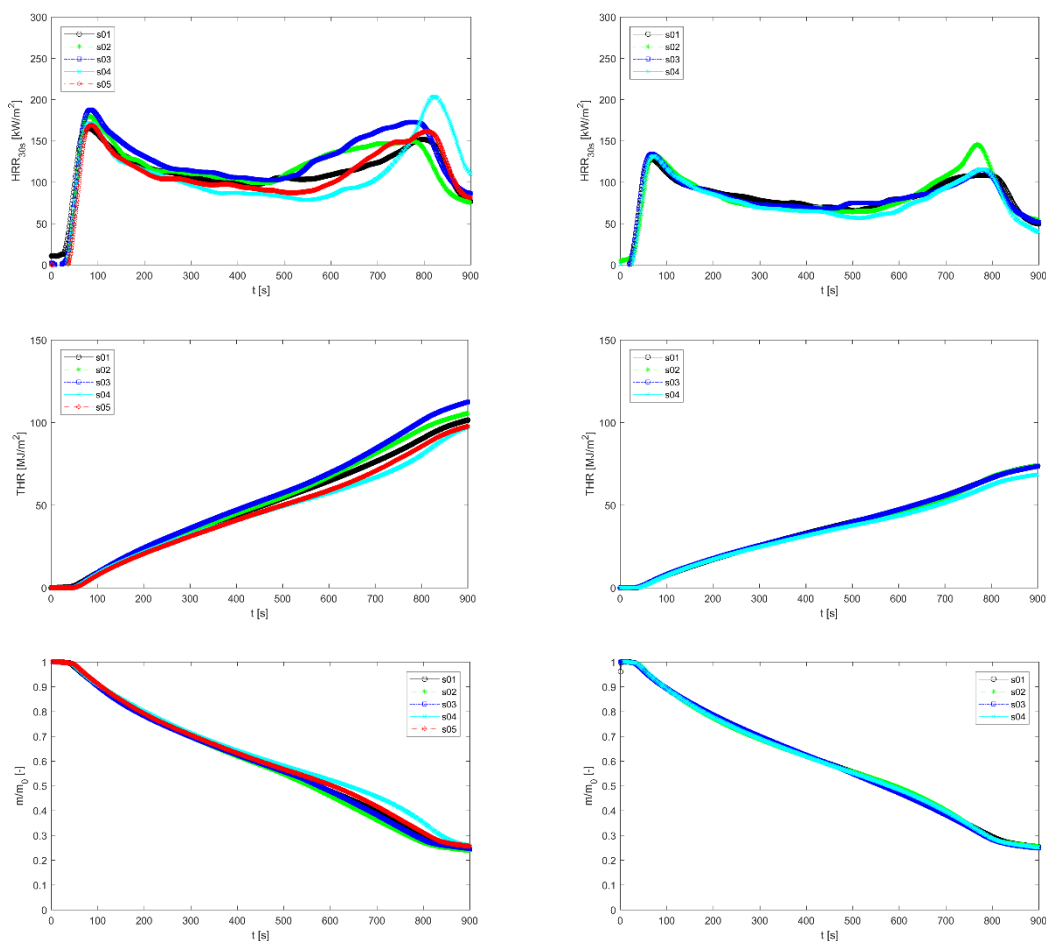


Figura 74 - Reação ao fogo dos painéis de PB sem retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).

Os painéis de aglomerados com retardante de chama PB-P2-FR apresentaram uma melhorias nas propriedades de reação ao fogo, supostamente ocasionada pela cristalização de sais na superfície do painel, como mostra a Figura 75.

O tempo de ignição aumentou de 38 para 42,2[s] e este atraso pode ser ocasionado pela decomposição do retardante de chama após os ciclos de humidade e temperatura, dando origem à formação de H₂O, CO₂ e NH₃, sendo a mistura de gases combustíveis diluída, limitando a concentração de reagentes e consequentemente a ignição, [63].

A HRR dos painéis de aglomerados com retardante de chama não envelhecidos foi, em média 108,18 [kW/m²] e dos envelhecidos 93,22 [kW/m²], apresentando uma redução de 13,83%. Para a THR este aumento de desempenho ao fogo foi de 16,5%. A massa residual

nos painéis de PB-FR passou de 1 para aproximadamente 0,4 nas amostras envelhecidas e não envelhecidas.

Os painéis PB com retardantes de chamas, PB-P2-FR não apresentaram perda nas propriedades de reação ao fogo de acordo com a EN16755, [4], pois a taxa de libertação HRR foi inferior a 150 [kW/m²] e não houve um aumento do calor total libertado das amostras após a exposição às condições de envelhecimento.

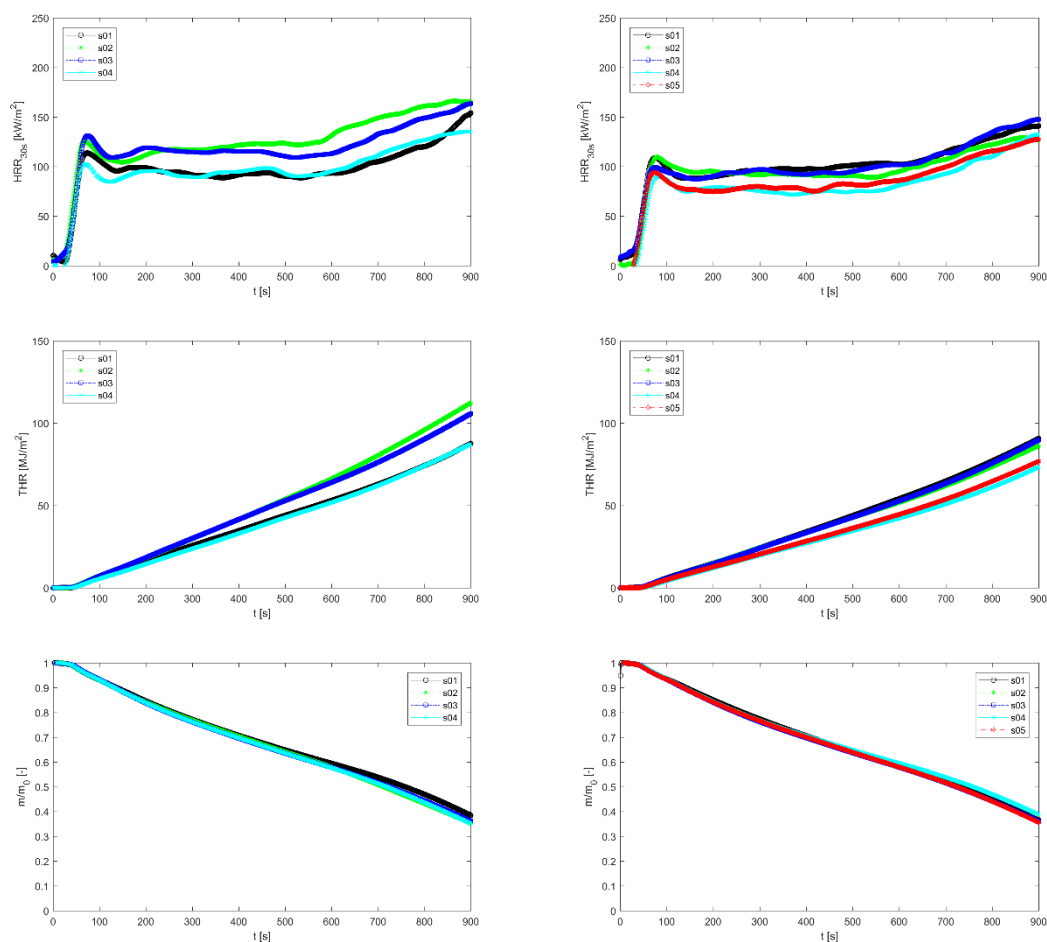


Figura 75 - Reação ao fogo dos painéis de PB com retardante de chamas: sem envelhecimento (esq.) e com envelhecimento (dir.).

Os PB-P2-NFR apresentou uma taxa de libertação de calor quase que uniforme entre 300 e 600 [s], ocasionando posteriormente um aumento atingindo seu máximo por volta de 800 [s], enquanto que os painéis de aglomerados ignífugos apresentam uma taxa de libertação de calor quase que constante até os 600 [s]. Após este tempo, a taxa de libertação de calor vai aumentando quase que linearmente atingindo um valor máximo aos 900 [s]. Este

atraso da libertação de calor é uma característica intrínseca dos retardantes de chamas, pois este atraso pode evitar o alastramento de chamas num compartimento de incêndio.

Tabela 20 - Valores dos testes de reação ao fogo dos painéis de aglomerados (PB).

Amostra	PB-P2-NFR				PB-P2-FR			
	NAGED		AGED		NAGED		AGED	
	<i>HRR</i> _{30s} [kW/m ²]	<i>THR</i> _{600s} [MJ/m ²]	<i>HRR</i> _{30s} [kW/m ²]	<i>THR</i> _{600s} [MJ/m ²]	<i>HRR</i> _{30s} [kW/m ²]	<i>THR</i> _{600s} [MJ/m ²]	<i>HRR</i> _{30s} [kW/m ²]	<i>THR</i> _{600s} [MJ/m ²]
S01	108,59	64,51	79,46	46,93	93,49	52,98	102,23	54,02
S02	134,58	67,04	75,33	45,18	131,00	66,15	95,05	51,72
S03	132,39	69,08	79,54	47,20	113,01	63,93	101,71	52,67
S04	83,83	57,26	65,80	43,51	95,22	51,75	81,11	42,15
S05	98,36	58,89	-	-	-	-	86,02	44,53
Média	111,55	63,36	75,03	45,71	108,18	58,70	93,22	49,02

Os testes realizados aos painéis OSB4 sem retardantes de chama, OSB4-NFR, e expostos ao envelhecimento acelerado, apresentaram uma redução da taxa de libertação de calor e consequentemente na libertação de calor total e o tempo de ignição da chama em comparação com os painéis não envelhecidos.

O valor médio de HRR foi de 184,40 para 122,82 [kw/m²], para as amostras não envelhecidas e envelhecidas, respetivamente. Apresentando uma redução na taxa de libertação de calor de 33,4 %, e uma diminuição da taxa de libertação de de 37,04 %. A exposição à ação da temperatura e humidade não originou uma diferença significativa do valor de massa residual após exposição à radiação térmica, verificando-se um valor médio de massa residual aos 900 [s] nos painéis envelhecidos e não envelhecidos, respectivamente. A Figura 76 ilustra os testes de reação ao fogo e a Tabela 21 expõe os valores individuais e médios dos testes. Em termos de massa residual, os valores observados para as amostras antes e após o envelhecimento foram de 1 para aproximadamente 0,2.

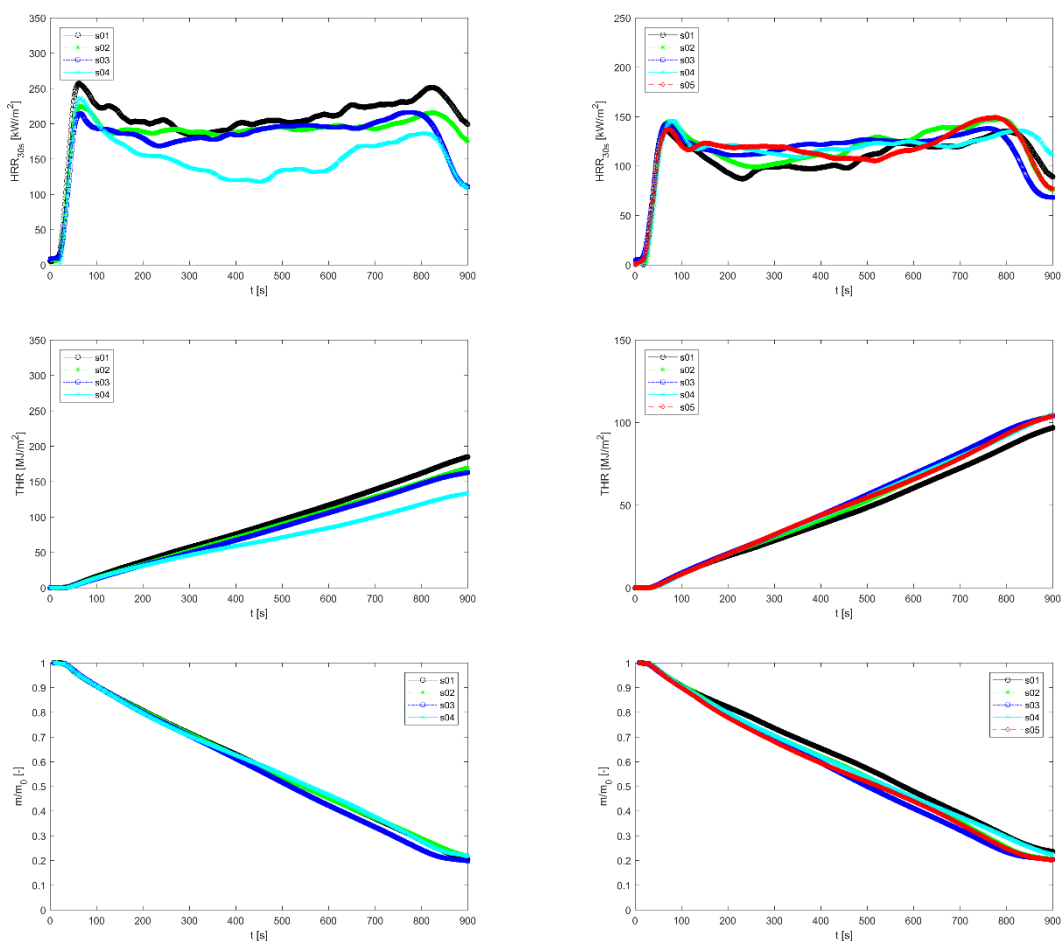


Figura 76 - Reação ao fogo dos painéis de OSB4 sem retardante de chama: não envelhecido (esq.) e com envelhecimento (dir.).

Tabela 21 - Valores dos testes de reação ao fogo do OSB4.

Amostra	OSB4-NFR			
	NAGED		AGED	
	HRR_{30s}	THR_{600s}	HRR_{30s}	THR_{600s}
S01	212,14	116,42	121,78	60,28
S02	195,48	108,93	127,29	65,29
S03	195,49	105,60	124,15	68,70
S04	134,48	84,35	124,41	67,01
S05	-	-	116,44	65,59
Média	184,40	103,82	122,82	65,37

A Figura 77 mostra as amostras utilizadas para a realização dos ensaios no calorímetro de cone, antes e após os ensaios.

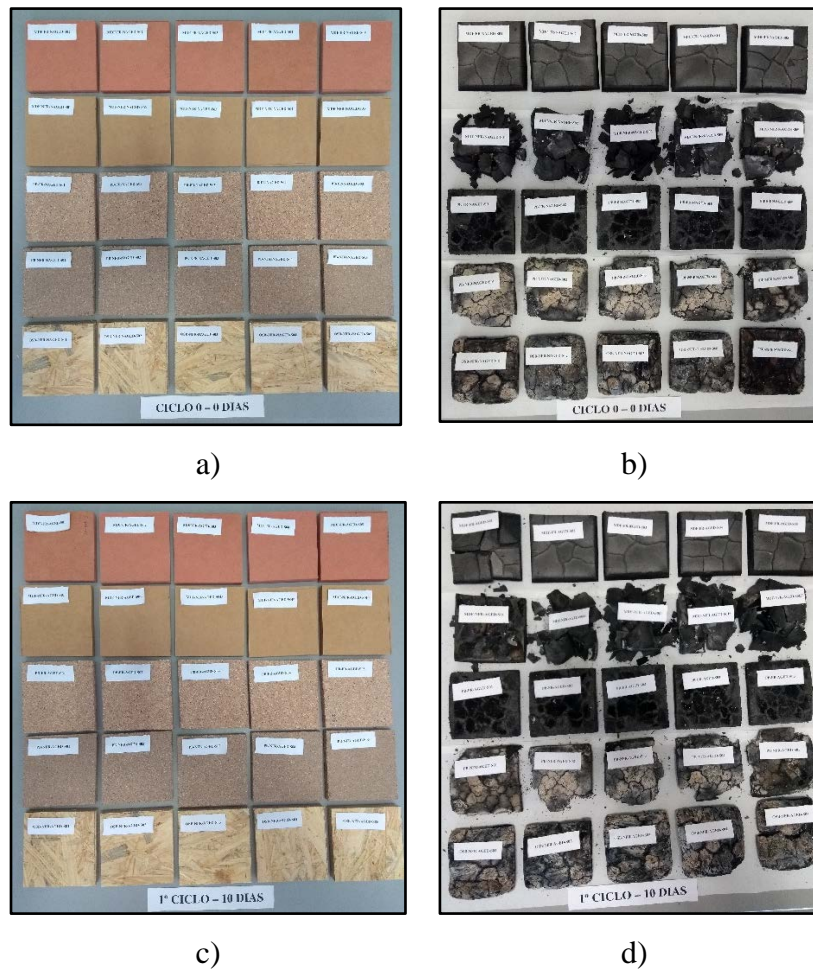


Figura 77 - Amostras antes e após o teste: amostras não envelhecidas (a e b) e amostras envelhecidas (c e d).

A Figura 78 mostra o tempo médio de ignição de todos os tipos de painéis ensaiados, comparando antes e após o envelhecimento.

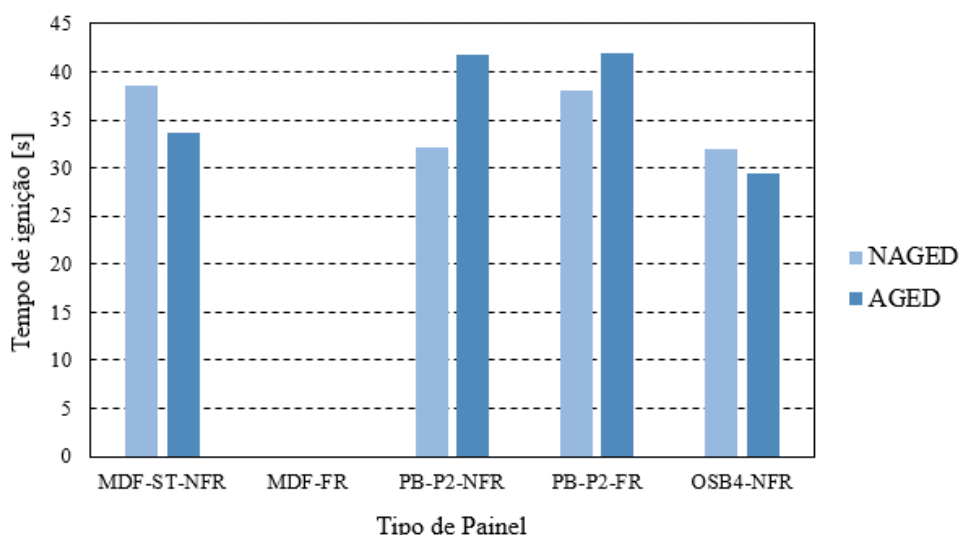


Figura 78 - Comparação do tempo de ignição entre os painéis envelhecidos e não envelhecidos.

Para os painéis aglomerados PB-P2-FR o atraso para o tempo de ignição nos painéis envelhecidos pode ser explicado pela decomposição do retardante de chama (partículas sólidas), após os ciclos de humidade de temperatura, levando à diluição em parte dos sais ignífugos, limitando a concentração de reagentes e atrasando o tempo de ignição. Para os aglomerados sem retardante de chamas, o atraso no tempo de ignição também foi observado.

O MDF apresenta claramente um produto com retardante de chamas melhorado, [73], e conseqüentemente muito bem concentrado com resinas ignífugas, que possivelmente foi utilizado na forma líquida durante a sua fabricação, [47]. Devido a isto, não ocorreu a ignição na superfície das amostras, mesmo após o envelhecimento climático. No MDF-ST-NFR não se verificou a existência de ignição.

No painel de OSB4, o tempo de ignição das amostras após o envelhecimento artificial diminuiu em comparação com as não envelhecidas. A utilização da resina pMDI e a sua degradação ao longo dos ciclos de envelhecimento, através da libertação de gases voláteis, pode ter diminuído a libertação de gases combustíveis aquando da sua exposição à radiação térmica.

5.4 Conclusões

A produção de fumaça foi notavelmente reduzida nos produtos contendo retardante de chama, MDF e PB se comparado aos painéis sem retardantes de chamas.

Os painéis, com exceção do MDF-ST-NFR apresentaram uma melhoria nas propriedades de reação ao fogo após a exposição climática, principalmente no calor total libertado, enquanto que o comportamento ao fogo dos painéis do MDF standard foi influenciado pelo processo de envelhecimento, verificando-se um aumento da taxa de libertação de calor e do calor total libertado.

A perda de massa foi maior para painéis não protegidos com a resina ignífuga. O painel de MDF-ST-NFR apresentou uma queda de cerca de 70% em massa, enquanto que para o MDF-FR esta queda foi de 45%. Para o painel de PB-NFR a perda de massa foi de 75% enquanto que no PB-FR foi de 60%.

No que diz respeito à avaliação de desempenho da durabilidade dos painéis com retardante de chamas, PB e MDF, o desempenho ao fogo foi mantido nestes painéis após o envelhecimento climático realizado através da ETAG028:2012 e das condições de avaliação de desempenho definidas pela EN16755:2017. Daqui resulta que os painéis ignífugos testados podem continuar a ser classificados de acordo com a sua classificação de reação ao fogo inicial, mesmo após a exposição climática do tipo Z1 utilizados em ambientes com alta humidade.

Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões gerais

Este trabalho consistiu em analisar a durabilidade das propriedades mecânicas e de reação ao fogo dos painéis de madeira.

As análises foram realizadas de acordo com um envelhecimento climático artificial dos painéis, de acordo com a ETAG028:2012, avaliando as propriedades mecânicas de acordo com o teste de flexão em três pontos realizado de acordo com a EN310:1993, aplicável para painéis de derivados de madeira. Foram comparadas para as amostras envelhecidas e não envelhecidas a força máxima, tensão máxima de flexão e módulo de elasticidade.

No que diz respeito à durabilidade da avaliação de desempenho de reação ao fogo, os ensaios foram efetuados segundo a ISO5660:2002 utilizando o calorímetro de perda de massa para determinar e comparar a taxa de libertação de calor, o calor total libertado, o valor de massa residual e o tempo de ignição entre as amostras sem e com envelhecimento. É ainda apresentação a classificação da reação ao fogo após exposição climática, segundo a EN16755:2017, e a sua comparação com a classificação de reação ao fogo inicial.

As resinas utilizadas na produção dos painéis de madeira para ambientes internos e aplicações secas são do tipo UF/MUF e podem ser utilizados em diversas concentrações. Quando maior a concentração de MUF, mais resistente à humidade é o painel e consequentemente melhor será a durabilidade das propriedades mecânicas, porém como os painéis cedidos são utilizados em ambientes secos e pelo preço da resina de MUF ser elevada acredita-se que a concentração deste tipo de resina foi bem limitado. Enquanto que os painéis de OSB4 foram produzidos com uma resina do tipo pMDI que concede ótima durabilidade e boa resistência à humidade.

Os painéis de aglomerados de partículas sem retardante de chamas apresentaram uma queda nos valores da resistência à flexão [MOR] de 15,7% em relação aos painéis envelhecidos a 0°, e de 11,3% nos painéis orientados a 90°, além disso, pode-se observar um pequeno aumento na deformação e deslocamento vertical (dv) dos provetes.

Para os painéis aglomerados com retardante de chamas a 0°, observou-se uma queda de 16,7% na resistência à flexão entre os painéis envelhecidos e não envelhecidos e 12,2% para os painéis a 90° de orientação. Verifica-se uma maior perda da capacidade resistente nos painéis com retardante de chamas em comparação com os painéis sem retardantes. Observou-se também uma maior deformação nos provetes com retardante de chamas em relação aos provetes não ignífugos.

Os painéis de MDF sem retardante de chamas apresentaram valores médios de tensão de resistente de 32,00 [MPa] para os painéis não envelhecidos e de 28,86 [MPa] para os painéis envelhecidos, a que corresponde uma perda de 12,8% nas propriedades mecânicas. Esta situação deve-se principalmente à resina de ureia-formaldeído utilizada na produção dos painéis de MDF que se apresenta mais suscetível à ação da humidade em tempos de exposição mais curtos, [70].

Os painéis de MDF-NFR possuem valores superiores de MOR em relação ao MDF-FR, prevendo-se que a adição do produto ignífugo na produção dos painéis de MDF provoca uma deterioração das propriedades físicas e mecânicas, [74]. No entanto esta redução não é muito significativa, verificando-se uma redução de 6,04% da resistência do MDF ignífugo por comparação o não ignífugo.

As amostras dos painéis OSB-NFR-0° apresentam uma resistência de 37,53% superior às obtidas a 90° (OSB-NFR-90°), sendo expectável devido à orientação das fibras. No entanto, verificou-se um ligeiro acréscimo da resistência mecânica das amostras envelhecidas em comparação com as não envelhecidas, existindo neste caso um aumento do desvio padrão. Já em relação ao módulo de elasticidade os resultados apresentam uma diminuição de 4,3% a 0°. Ambas as situações ocorrem devido à alteração do comportamento mecânico da resina com a presença da humidade, ficando mais maleável e com uma elasticidade superior, conforme já concluído por Stöckel, [54].

No que diz respeito à durabilidade da reação ao fogo dos painéis de derivados de madeira, todos os painéis, com exceção do MDF-NFR, obtiveram uma melhoria da taxa de libertação de calor e do calor total libertado após o envelhecimento climático.

O ciclo de envelhecimento aplicado aos painéis de PB-NFR influenciou significativamente o calor total libertado (THR) até os 600 segundos de exposição, apresentando valores médios de 45.71 [MJ/m²], para os painéis envelhecidos e 63.36 [MJ/m²], para os não envelhecidos. Foi observada uma diminuição do THR, entre painéis não envelhecidos e envelhecidos, de 27,8% e 16,5% para os produtos sem retardante de chamas e com retardante de chamas, respetivamente.

A exposição aos ciclos de temperatura e humidade, origina alterações do comportamento da resina ureia-formaldeído, através da libertação de compostos voláteis, baixando a sua contribuição para a combustão do painel. O tempo de ignição do PB-NFR-NAGED foi de 32.2 [s] e do PB-NFR-AGED foi de 41.75 [s].

Nas amostras de MDF-NFR o THR passou de 56.87 para 67.75 [MJ/m²] após envelhecimento, enquanto que o tempo de ignição diminuiu de 38,5 para 33,5 [s] nos painéis envelhecidos. No caso dos painéis MDF ignífugos, não houve ignição e o THR foi menor nas amostras envelhecidas, à semelhança dos painéis PB, passando de 11.35 para 11.03 [MJ/m²].

O comportamento observado nos painéis OSB-NFR foi semelhante ao PB-NFR, em que o THR diminuiu após o envelhecimento das amostras, libertando menos calor. O tempo de ignição também diminuiu em relação às amostras não envelhecidas, passando de 32 a 29.4 [s].

Os painéis com produtos ignífugos apresentaram baixa emissão de fumo e mantiveram boa parte da sua forma original após os testes, não libertando partículas. Além disso, em termos de verificação da durabilidade da reação ao fogo dos produtos ignífugos após o envelhecimento artificial, os painéis de MDF-FR e PB-P2-FR mantiveram-se dentro da classe B de reação ao fogo, atendendo aos requisitos da EN16755:2017 e verificando-se que uma taxa de libertação de calor menor do que 150 [kW/m²] e uma redução do calor total libertado após o envelhecimento das amostras.

6.2 Linhas futuras de investigação

O estudo da avaliação do desempenho da durabilidade das propriedades mecânicas e de reação ao fogo dos painéis ignífugos ainda é novo. Em, 2017 foi publicada a norma europeia EN16755, [4], com o objetivo de avaliar o desempenho de reação ao fogo após exposição aos diferentes tipos de envelhecimento artificial em produtos de madeira e derivados de madeira contendo retardantes de chamas. Embora a norma EN13986, [72], especifique como necessária a durabilidade por resistência à humidade, a durabilidade por ataque de organismos biológicos e durabilidade mecânica, não apresenta uma metodologia de envelhecimento acelerado nem de avaliação de desempenho da resistência mecânica após envelhecimento. É necessário um procedimento de análise da durabilidade das propriedades mecânicas em painéis de madeira com produtos ignífugos.

A EN16755, [4], busca avaliar se as propriedades de reação ao fogo são mantidas após o envelhecimento climático. Esta só assume necessária a análise de durabilidade das propriedades de reação ao fogo dos painéis ignífugo expostos a ambientes exteriores, tornando-se necessária a investigação igualmente para aplicações em ambientes internos secos e húmidos e aplicações externas, denominados de INT1 e INT2 e EXT respetivamente.

Assim, propõem-se os seguintes tópicos de investigação:

Avaliar a durabilidade da reação ao fogo dos painéis de madeira ignífugo utilizadas em ambientes secos e húmidos utilizando o ciclo do tipo Z1 da ETAG 028:2012, destinados a painéis de madeira em ambiente com altos teores de humidade para avaliar a reação ao fogo dos painéis antes e após o envelhecimento, e discutir o que acontece com a classe de reação ao fogo.

Comparar a influência de diferentes ciclos de envelhecimento artificial nas propriedades de reação ao fogo dos painéis ignífugos, utilizando ciclos de envelhecimento artificial em painéis para ambientes internos e externos, porém submetidos à condições externas, através do ciclo do tipo X da ETAG 028, expondo os painéis a radiação U.V e chuva.

É necessário avaliar a durabilidade das propriedades mecânicas de painéis de madeira com e sem retardante de chamas, com aplicação do verniz ignífugo apenas na parte exterior

dos painéis não ignífugos afim de avaliar a durabilidade após o ciclos de envelhecimento climático nas propriedades mecânicas e de reação ao fogo.

Seria importante avaliar a durabilidade das propriedades mecânicas de painéis de madeira ignífugos para ambientes internos e externos, utilizando a ETAG 028:2012 para efetuar os ciclos de envelhecimento dos tipos X, Y e Z1. Para a caracterização mecânica, utilizar teste de flexão em três pontos, tração/compressão e de adesão interna. Comparar as possíveis perdas nas propriedades mecânicas entre os tipos de envelhecimentos para diferentes tipos de painéis ignífugos e diferentes aplicações.

Avaliar e comparar as propriedades mecânicas e de avaliação desempenho da reação ao fogo dos painéis ignífugos utilizando envelhecimento natural e artificial.

Referências

- [1] ETAG 028 - Guide for european technical approval of fire retardante products, “Guideline for Fire retardant products,” no. December 1988, pp. 1–35, 2012.
- [2] BS EN 310:1993, “Wood-based panels — Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength,” 1993.
- [3] ISO 5660-1:2002, “Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate —Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method),” *International standard*, vol. 2002, pp. 1–8, 2003.
- [4] “EN 16755-Durability of reaction to fire performance - Classes of fire- retardant treated wood products in interior and exterior end use applications,” *October*. pp. 1–133, 2017.
- [5] European commission, “Roadmap for moving to a low-carbon economy in 2050,” *DG Climate Action portal*, pp. 1–2, 2011.
- [6] M. H. Ramage *et al.*, “The wood from the trees: The use of timber in construction,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. September 2016, pp. 333–359, 2017
- [7] The Timber Industry, “Growing our Low-Carbon Economy.”, 2014. Disponível em: <<http://www.forestryscotland.com/media/298951/growing%20our%20low-carbon%20economy.pdf>>. Acesso em 15-Dez-2017.
- [8] Sonae Arauco. “Produtos para construção e mobiliário,” 2017. [Online]. Disponível em : <https://www.sonaearauco.com/pt/produtos-para-construcao-e-mobiliario-mdf/mdf-fr-ignifugo_590-518.html?t=1>. Acesso em 02-Fev-2018.
- [9] Godoi, S. "Empresa do Japão planeja a construção do maior arranha-céu de madeira do mundo", coisas do japão, 2018. Disponível em: <<https://www.coisasdojapao.com/2018/02/empresa-do-japao-planeja-a-construcao-do-maior-arranha-ceu-de-madeira-do-mundo/>>. Acesso em 21-Jun-2018.
- [10] Manfrinato, M, E. "Estudo sobre o uso da madeira para fins estruturais e arquitetônicos. 2015. 87 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.
- [11] Thoemen, H, Irlle, M e Sernek, M. "*Wood-Based Panels An Introduction for Specialists*", 2010.
- [12] N. Europeenne, “EN 13501-1:2007+A1 - Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests,” pp. 1–53, 2009.
- [13] EU Office, “Regulation of the European Parliament and of the Council of 9 March

- 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EECText with EEA relevance,” *Official Journal European Union*, no. 305, pp. 43–88, 2011.
- [14] M. H. Ramage *et al.*, “The wood from the trees: The use of timber in construction,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. October 2015, pp. 333–359, 2017.
- [15] B. M. Esteves and H. M. Pereira, “Wood modification by heat treatment: A review,” *BioResources*, vol. 4, no. 1, pp. 370–404, 2009.
- [16] NEN, “NEN-EN 13501-1+A1: Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests,” pp. 1–57, 2009.
- [17] N. M. G. Barrero, “Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil,” Tese de Doutorado - Faculdade de zootecnia e Engenharia de alimentos- Universidade de São Paulo, 2015.
- [18] A. Pizzi and K. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*. 2003.
- [19] K. Kránitz, “Effect of natural aging on wood,” *Doi.Org*, no. 21661, p. , 2014.
- [20] B. Östman, A. Voss, A. Hughes, P. J. Hovde, and O. Grexa, “Durability of fire retardant treated wood products at humid and exterior conditions review of literature,” *Fire Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 95–104, 2001.
- [21] D. Kržišnik, B. Lesar, N. Thaler, and M. Humar, “Influence of Natural and Artificial Weathering on the Colour Change of Different Wood and Wood-Based Materials,” *Forests*, vol. 9, no. 8, p. 488, 2018.
- [22] M. Žlahtič and M. Humar, “Influence of artificial and natural weathering on the hydrophobicity and surface properties of wood,” *BioResources*, vol. 11, no. 2, pp. 117–142, 2016.
- [23] H. Korai, K. Nakao, T. Matsui, K. Watanabe, and Y. Ishigooka, “Effects of climate change on reduction of internal bond strength of particleboard subjected to various climatic conditions in Japan,” *Journal Wood Science.*, vol. 63, no. 3, pp. 253–262, 2017.
- [24] E. A. Okkonen and B. H. River, “Outdoor Aging of Wood-Based Panels With Correlation With Laboratory Aging: Part 2,” *For. Prod. J.*, vol. 46, no. 3, pp. 68–74, 1996.
- [25] N. Ayrilmis, U. Buyuksari, and N. As, “Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 1–2, pp. 40–43, 2010.
- [26] P. Bekhta and P. Niemz, “Effect of relative humidity on some physical and mechanical properties of different types of fibreboard,” *European Journal Wood Wood Products.*, vol. 67, no. 3, pp. 339–342, 2009.
- [27] L. Moya, W. T. Y. Tze, and J. E. Winandy, “The effect of cyclic relative humidity changes on moisture content and thickness swelling behavior of oriented strandboard,” *Wood Fiber Science.*, vol. 41, no. 4, pp. 447–460, 2009.
- [28] M. Kociszewski, “Effect of relative humidity on shear modulus of particleboard,” vol. 116, pp. 112–116, 2014.

-
- [29] N. Ayrilmis, “Effect of fire retardants on internal bond strength and bond durability of structural fiberboard,” *Building and Environment.*, vol. 42, no. 3, pp. 1200–1206, 2007.
- [30] B. A. L. Östman, “Fire performance of wood products and timber structures,” *Int. Wood Production Journal.*, vol. 8, no. 2, pp. 74–79, 2017.
- [31] J. E. Winandy, “Effects of Fire Retardant Treatments After 18 Months of Exposure at 150 ° F (66 ° C),” *Scientist*, 1995.
- [32] N. America, “Thermal Degradation of Fire-Retardant-Treated Wood: Predicting Residual Service Life,” vol. 51, no. 9095, pp. 47–54, 2001.
- [33] B. Östman and L. Tsantaridis, “Fire retardant treated wood products – Properties and uses,” pp. 1–14, 2000.
- [34] Y. T. Liu, “Cone Calorimeter Analysis on the Fire-Resistant Properties of FRW Fire-Retardant Particleboard,” *Advanced Materials Research.*, vol. 311–313, pp. 2142–2145, 2011.
- [35] D. Fiberboards, S. Liang, L. Zhang, Z. Chen, and F. Fu, “Flame Retardant Efficiency of Melamine Pyrophosphate with Added Mg-Al-Layered Double Hydroxide in Medium,” vol. 12, pp. 533–545, 2017.
- [36] UKTFA, “Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe”. 2013.
- [37] 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,” *International Wood Products Journal*, vol. 46, no. 05005, 2016.
- [38] P. Code, “Wood Flooring- Characteristics, Evaluation of conformity and Marking,” 2008.
- [39] A. W. O. F. Fire-retardant, T. Wood, and F. O. R. Fire, “Nt fire 053 accelerated weathering of fire-retardante,” vol. 1, no. 4, pp. 4–7, 2003.
- [40] B. A. L. Östman and L. D. Tsantaridis, “Durability of the reaction to fire performance of fire-retardant-treated wood products in exterior applications—a 10-year report,” *Int. Wood Products Journal.*, vol. 8, no. 2, pp. 94–100, 2017.
- [41] F. Romero Gesualdo, “Estruturas De Madeira,” Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, 2005.
- [42] Comité Européen de Normalisation (CEN), *Design of timber structures 1*, vol. 1, no. May 2016. 2004.
- [43] W. Carvalho, L. Carrilha, A. Ferraz, and A. M. F. Milagres, “Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira” *Quimica. Nova*, vol. 32, no. 8, pp. 2191–2195, 2009.
- [44] “O Ciclo de Carbono dos produtos de construção em madeira.” [Online]. Disponível em:<<https://www.jular.pt/files/pdfs/134/Ciclo-Carbono-Produtos-Madeira.pdf>.> Acesso em 10-Set-2018.
- [45] D. Committee, S. Date, and E. Date, “Domain Committee " Forests , their Products and Services " COST Action E49 Processes and Performance of Wood-based Panels This Report stems from the relevant Domain Committee .,” 2009.
- [46] A. M. DE SOUZA, “Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de Pinus sp com inclusão de telas metálicas,” no. 1, pp. 1–14, 2012.
-

- [47] G. I. Mantanis, E. T. Athanassiadou, M. C. Barbu, and K. Wijnendaele, “Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries*,” *Wood Material Science & Engineering.*, vol. 13, no. 2, pp. 104–116, 2018.
- [48] F. C. Pierre, “Caracterização físico-mecânica de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos,” tese de doutorado, 2010.
- [49] J. Roberto Eleotério, M. Tomazello Filho, and G. Bortoletto Jr, “Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina,” *Rev. Ciência Florest.*, vol. 10, no. 2, pp. 75–90, 2000.
- [50] J. Roberto Eleotério, M. Tomazello Filho, and G. Bortoletto Jr, “Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina,” *Review. Ciência Florest.*, vol. 10, no. 2, pp. 75–90, 2000.
- [51] C. I. Campos and F. A. R. Lahr, “Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído,” *Nº*, vol. 9, no. 1, pp. 32–42, 2004.
- [52] Gorski, L, “Painéis de partículas orientadas (OSB) da madeira de *Pinus* spp. e *Eucalyptus benthamii*”, 2014.
- [53] F. A. Pereira, “Propriedades de painéis tipo OSB, fabricados com flocos de *Eucalyptus grandis* tratados termicamente,” Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2013.
- [54] F. Stöckel, J. Konnerth, J. Moser, W. Kantner, and W. Gindl-Altmatter, “Micromechanical properties of the interphase in pMDI and UF bond lines,” *Wood Science. Technology.*, vol. 46, no. 4, pp. 611–620, 2012.
- [55] Mendes, R, F, "Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB", Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 2010. 115 p.
- [56] CEN, “Eurocode 5 : Design of timber structures —,” *Proc. ICE - Civ. Eng.*, vol. 144, no. 2004, pp. 39–43, 2014.
- [57] S. Iwakiri, A. B. M. Stinghen, E. L. da Silveira, E. H. C. Zamarian, J. G. Prata, and M. Bronoski, “Influência Da Massa Específica Sobre As Propriedades Mecânicas De Painéis Aglomerados,” *Floresta*, vol. 38, no. 3, pp. 487–493, 2008.
- [58] Almeida, P, C, “Estudo da influência da temperatura e do tempo de prensagem nas características físico mecânicas , de diferentes tipos de MDF aquando do seu revestimento por prensagem,” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 2006
- [59] M. Integrado, P. Doutora, and M. Maria, “Análise da Problemática das Emissões de Formaldeído a partir do Aglomerado de Partículas de Madeira,” 2014.
- [60] L. Zhao, Y. Liu, Z. Xu, Y. Zhang, F. Zhao, and S. Zhang, “State of research and trends in development of wood adhesives,” *Forestry Studies in China*, vol. 13, no. 4, pp. 321–326, 2011.
- [61] F. Özdemir and A. Tutus;, “Effects of fire retardants on the combustion behavior of high-density fiberboard,” *BioResources*, vol. 8, no. 2, pp. 1665–1674, 2013.
- [62] D. Helena and M. Pires, “João Pedro Santos Laranjeira Engenharia Civil Júri,” 2012.
- [63] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, “New

- prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 63, no. 3, pp. 100–125, 2009.
- [64] A. P. Mouritz and A. G. Gibson, *Fire Properties of Polymer Composite Materials*. 2006.
- [65] B. and T. R. H. Scharrel, “Development of fire-retarded materials—Interpretation of cone calorimeter data,” *Finnish-Swedish Flame Days 2009*, no. August 2008, p. 4B, 2009.
- [66] D. Spa, S. Lo Rizzo, and L. De Martin, “Environmental Product Declaration,” *Environmental Management*, 2003. [Online].Disponível em: <<http://www.sonaearauco.com/pt/produtos/produtos-para-construcao-e-mobiliario/aglomerado-de-particulas.>>. Acesso em 20-Jun-2018
- [67] D. Spa, S. Lo Rizzo, and L. De Martin, “Environmental Product Declaration,” *Environ. Manage.*, 2003.
- [68] D. Spa, S. Lo Rizzo, and L. De Martin, “Environmental Product Declaration,” *Environmental Management*, 2003. [Online]. Disponível em: <https://www.sonaearauco.com/pt/produtos-para-construcao-e-mobiliario-osb/osb-4_1801-519.html?t=1>. Acesso em 3-Jun-2018
- [69] “Environmental Climate Chamber”, 2018. [Online].Disponível em: <<http://www.brigantia-ecopark.pt/>>
- [70] E. Ferreira, “Propriedades físico-mecânicas de Painéis de Fibras de Média densidade (MDF) produzidos com resinas convencionais e modificadas com tanino de acácia negra,” Universidade Federal do paraná, 2010.
- [71] J. Lindholm, A. Brink, and M. Hupa, “Cone calorimeter – a tool for measuring heat release rate,” *Finnish-Swedish Flame Days 2009*, no. August 2008, p. 4B, 2009.
- [72] B. Standard, “CEN (2004).EN 13986 Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking. Brussels.,” 2004.
- [73] Sonae Arauco, “Aglomerado de fibras de média densidade (MDF), com comportamento ao fogo melhorado.” [Online]. Disponível em: <<https://www.sonaearauco.com/pt/produtos-para-construcao-e-mobiliario-mdf/mdf-fr-ignifugo.>>. Acesso em 22-Ago-2018.
- [74] P. Almeida, “Estudo da influência da temperatura e do tempo de prensagem nas características físico mecânicas , de diferentes tipos de MDF aquando do seu revestimento por prensagem,” 2006.

Anexos

A1. Tabelas sobre as informações dos provetes utilizados no teste de flexão estática.

Tabela 22 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-NAGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]
S01	50,09	51,03	50,01	50,37	371	16	860,15	32,30	2,98
S02	50,05	50,02	50,05	50,04	369	16	898,52	33,69	3,16
S03	50,09	51	51,03	50,70	369	16	879,12	32,96	3,18
S04	49,9	49,04	50	49,64	370	16	878,76	32,95	3,18
S05	50,05	50,07	51	50,37	371	16	806,44	30,24	3,19
S06	49,9	49,9	50,02	49,94	369	16	869,97	32,62	3,10
S07	50,05	50,03	49,9	49,99	370	16	856,63	32,12	3,08
S08	50,09	49,9	49,8	49,93	370	16	922,67	34,60	3,16
S09	50,09	49,9	49,9	49,96	370	16	906,36	33,98	3,13
						Média	875,40	32,83	3,13
						Desv. P.	33,76	1,26	0,06

Tabela 23 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-AGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]
S01	50,1	49,5	50	49,86	371	16	771,71	28,93	2,66
S02	49,5	50,5	51	50,33	369	16	783,73	29,39	2,63
S03	49	49	50	49,33	370	16	804,64	30,17	2,75
S04	51	49,5	50,6	50,36	369	16	793,79	29,76	2,71
S05	50	50,4	49,5	49,96	370	16	789,02	29,58	2,74
S06	49,5	49,8	49	49,43	371	16	705,08	26,44	2,62
S07	50,2	51,2	50,5	50,63	370	16	717,22	26,89	2,56
S08	50,5	50,5	51	50,66	371	16	707,54	26,53	2,59
S09	49,5	49,5	49,7	49,56	371	16	793,44	29,75	2,72
						Média	762,91	28,60	2,66
						Desv. P.	40,80	1,53	0,06

Tabela 24 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,05	50,02	51	50,35	369	16	817,75	30,66	3,06	
S02	49,95	50,05	50,01	50,00	369	16	883,89	32,92	3,19	
S03	50,03	50,09	51	50,37	369	16	897,01	33,63	3,03	
S04	50,5	49,6	50,02	50,04	371	16	930,69	34,67	3,16	
S05	51,02	50,02	50,08	50,37	371	16	765,71	28,71	3,20	
S06	51,02	51,05	50,05	50,70	370	16	821,84	30,21	3,00	
S07	50,04	50,02	50,04	50,03	369,5	16	795,86	29,64	3,13	
S08	49,95	49,05	49,02	49,34	371	16	951,10	35,66	3,18	
S09	50,03	51,05	50,03	50,37	370	16	817,56	30,65	3,07	
							Média	853,49	31,86	3,11
							Desv. P.	64,13	2,42	0,07

Tabela 25 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-NFR-AGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,5	50,5	50,5	50,16	371	16	680,97	25,53	2,61	
S02	50,5	49,8	50	50,1	369	16	695,58	26,08	2,62	
S03	49	50,2	49,5	49,56	370	16	704,93	26,43	2,62	
S04	51	50,2	49	50,16	370	16	713,19	26,74	2,63	
S05	50,6	50,3	49,7	50,2	368	16	662,43	24,84	2,63	
S06	49,8	49,8	50,8	50,13	370	16	753,85	28,26	2,57	
S07	50,5	51	50,5	50,66	371	16	765,67	28,71	2,54	
S08	50,5	50,7	51,5	50,9	370	16	745,16	27,94	2,54	
S09	49,8	49,7	51	50,16	370	16	726,76	27,25	2,56	
							Média	716,51	26,86	2,59
							Desv. P.	34,47	1,29	0,03

Tabela 26 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-NAGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,08	50,01	49,09	49,39	371	16	830,18	31,11	3,30	
S02	50,01	50,02	50	50,01	370,5	16	781,38	29,66	3,10	
S03	50,01	49,07	49,07	49,39	370	16	768,98	29,19	3,17	
S04	51,01	50,05	50,09	50,38	371	16	790,92	29,43	3,08	
S05	50,01	50,05	50	50,02	371	16	786,53	29,27	3,17	
S06	50,06	50,03	50,01	50,03	370	16	831,28	31,15	3,16	
S07	50,05	50,01	49,08	49,71	370	16	825,01	31,16	3,23	
S08	50	50,01	50	50,00	370	16	813,18	30,49	3,16	
S09	50,08	50,03	50,01	50,04	371	16	804,11	30,15	3,19	
S10	50,09	50,02	50,01	50,04	369	16	815,25	30,54	3,20	
							Média	804,68	30,21	3,18
							Desv. P.	21,83	0,78	0,06

Tabela 27 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-AGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,5	50,5	49,5	49,83	371	16	758,71	28,42	2,86	
S02	50,3	49,5	50,3	50,03	369	16	741,50	27,78	2,79	
S03	49,8	50,2	50,5	50,16	369	16	760,35	28,49	2,76	
S04	51	49,7	50,4	50,36	369	16	721,94	27,05	2,76	
S05	50,7	50,3	49,7	50,23	371	16	770,62	28,87	2,84	
S06	49,2	50,4	49,8	49,8	370	16	795,57	29,81	2,86	
S07	50,5	49,6	50,8	50,3	370	16	767,51	28,75	2,80	
S08	49,5	49	51	49,83	370	16	784,77	29,40	2,84	
S09	49	49,5	49	49,16	370	16	709,50	26,58	2,86	
							Média	756,72	28,35	2,82
							Desv. P.	28,04	1,05	0,04

Tabela 28 - Resultados dos testes aos provetes de MDF-FR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,05	50,02	50,01	50,02	370	16	830,18	31,11	3,26	
S02	50,03	50,03	50	50,02	371	16	709,91	26,61	3,23	
S03	50,03	50,03	50,01	50,02	371	16	781,54	29,30	3,21	
S04	50,06	50,01	50,01	50,02	371	16	709,91	26,61	3,23	
S05	50,03	50	50,01	50,01	370	16	800,75	30,05	3,22	
S06	50,01	50,02	50,01	50,01	368	16	831,84	31,18	3,20	
S07	50,01	50	50	50,00	371	16	827,01	31,00	3,22	
S08	50,01	50,01	49,9	49,97	369	16	813,28	30,49	3,10	
S09	50,04	50,06	50,01	50,03	370	16	784,26	29,40	3,20	
							Média	787,63	29,53	3,21
							Desv. P.	47,79	1,79	0,04

Tabela 29 - Resultado dos testes aos provetes de MDF-FR-AGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,4	49,5	49,5	49,8	370	16	710,47	26,63	2,88	
S02	49,8	50,5	50,5	50,26	370	16	683,33	25,61	2,84	
S03	50,3	49,5	50,5	50,1	369	16	639,97	23,99	2,70	
S04	50,5	49,5	50	50	368	16	789,68	29,60	2,86	
S05	50,8	50,6	50,8	50,73	370	16	684,27	25,65	2,74	
S06	51	50,4	49,6	50,33	370	16	771,86	28,93	2,85	
S07	49,4	50,5	49,6	49,83	371	16	748,00	28,04	2,79	
S08	49,5	50,8	50,5	50,26	369	16	749,90	28,11	2,73	
S09	50,4	49,5	50	49,96	370	16	779,86	29,23	2,90	
							Média	779,86	27,31	2,81
							Desv. P.	51,54	1,93	0,07

Tabela 30 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-NAGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,5	50,2	50,01	50,23	350,2	15	294,28	11,65	2,42	
S02	50,01	50,03	50,05	50,03	350	15	265,58	10,62	2,17	
S03	50,02	49,9	50,01	49,97	350,06	15	289,20	11,56	2,30	
S04	50,03	50,01	49,9	49,98	350,1	15	287,25	11,49	2,28	
S05	50	49,8	50,05	49,95	352	15	284,82	11,39	2,38	
S06	50,06	50,02	50,01	50,03	350	15	310,85	12,43	2,32	
S07	50,06	50,2	50,02	50,09	349	15	287,25	11,49	2,28	
S08	50,01	50,4	49,9	50,10	350	15	329,60	13,05	2,39	
S09	50,4	50,06	50,01	50,15	351	15	290,68	11,62	2,26	
S10	49,9	49,7	49,02	49,54	351	15	269,69	10,58	2,22	
							Média	290,92	11,59	2,30
							Desv. P.	18,45	0,73	0,07

Tabela 31- Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-AGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,5	50,03	50	49,84	350	15	256,92	10,27	1,79	
S02	50	51	49,5	50,16	351	15	240,80	9,63	1,78	
S03	49,9	50,05	50,05	50	351	15	226,54	9,06	1,82	
S04	50,9	51	50,9	50,93	350	15	260,42	10,41	1,74	
S05	49,5	49,5	50	49,66	351	15	234,97	9,39	1,87	
S06	50	49	50,5	49,83	351	15	250,94	10,03	1,81	
S07	50,5	49,8	49	49,76	350	15	228,89	9,15	1,79	
S08	49	51	50,5	50,16	350	15	251,80	10,07	1,82	
S09	49,5	50,05	50	49,85	351	15	246,35	9,85	1,80	
							Média	244,18	9,76	1,80
							Desv. P.	12,12	0,48	0,03

Tabela 32 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50	50,02	50	50,06	350,1	15	284,78	11,39	2,36	
S02	50	50,04	50,5	50,18	351	15	278,47	11,13	2,41	
S03	50,02	49,9	50,01	49,97	350,2	15	285,48	11,41	2,13	
S04	50,06	50	49,9	49,98	350	15	294,31	11,77	2,24	
S05	50	49,8	49,8	49,86	351	15	276,23	10,83	2,31	
S06	50,06	50,02	50,01	50,03	350	15	266,42	10,65	2,30	
S07	50,06	50,1	50,02	50,06	349	15	308,87	12,35	2,52	
S08	50,1	50,4	49,9	50,13	350	15	301,40	12,05	2,43	
S09	50,2	50	50,01	50,07	351	15	301,09	12,04	2,45	
							Média	288,56	11,51	2,35
							Desv. P.	13,85	0,58	0,11

Tabela 33 - Resultados dos testes aos provetes de PB-NFR-AGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50	50,2	50	50,06	350,1	15	266,94	10,67	2,16	
S02	50	50,04	50,5	50,18	351	15	228,26	9,13	1,95	
S03	50,02	49,9	50,01	49,97	350,2	15	251,30	10,05	2,08	
S04	50,06	50	49,9	49,98	350	15	257,10	10,28	2,03	
S05	50	49,9	49,8	49,86	351	15	246,65	9,86	2,00	
S06	50,06	50,02	50,01	50,03	350	15	232,85	9,31	2,06	
S07	50,06	50,1	50,02	50,06	349	15	276,94	11,07	2,13	
S08	50,1	50,4	49,9	50,13	350	15	265,91	10,63	2,12	
S09	50,2	50	50,01	50,07	351	15	271,21	10,84	2,03	
							Média	255,24	10,20	2,06
							Desv. P.	16,94	0,67	0,06

Tabela 34 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-NAGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,04	50,09	51	50,37	350	15	266,16	10,64	2,34	
S02	49,9	50,05	50,02	50,01	351	15	282,89	11,31	2,54	
S03	49,9	50,02	49,9	49,94	350	15	284,62	11,38	2,62	
S04	50,05	50,09	49,9	50,01	349,5	15	278,94	11,15	2,53	
S05	49,9	49	49,9	49,6	350,5	15	283,45	11,33	2,51	
S06	50,05	51	49,9	50,31	351	15	277,48	11,09	2,53	
S07	50,9	49,5	49,9	50,1	350	15	279,74	11,18	2,55	
S08	50,9	49,9	49	49,93	351	15	279,47	11,17	2,57	
S09	49	50,05	50,06	49,70	349,5	15	268,92	10,75	2,57	
S10	49,9	50	50	49,96	351	15	272,15	10,88	2,60	
							Média	277,38	11,09	2,54
							Desv. P.	6,29	0,25	0,07

Tabela 35 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-AGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,5	50,5	50	50,33	351	15	232,43	9,29	1,71	
S02	49,5	50,3	49,76	49,76	350	15	243,41	9,73	1,73	
S03	49,5	50	49,5	49,66	351,5	15	252,30	10,09	1,77	
S04	49,8	51,5	49,8	50,36	350	15	248,77	9,95	1,76	
S05	50,5	50,5	50,5	50,5	350	15	215,99	8,63	1,72	
S06	50,5	49,6	50	50,03	351	15	224,47	8,97	1,76	
S07	50	49,7	49	49,56	351	15	223,34	8,93	1,73	
S08	49,8	49,5	50	49,76	351	15	211,59	8,46	1,70	
S09	49,5	49	49	49,16	350,3	15	223,71	8,94	1,74	
							Média	230,67	9,22	1,74
							Desv. P.	14,49	0,57	0,03

Tabela 36 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,8	50,05	51	50,28	350	15	331,20	13,24	2,88	
S02	49,9	50	50	49,96	351	15	320,43	12,81	2,81	
S03	49,5	49	50	49,5	351	15	346,13	13,84	2,90	
S04	50	50,05	49,9	50	350	15	295,50	11,82	2,79	
S05	51	49,9	49	49,96	350,5	15	294,28	11,77	2,88	
S06	50	51,04	49,9	50,31	350	15	285,00	11,40	2,70	
S07	50,09	51,05	49	50,04	351	15	279,09	11,16	1,91	
S08	49	51	50	50	351	15	269,81	10,79	2,71	
S09	49,8	49,8	50	49,86	350	15	275,21	11,00	2,93	
S10	50	50,05	51	50,35	351	15	264,64	10,58	2,74	
							Média	296,13	11,84	2,72
							Desv. P.	27,60	1,10	0,29

Tabela 37 - Resultados dos testes aos provetes de PB-FR-AGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	50,5	49,8	50	50,10	351	15	253,99	10,15	2,06	
S02	49,5	49,6	49,5	49,53	351	15	255,12	10,20	1,95	
S03	49,5	49	49,5	49,33	350	15	233,05	9,32	1,96	
S04	49,8	50,4	49,8	50	350	15	273,15	10,92	1,93	
S05	50,5	50,4	50,5	50,46	351	15	267,90	10,71	1,99	
S06	50,5	50	50	50,16	350	15	265,13	10,60	2,08	
S07	50	49,5	49	49,5	350	15	252,33	10,09	2,11	
S08	49,8	49,5	50	49,76	350	15	235,46	9,41	2,06	
S09	49,5	50	49	49,5	350	15	238,75	9,55	1,94	
S10	50,5	50,5	50,3	50,43	350	15	212,17	8,48	1,96	
							Média	248,70	9,94	2,00
							Desv. P.	18,77	0,75	0,06

Tabela 38 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,8	50,4	49,7	49,96	411	18	590,13	19,65	3,74	
S02	50,08	50,1	50,02	50,06	410	18	588,28	19,60	3,86	
S03	50,09	50,3	49,9	50,9	411	18	525,48	17,51	3,67	
S04	49,05	49,05	49,9	49,33	412	18	727,40	24,24	4,98	
S05	50,08	50,04	49,8	49,97	410	18	631,81	21,06	3,54	
S06	51,04	50,09	49,9	50,34	412	18	713,87	23,79	4,35	
S07	50,06	50,05	49,9	50,00	412	18	509,52	16,96	3,20	
S08	50,9	49,9	50,06	50,28	410	18	703,84	23,46	4,08	
S09	51,05	50,03	49,8	50,29	411	18	760,36	25,34	3,64	
S10	50	49,9	49,89	49,93	410	18	789,02	26,30	4,22	
							Média	653,97	21,79	3,93
							Desv. P.	98,47	3,28	0,50

Tabela 39 - Resultados dos testes aos provetes OSB4-NFR-AGED-0°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,8	50,4	49,7	49,96	411	18	647,98	21,59	3,72	
S02	49,5	50,1	50,02	49,87	410	18	653,69	21,78	3,86	
S03	50,09	50,3	49,9	50,09	411	18	555,10	18,50	3,20	
S04	50,5	49,05	49,9	49,81	412	18	772,95	25,76	4,30	
S05	49,5	50,04	49,8	49,78	410	18	597,29	19,90	3,51	
S06	51,04	50,09	49,9	50,34	412	18	709,37	23,64	3,72	
S07	50,06	50,05	49,9	50,00	412	18	728,12	24,27	4,03	
S08	50,9	49,9	50,06	50,28	410	18	659,13	21,97	3,71	
S09	51,05	50,03	49,8	50,29	411	18	572,83	19,09	3,21	
S10	50	49,9	49,89	49,93	410	18	731,75	24,39	3,75	
							Média	662,82	22,09	3,70
							Desv. P.	72,74	2,42	0,33

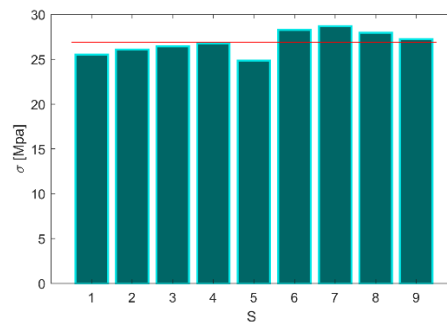
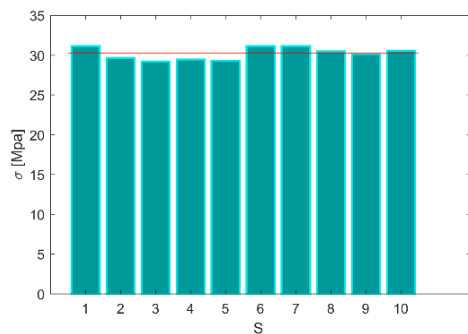
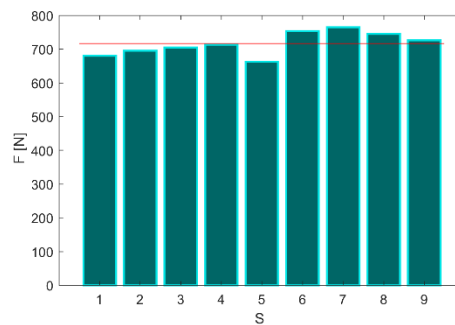
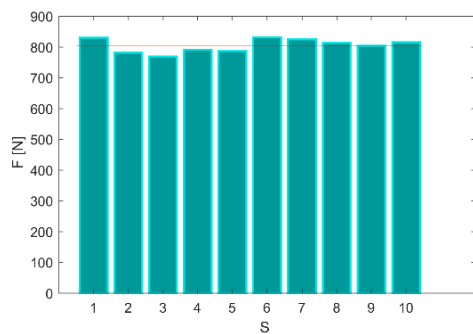
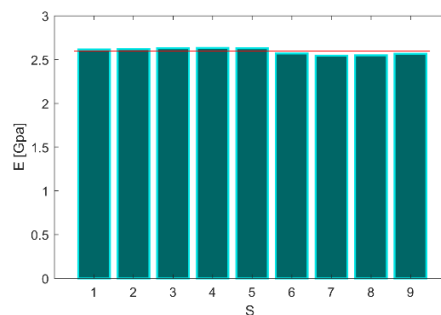
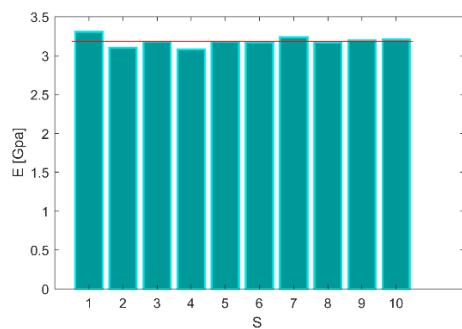
Tabela 40 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE	
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]	
S01	49,9	50,04	49,9	49,94	410	18	325,85	10,86	1,62	
S02	50,06	50	50,05	50,03	412	18	379,44	12,64	1,98	
S03	50,09	50,3	49,8	50,06	410	18	363,64	12,12	1,88	
S04	49,05	49,05	49,9	49,33	412	18	402,47	13,41	2,00	
S05	50,03	50,06	49,8	49,96	413	18	391,64	13,05	1,82	
S06	51,03	50,09	49,9	50,34	412	18	422,33	14,07	1,72	
S07	50,02	50	49,9	49,97	411	18	376,63	12,55	1,72	
S08	50,9	49,9	50,06	50,28	410	18	454,79	15,15	1,93	
S09	51,09	50,05	49,9	50,34	412	18	528,15	17,62	2,18	
S10	50,05	49,9	49,89	49,94	410	18	422,06	14,06	1,89	
							Média	406,70	13,55	1,87
							Desv. P.	55,60	1,85	0,16

Tabela 41 - Resultados dos testes aos provetes de OSB4-NFR-NAGED-90°.

Provetes	Largura (3 medidas) [mm]			Média	Comp.	Espessura	Fmáx [N]	MOR	MOE
				[mm]	[mm]	[mm]		[Mpa]	[Gpa]
S01	49,9	50,1	49,6	49,96	410	18	520,36	17,34	1,83
S02	50,5	50	49,5	49,87	410	18	427,13	14,23	1,69
S03	50,6	50	50	50,09	410	18	467,63	15,58	1,86
S04	49,9	50,1	49,5	49,81	412	18	383,52	12,78	1,80
S05	49,5	50,04	49,8	49,78	410	18	454,68	15,15	1,79
S06	51,04	50,09	49,9	50,34	411	18	413,33	13,77	1,82
S07	49,9	49,8	49,5	50,00	412	18	498,28	16,60	2,04
S08	50,9	49,9	50,06	50,28	411	18	402,85	13,42	1,73
S09	51,5	51	50	50,29	410	18	487,08	16,23	1,98
S10	51	50,8	51,6	49,93	411	18	373,25	12,44	1,73
						Média	442,81	14,76	1,83
						Desv. P.	50,41	1,68	0,10

A2. Gráficos da caracterização mecânica dos painéis de derivados de madeira



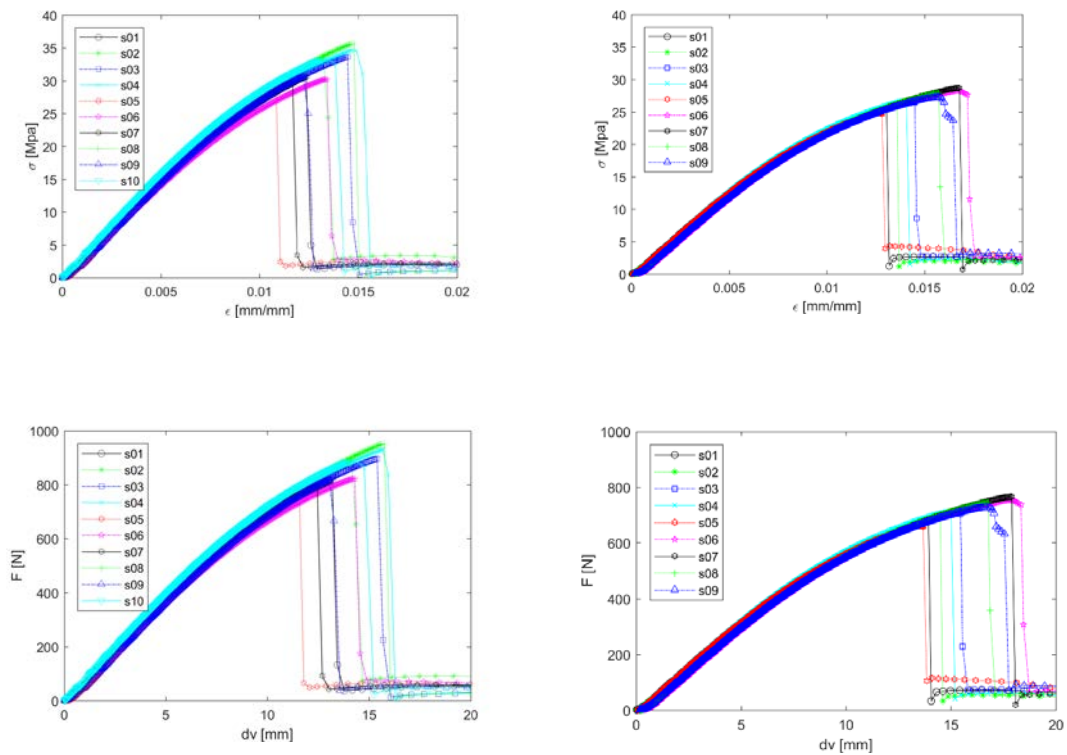


Figura 79 - MDF-ST-NFR-90°; não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).

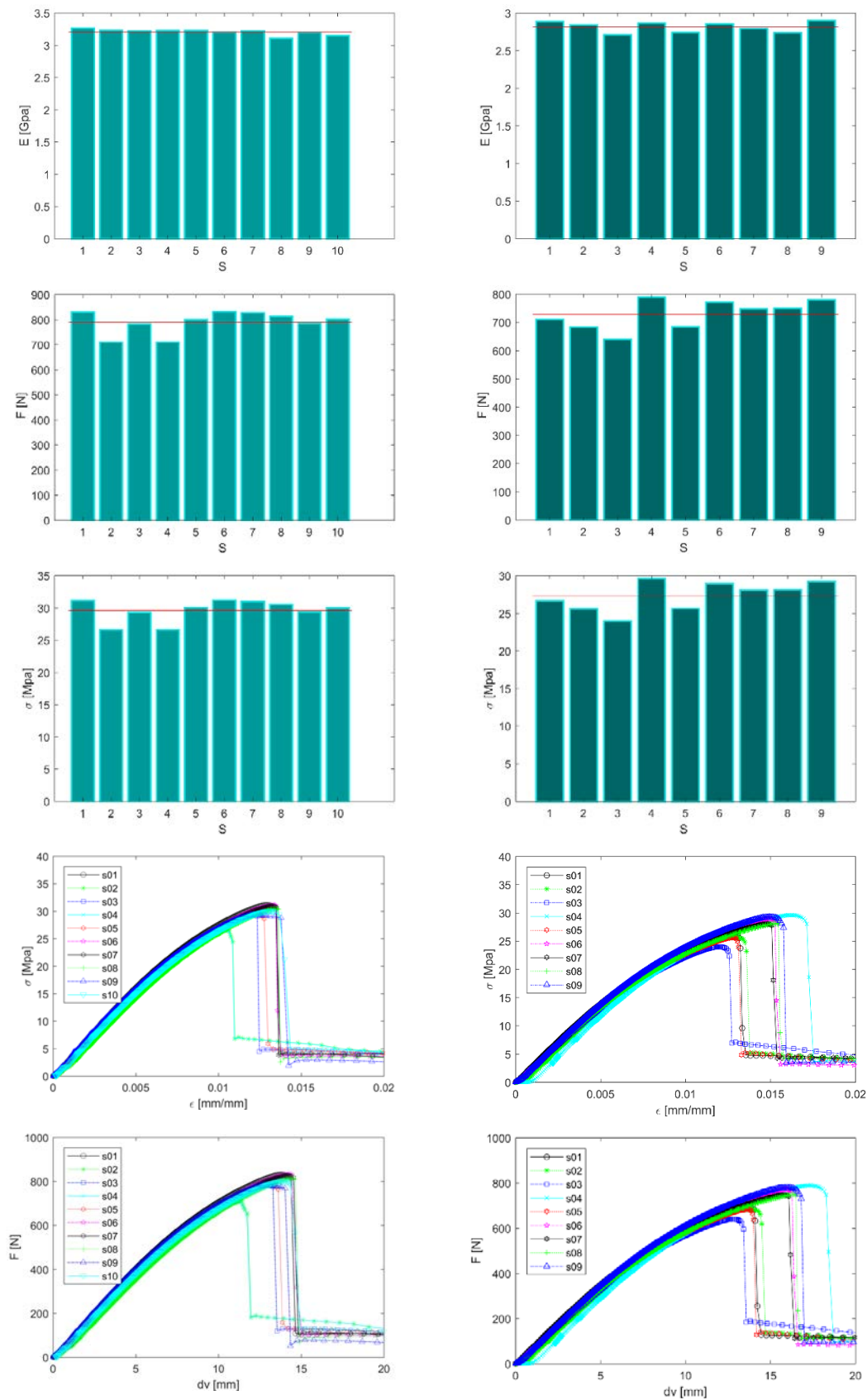


Figura 80 - MDF-FR-90°, não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).

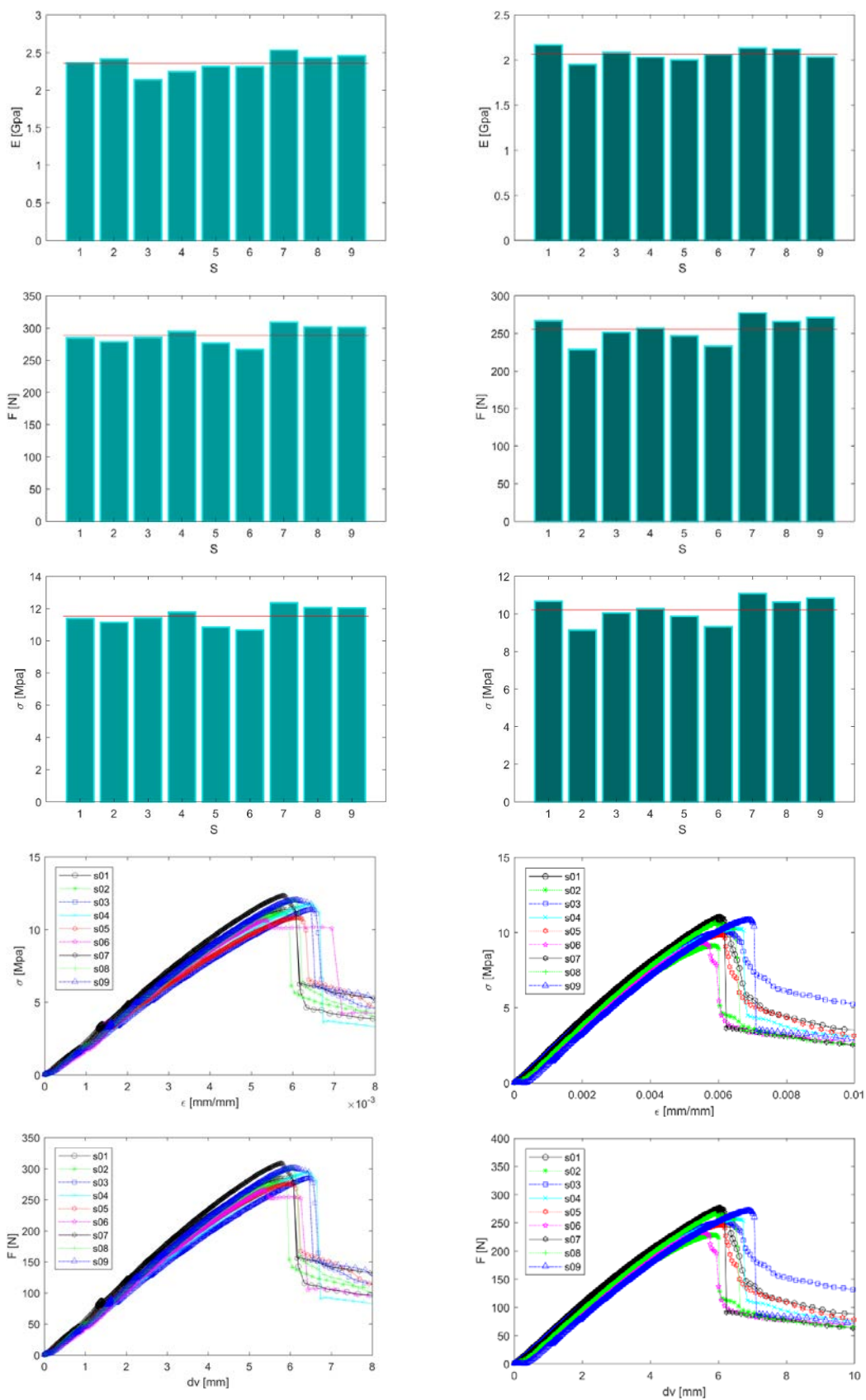


Figura 81 - PB-NFR-90°; amostras não envelhecidas (esq.) e amostras envelhecidas (dir.).

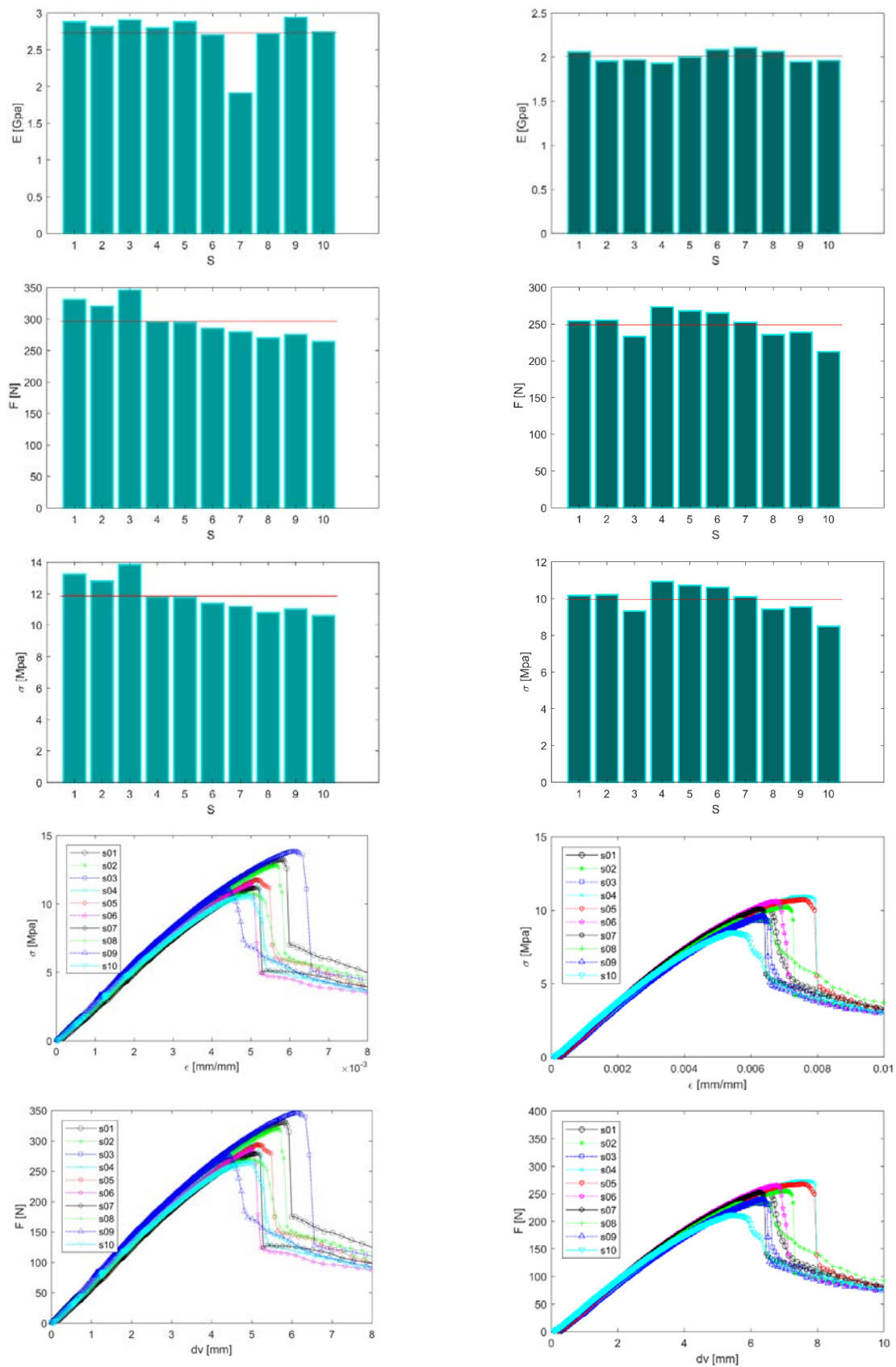


Figura 82 - PB-FR-90°; não envelhecidas (esq.) e envelhecidas (dir.).