

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPÉCIES PORTUGUESAS DE MADEIRA TERMICAMENTE MODIFICADA

STUDY AND CHARACTERIZATION OF HEAT MODIFIED WOOD PORTUGUESE SPECIES

J. Costa¹, J. M. Branco², A. Camões³

¹Aluno do Programa Doutoral em Engenharia Civil, Dept de Engenharia Civil, Universidade do Minho; jcosta.engcivil@gmail.com

²ISISE, Dept Engenharia Civil, Universidade do Minho, jbranco@civil.uminho.pt

³CTAC, Dept Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal; aires@civil.uminho.pt



RESUMO

A modificação térmica tem-se revelado um método eficaz na melhoria da durabilidade de elementos de madeira. Até ao momento, as aplicações da madeira termicamente modificada (MTM) têm sido limitadas a revestimentos já que o tratamento térmico de tratamento conduz a uma redução significativa das resistências mecânicas da madeira. Contudo, este tratamento térmico poderá valorizar e potenciar a utilização de espécies de madeira menos utilizadas na construção, como são o Eucalipto e o Pinho bravo nacional. Com o objetivo de avaliar o efeito do tratamento térmico nas espécies referidas e, complementarmente, na madeira de Faia e Freixo, realizou-se uma campanha experimental composta por ensaios de caracterização mecânica (compressão paralela às fibras e flexão) e de estabilidade dimensional (retração, inchamento e teor de água de equilíbrio (TAE)). Para efeitos de comparação, todos os ensaios envolveram séries de provetes de cada espécie de madeira natural e MTM. Os resultados obtidos são coerentes com a bibliografia disponível, o aumento da estabilidade dimensional, assim como a diminuição do TAE e das propriedades mecânicas de flexão foram verificadas, permitindo, assim, avaliar a influência da modificação térmica nas propriedades de espécies de madeira presentes em Portugal.

ABSTRACT

The thermal modification has proved to be an effective method to improve the durability of wood elements. Until the moment, applications of thermally modified wood (MTM) have been limited to non-structural applications, because the heat treatment leads to a significant reduction in the mechanical performance of wood. However, this heat treatment can promote the use of less used wood species in construction, as the national Eucalyptus and Pine. In order to evaluate the effect of heat treatment on the species of Pine, Eucalyptus, Beech and Ash, was held an experimental program that consisted in mechanical characterization tests (compression parallel to grain and flexion) and tests of dimensional stability (shrinkage, swelling and equilibrium moisture content (EMC)). For comparison, all tests were made with samples of non-modified and thermally modified wood. The results are consistent with the available literature, the dimensional stability increased, as well as the reduction of TAE and mechanical properties, allowing the evaluation of the thermal modification on the properties of wood species present in Portugal.

1. INTRODUÇÃO

A modificação térmica é um método eficaz para aumentar a durabilidade da madeira (Esteves, 2013; Hill, 2006; Pentti Ek, 1993; E22, 2001), uma vez que o melhoramento de algumas das suas propriedades permite uma utilização mais alargada da MTM na construção.

Ao restringir o seu comportamento higroscópico, diminuindo o seu TAE, levando, também, à redução da variação dimensional e aumento da sua resistência à biodegradação (Jämsä and Viitaniemi, 2001; Metsä-Kortelainen et al., 2006; Esteves et al., 2006; Esteves et al., 2007; Hakkou et al., 2006; E22, 2001; Finnish ThermoWood Association, 2003; Hill, 2006; Pentti Ek, 1993), o seu desempenho em boas condições é prolongado. Contudo, o tratamento térmico reduz, em geral, as propriedades mecânicas da madeira, degradando compostos que têm um papel importante no seu desempenho mecânico (Hill, 2006; E22, 2001; Esteves, 2012).

Com o presente trabalho pretende-se estudar a aplicação do tratamento térmico a espécies de madeira existentes em Portugal, analisando o efeito do mesmo na sua resistência à flexão e estabilidade dimensional. Para o efeito, realizaram-se estudos sobre a sua influência nas propriedades de Pinho bravo (*Pinus pinaster*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Faia (*Fagus sylvatica*) e Freixo (*Fraxinus angustifolia*).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Tratamentos térmicos aplicados

Todas as amostras utilizadas no presente estudo foram extraídas de uma mesma árvore, para cada espécie selecionada (Pinho bravo, Eucalipto, Faia e Freixo), e secas ao ar. As amostras para os ensaios mecânicos, análise da estabilidade dimensional, perda de massa e teor de água de equilíbrio foram cortadas segundo as direções principais e conservadas numa câmara climática à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$, durante um

período de duas semanas. Após este período procedeu-se à modificação térmica das respetivas peças de madeira.

O tratamento térmico utilizado consistiu no tratamento das amostras das várias espécies, numa estufa corrente de altas temperaturas, com capacidade de aquecimento até 1000°C , sem pressão e sem controlo do teor de oxigénio da atmosfera de tratamento. Para estas, foram realizados vários tratamentos térmicos, com velocidade de aquecimento constante até a temperatura máxima de tratamento ser atingida, de aproximadamente $3^\circ\text{C}/\text{min}$. A velocidade de arrefecimento foi, também, constante e de cerca de $3^\circ\text{C}/\text{min}$.

Na Fig. 1 apresenta-se a ilustração esquemática dos tratamentos térmicos aplicados, sendo t_h o tempo de aquecimento, t_e o tempo efetivo de tratamento à temperatura máxima, $T_{m\acute{a}x}$ e t_c o tempo de arrefecimento. Sempre que mencionado, o tempo de tratamento refere-se ao espaço de tempo segundo o qual a temperatura máxima é mantida constante (t_e).

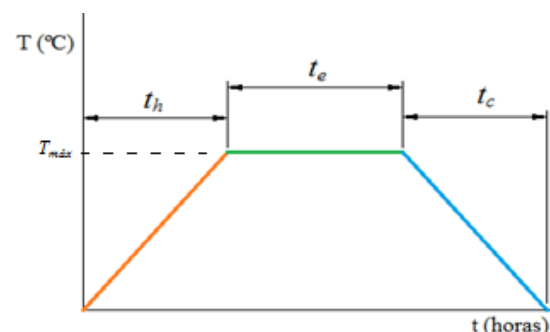


Fig. 1 – Representação esquemática dos tratamentos térmicos aplicados

Com vista à comparação de resultados entre as espécies, modificadas termicamente e não tratadas, foram utilizadas amostras de controlo (sem tratamento) e amostras modificadas a diferentes $T_{m\acute{a}x}$ e durante t_e distintos. Apresentam-se na Tabela 1, de forma esquemática, os vários tratamentos térmicos realizados para cada espécie. Para estes, as vigas referem-se às amostras utilizadas para os ensaios mecânicos (2.5) e os provetes para os restantes estudos.

Tabela 1 – Tratamentos térmicos realizados

Número de amostras	$T_{máx}$ (°C)	t_e (horas)
7 vigas + 7 provetes	160	2
9 vigas + 7 provetes	160	4
9 vigas + 7 provetes	160	8
7 vigas + 7 provetes	180	2
9 vigas + 7 provetes	180	4
9 vigas + 7 provetes	180	8
7 vigas + 7 provetes	200	2
7 vigas + 7 provetes	220	2
9 vigas + 7 provetes	Sem tratamento térmico	

Para cada um destes tratamentos térmicos foram utilizadas 6 amostras, para as diferentes temperaturas, durações e espécies selecionadas. Deste modo, excluíram-se sempre, em todos os grupos com a mesma tipologia de tratamento e ensaio o resultado de 1 provete, com o valor mais distante da média.

2.2. Teor de água de equilíbrio

O procedimento utilizado para a determinação do teor de água das amostras de madeira foi baseado na norma ISO 3130:1975. Todas as amostras foram imersas em água durante 72 horas e, posteriormente, conservadas numa câmara climática à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$. As medições foram realizadas com espaçamentos iniciais de 3 horas, sendo depois este tempo aumentado quando a variação nas amostras não suscitava essa necessidade e sem prejuízo na precisão dos resultados obtidos. As medições cessaram, considerando-se que as amostras tinham atingido o seu TAE e estavam estabilizadas, quando a variação na massa foi inferior a 0,1% em intervalos espaçados de 24 horas.

Com o objetivo de avaliar a influência do tratamento térmico e o aumento da $T_{máx}$ de tratamento, foram utilizadas as amostras esquematizadas na Tabela 2.

2.3. Variação dimensional

Para a determinação da variação dimensional foi seguido o procedimento descrito pela norma NP 615:1973, utilizando a Eq. (1) para a determinação da retração:

Tabela 2 - Amostras usadas para determinação do TAE

Nº amostras	$T_{máx}$ (°C)	t_e (horas)
7 provetes	160	2
7 provetes	180	2
7 provetes	200	2
7 provetes	220	2
7 provetes	Sem tratamento térmico	

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_3}{l_3} \times 100 \quad (1)$$

sendo l_1 a dimensão numa dada direção do provete saturado e l_3 a dimensão na mesma direção para o provete no estado anidro.

Esta tarefa foi desenvolvida em paralelo com a tarefa descrita no ponto anterior (2.2), isto é, no momento da medição relativa ao teor de água de equilíbrio foram, também, realizadas medições nas direções radial e tangencial das mesmas amostras. Tal como descrito no ponto 2.2, estas amostras foram imersas em água durante 72 horas e, posteriormente, conservadas em câmara climática à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$. As mesmas foram medidas segundo as direções radial e tangencial, por períodos iniciais de 3 horas e, posteriormente, aumentados quando a variação da massa diminuía de forma gradual e sem prejuízo na definição dos resultados obtidos. Estas medições foram realizadas até as amostras estabilizarem, considerando-se que estas atingiam o seu TAE quando a variação da sua massa era inferior a 0,1% em 24 horas e em duas medições sucessivas não fosse detetada qualquer variação superior a 0,001mm.

2.4. Perda de massa

De modo a avaliar a perda de massa provocada pelo tratamento térmico, nas amostras de cada espécie, foram realizadas medições pontuais da massa das mesmas amostras dos pontos anteriores, nas seguintes situações:

1. quando em equilíbrio, antes de submetidas ao tratamento térmico;
2. quando secas, antes de submetidas ao tratamento térmico;

3. quando em equilíbrio, depois de submetidas ao tratamento térmico;
4. quando secas, depois de submetidas ao tratamento térmico.

O procedimento utilizado para a determinação da massa das amostras de madeira foi baseado, também, na norma ISO 3130:1975. Foram utilizadas as mesmas amostras e processos descritos anteriormente na Tabela 2 (ponto 2.2).

A determinação da perda de massa foi feita recorrendo à Eq. (2):

$$\text{perda de massa (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \quad (2)$$

onde M_f é a massa do provete após tratamento térmico e M_i a massa inicial, antes do tratamento.

2.5. Módulo de elasticidade (E) e Tensão de rotura (f) em flexão estática

Na determinação das propriedades mecânicas por flexão estática foi utilizado o procedimento descrito pela norma ISO 3133:1975. O módulo de elasticidade (E) e a tensão de rotura (f) por flexão estática foram determinados em amostras de 340x20x20 mm³ (direção axial x direção radial x direção tangencial) por ensaio de flexão sob três pontos de carga.

As medições do E foram realizadas segundo uma velocidade constante e, na determinação da f , estimada de modo a causar a rotura em aproximadamente 3 minutos, cerca de 60µm/seg. As duas propriedades foram determinadas de acordo com as Eq. (3) e Eq. (4):

$$E \text{ (kN/mm}^2\text{)} = \frac{\Delta F \times l^3}{\Delta x \times 4 \times b \times h^3} \quad (3)$$

$$f \text{ (MPa)} = \frac{3F \times l}{2b \times h^3} \quad (4)$$

sendo F a carga de rotura medida em N, $\Delta F/\Delta x$ o declive da zona elástica em N/mm, l o comprimento do vão livre entre apoios, h a altura e b a largura da secção, todos expressos, em mm.

Com o objetivo de avaliar a influência do tratamento térmico e o aumento de $T_{m\acute{a}x}$

no comportamento em flexão das espécies selecionadas, foram utilizadas as amostras da Tabela 3.

Tabela 3 – Amostras utilizadas nos ensaios de flexão estática

Nº amostras	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	t_e (horas)
7 vigas	160	2
7 vigas	180	2
7 vigas	200	2
7 vigas	220	2
7 vigas	Sem tratamento térmico	

2.6. Compressão axial

Na determinação das propriedades mecânicas à compressão uniaxial foi utilizado o procedimento descrito pela norma NP 618:1973.

$$\sigma_c \text{ (kN/m}^2\text{)} = \frac{F}{bh} \quad (5)$$

onde F é a carga de rotura medida em kN, h e b as dimensões da secção dos provetes, expressas em m.

Para estes ensaios foram utilizadas as amostras cortadas das vigas indicadas no ponto 2.5, amostras estas com 50 x 20 x 20 mm³ (direção axial x direção radial x direção tangencial). Estas foram cortadas das 2 vigas adicionais, nos grupos que possuíam 9 vigas tratadas. De forma esquemática apresentam-se as amostras testadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Amostras utilizadas no ensaio de resistência à compressão

Nº amostras	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	t_e (horas)
7 provetes	160	4
7 provetes	160	8
7 provetes	180	4
7 provetes	180	8
7 provetes	Sem tratamento térmico	
7 provetes	Tratados industrialmente a 208°C	

Apenas foi possível avaliar a resistência à compressão para as espécies Pinho bravo e Eucalipto. Adicionalmente a estas amostras, foram ainda cortadas 7 das vigas tratadas

industrialmente a 208°C, também de Pinho bravo.

2.7. Tempo de tratamento, t_e

Com o objetivo de avaliar a influência do aumento do tempo de tratamento nas propriedades anteriormente mencionadas, foram utilizadas as amostras apresentadas na Tabela 5, para a análise do teor de água de equilíbrio e variação dimensional. O procedimento utilizado foi o descrito anteriormente em 2.2 e 2.3.

As amostras da Tabela 6 foram utilizadas para a análise da influência do aumento do tempo de tratamento nas propriedades mecânicas de flexão. O procedimento utilizado para esta avaliação foi o descrito anteriormente em 2.4.

Tabela 5 – Amostras submetidas a diferentes t_e para avaliação do TAE e da variação dimensional

Nº amostras	$T_{máx}$ (°C)	t_e (horas)
7 provetes	160	2
7 provetes	160	4
7 provetes	160	8
7 provetes	180	2
7 provetes	180	4
7 provetes	180	8
7 provetes	Sem tratamento térmico	

Tabela 6 – Amostras submetidas a diferentes t_e para avaliação do comportamento em flexão

Nº amostras	$T_{máx}$ (°C)	t_e (horas)
Número de amostras (unidade)	Temperatura de tratamento (°C)	Tempo de tratamento (horas)
7 vigas	160	2
7 vigas	160	4
7 vigas	160	8
7 vigas	180	2
7 vigas	180	4
7 vigas	180	8
7 vigas	Sem tratamento térmico	

Nota: as amostras identificadas nas Tabelas 5 e 6 a sombreado já tinham, nesta fase, sido ensaiadas, pelo que nesta tarefa apenas foram ensaiadas as restantes e, posteriormente, comparados os dados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos diversos ensaios efetuados apresentam-se sob a forma de tabela e, também, sob a forma gráfica. Nas tabelas, junto ao valor médio dos resultados obtidos, apresenta-se, entre parêntesis, o respetivo coeficiente de variação, em %.

Nas ilustrações gráficas utilizaram-se as iniciais das espécies ensaiadas para uma mais fácil compreensão e interpretação dos resultados. Como exemplo, o Pinho tratado a 180°C durante 4 horas, terá a nomenclatura P-180 (4); no caso do Freixo tratado a 160°C durante 2 horas, terá a nomenclatura FR-160 (2); no caso da Faia tratada a 160°C durante 2 horas, terá a nomenclatura F-160 (2).

3.1. Teor de água de equilíbrio

Na perspetiva de avaliar a diminuição do TAE das amostras das espécies modificadas termicamente e compará-las com as mesmas não tratadas, foram medidos os TAE das várias espécies em estudo. Na Tabela 7 apresentam-se os resultados obtidos para esta análise, bem como os correspondentes à madeira não tratada (T_0).

Tabela 7 - Teor de água de equilíbrio (TAE) (%),

Espécies	T_0	$T_{máx}$ (°C)		
		160	180	200
Pinho	12,68 (<2%)	12,04 (<2%)	11,37 (<2%)	9,99 (2,77%)
Eucalipto	12,21 (<2%)	11,18 (<2%)	10,01 (2,24%)	8,52 (<2%)
Faia	11,95 (<2%)	10,99 (<2%)	10,42 (2,21%)	9,10 (<2%)
Freixo	12,06 (<2%)	11,10 (<2%)	10,58 (<2%)	9,12 (<2%)

Esta análise confirmou que quanto mais severo o tratamento térmico aplicado, maior é a diminuição do TAE.

3.2. Variação dimensional

Com o objetivo de avaliar a influência do tratamento térmico na variação dimensional das espécies em estudo e compará-las com as mesmas não tratadas,

mediram-se todas até à sua estabilização. Na Tabela 8 apresentam-se os resultados obtidos segundo a direção radial das várias espécies, não tratadas e modificadas a 160°C, 180°C e 200°C, respetivamente.

Por observação dos resultados expressos na Tabela 8 é possível verificar que a variação dimensional diminui em função da severidade do tratamento térmico aplicado e que quanto mais alta a temperatura aplicada, menor é a variação dimensional. Na Tabela 9 apresentam-se os resultados obtidos para a mesma análise, nas mesmas amostras, mas para a direção tangencial.

É facilmente perceptível na Fig. 2, que ilustra a diferença entre a variação dimensional para a espécie de Pinho bravo não tratado e modificado às diferentes temperaturas, o aumento da estabilidade dimensional em função do aumento da severidade do tratamento térmico aplicado, sendo de salientar a diferença acentuada para as temperaturas de 180°C e 200°C.

Tabela 8 – Variação dimensional (%) – direção radial

Espécie	T_0	$T_{máx}$ (°C)		
		160	180	200
Pinho	6,53	6,41	5,29	5,13
	(3.44%)	(<2%)	(2.25%)	(7.48%)
Eucalipto	5,61	5,94	4,30	4,06
	(5.51%)	(16.10%)	(4.77%)	(7.36%)
Faia	6,24	7,25	7,40	4,49
	(4.65%)	(6.82%)	(7.12%)	(5.78%)
Freixo	7,38	7,40	7,44	4,97
	(4.91%)	(3.64%)	(3.25%)	(<2%)

Tabela 9 – Variação dimensional (%) – direção tangencial

Espécie	T_0	$T_{máx}$ (°C)		
		160	180	200
Pinho	10,06	9,97	7,80	7,22
	(3.38%)	(2.07%)	(4.24%)	(5.30%)
Eucalipto	8,74	7,79	4,76	4,81
	(4.22%)	(3.62%)	(2.57%)	(10.11%)
Faia	9,53	9,16	8,40	6,18
	(3.72%)	(4.98%)	(<2%)	(9.20%)
Freixo	9,06	6,08	8,37	5,34
	(7.46%)	(3.73%)	(8.25%)	(<2%)

3.3. Perda de massa

Na Tabela 10 apresenta-se a perda de massa das espécies de madeira consideradas,

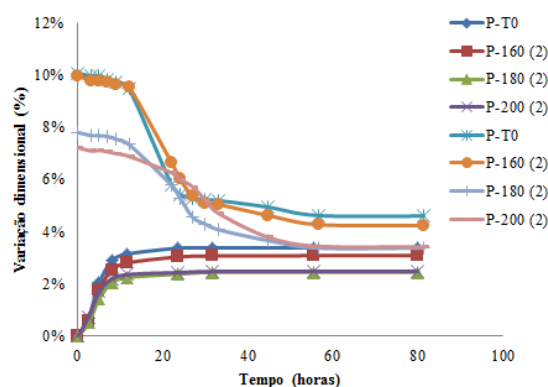


Fig. 2 – Variação dimensional na direção tangencial em função da temperatura utilizada no tratamento térmico, para Pinho bravo

Tabela 10 – Perda de massa em %, comparando os estados sem tratamento e modificado (em equilíbrio)

Espécie	$T_{máx}$ (°C)		
	160	180	200
Pinho bravo	0,09 (<2%)	2,16 (<2%)	6,96 (<2%)
Eucalipto	2,14 (<2%)	6,25 (<2%)	12,73 (2.45%)
Faia	0,00 (<2%)	2,07 (2.21%)	12,04 (<2%)
Freixo	0,33 (<2%)	2,01 (<2%)	9,58 (<2%)

após serem submetidas ao tratamento térmico a uma $T_{máx}$ de 160°C, 180°C e 200°C, durante duas horas.

Tal como esperado, a perda de massa em equilíbrio é tanto maior quanto a severidade ($T_{máx}$) do tratamento. Neste caso pode observar-se a influência que o aumento da $T_{máx}$ no tratamento térmico teve na perda de massa das amostras estudadas, chegando a ultrapassar os 10%. É de salientar que a espécie com menor perda de massa foi o Pinho bravo, revelando uma perda de massa inferior a 7% para um $T_{máx} = 200°C$.

Com o objetivo de verificar se a perda de massa se deve apenas à diminuição da higroscopicidade ou se também ocorre ao nível dos compostos constituintes da madeira, fez-se a mesma análise para o estado anidro. A determinação da perda de massa neste estado foi realizada segundo o procedimento descrito no ponto 2.2, mas, neste caso, foram medidas as massas no estado anidro, antes e após o tratamento térmico das mesmas amostras. Na Tabela 11 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 11 - Perda de massa anidra (%)

Espécie	$T_{máx}$ (°C)		
	160	180	200
Pinho bravo	0,00 (<2%)	1,01 (<2%)	4,70 (2,26%)
Eucalipto	1,24 (<2%)	4,38 (<2%)	9,77 (<2%)
Faia	0,00 (<2%)	0,73 (<2%)	9,84 (2,10%)
Freixo	0,00 (<2%)	0,47 (<2%)	7,22 (4,62%)

Foi possível verificar que a perda de massa, embora sempre menor quando comparada com as mesmas amostras em equilíbrio, é notada no estado anidro, confirmando-se a perda massa efetiva como resultado da degradação de compostos constituintes da madeira e não apenas devido à redução da higroscopicidade, motivada pela perda de água de adesão.

3.4. Flexão estática

Ainda na análise das propriedades mecânicas da madeira termicamente modificada foram submetidas vigas a ensaios de flexão estática (Fig. 3).

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados obtidos na determinação do E a diferentes temperaturas.



Fig. 3 – Ensaio de flexão estática sob 3 pontos de carga

Tabela 12 – E (kN/mm²) em flexão estática

Espécies	T_0	$T_{máx}$ (°C)			
		160	180	200	220
Pinho bravo	11,14 (13,5%)	11,25 (16,4%)	10,73 (17,2%)	9,50 (41%)	7,80 (0%)
Eucalipto	14,45 (5,5%)	15,37 (9,1%)	12,57 (14,9%)	14,07 (8,6%)	4,56 (0%)
Faia	11,91 (24,0%)	12,34 (18,5%)	9,62 (25,8%)	10,43 (20,2%)	8,14 (0%)

Tal como esperado, não ocorreu a diminuição direta do E nas diferentes espécies. Esta diminuição ocorreu de forma acentuada apenas para tratamentos térmicos

de modificação mais severos. Inicialmente ocorreu até um ligeiro aumento nos valores obtidos para esta propriedade.

Os resultados da tensão de rotura à tração por flexão, f , obtidos nos ensaios de flexão estática, para as mesmas espécies, apresentam-se na Tabela 13.

Na Fig. 4 pode analisar-se o comportamento das várias espécies analisadas. Da mesma forma que os valores revelam a diminuição da f , as linhas de tendência revelam o mesmo comportamento.

Tabela 13 – f por flexão estática (MPa)

Espécie	T_0	$T_{máx}$ (°C)			
		160	180	200	220
Pinho bravo	130 (21,5%)	127 (17,4%)	104 (12,2%)	76 (24,2%)	51 (<2%)
Eucalipto	129 (5,9%)	105 (21,7%)	86 (25,6%)	91 (13,9%)	<2%
Faia	134 (26,6%)	168 (6,5%)	124 (11,5%)	105 (21,6%)	<2%

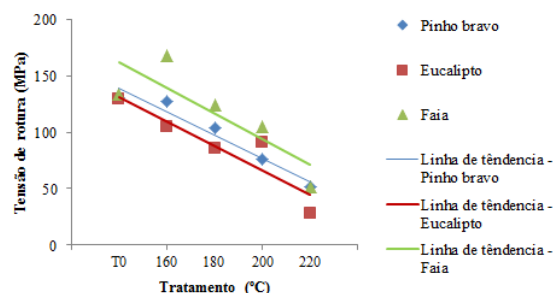


Fig. 4 – Tensão de rotura em flexão estática para Pinho, Faia e Eucalipto, não tratados e modificados a 160°C, 180°C, 200°C e 220°C.

Embora ocorra a diminuição da f , esta varia em função do tratamento térmico aplicado. Relativamente à espécie de Pinho, a diminuição da f para 160°C foi inferior a 2,5%, revelando um decréscimo praticamente inexistente. No entanto, para Eucalipto esta diminuição foi bem superior e aumentou em função da severidade do tratamento térmico aplicado. Relativamente à Faia, verificou-se até um aumento da f (25%), algo não corroborado pela bibliografia existente. Embora ocorra este aumento para um tratamento térmico pouco severo (160°C em 2 horas), após este os

valores diminuem, tal como no eucalipto e no Pinho, em função da severidade do tratamento térmico aplicado.

Na tentativa de estudar a influência do teor de água nas propriedades de flexão da espécie de Pinho bravo, foram submetidas a ensaio vigas modificadas termicamente em tratamento térmico industrial, com teor de água (TA) variável para determinação do E e da f . Para este estudo utilizaram-se 6 vigas com um TA estabilizado (colocadas numa câmara climática à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ durante um período não inferior a 20 dias) (P-TAE), 6 vigas com um TA elevado (aproximadamente 52%) (devido a imersão em água durante 48 horas, P-S) e com o TA baixo (aproximadamente 1%) (submetidas a secagem durante 48 horas, P-A). Para este estudo obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – E e f por flexão estática em função do teor de água (TA)

Pinho	TA (%)	E (kN/mm ²)	f (MPa)
P-TAE	12,15 (6.2%)	6,51 (22.8%)	57 (8.1%)
P-A	0,64 (7.5%)	12,30 (30.8%)	80 (23.4%)
P-S	52,04 (7.6%)	9,66 (22.7%)	54 (17.2%)

Seria de esperar um maior E e f das vigas com TA mais baixo, assim como menor E e f por parte das vigas com TA elevado. Este comportamento evidenciou-se relativamente à f e, embora não revelado por completo relativamente ao E , verificou-se um E mais elevado no estado anidro. Este comportamento revela que o TA a que a madeira termicamente modificada é aplicada poderá ter grande influência no desempenho mecânico de possíveis aplicações estruturais deste material.

3.5. Compressão axial

No estudo das propriedades mecânicas das espécies de Pinho e Eucalipto, foi realizado o estudo da influência da modificação térmica em amostras submetidas a ensaios de compressão axial (Fig. 5). Paralelamente, foram adquiridas amostras de Pinho termicamente modificado industrialmente (PM) a 208°C . Na Tabela 15

apresentam-se os resultados obtidos para este estudo, para as espécies de Pinho e Eucalipto.



Fig. 5 – Ensaio de compressão uniaxial.

Tabela 15 – Tensão de rotura por compressão axial (kN/m²).

$T_{m\acute{a}x}^\circ\text{C} / t_e$ horas	Espécies	
	Pinho bravo	Eucalipto
T_0	101 (5.7%)	205 (7.8%)
T_{160} (4)	155 (4.2%)	222 (12.5%)
T_{160} (8)	181 (7.9%)	232 (6.7%)
T_{180} (4)	143 (4.7%)	173 (16.0%)
T_{180} (8)	117 (8.6%)	180 (7.8%)
PM	150 (25.7%)	–

Observando os resultados apresentados na Tabela 15 verifica-se um aumento da tensão de rotura à compressão axial em ambas as espécies comparativamente com as mesmas sem tratamento. Para o Pinho termicamente modificado industrialmente, revelou-se também uma maior tensão de rotura, embora a respetiva configuração indicie um comportamento mais frágil.

3.6. Tempo de tratamento

Nas análises anteriores foi estudada a influência da temperatura na perda de massa e no TAE das várias espécies de madeira. Tal como previsto, os resultados não mostraram surpresas e o comportamento esperado revelou-se em consonância com a bibliografia existente, i.e., quanto mais severo o tratamento térmico utilizado, maior é a perda de massa e a diminuição do teor de água de equilíbrio. Na perspetiva de analisar o mesmo comportamento para uma determinada temperatura, variando a duração do tratamento térmico, foram repetidos alguns dos ensaios apresentados nos pontos

anteriores, considerando agora, adicionalmente, t_e de 4 e 8 horas para $T_{máx}$ de 160°C e 180°C, juntamente com as mesmas amostras dos pontos anteriores.

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos para os TAE de amostras de madeira de Pinho bravo e de Eucalipto, não tratados e submetidas a tratamentos térmicos a 160°C e 180°C durante 2, 4 e 8 horas. Tal como esperado, o tempo tem também influência significativa na diminuição do teor de água de equilíbrio das espécies de madeira estudadas, verificando-se que quanto maior o tempo de modificação, maior a diminuição do teor de água de equilíbrio. Esta variação é consistente nos tratamentos térmicos realizados a 160°C e a 180°C, verificando-se, uma vez mais, uma quebra superior quando comparados os resultados obtidos pelos tratamentos térmicos realizados a 180°C, comparativamente com os tratamentos térmicos realizados a 160°C.

Tabela 16 – Teor de água de equilíbrio para amostras de madeira tratadas a 160°C e 180°C (%).

$T_{máx}^{\circ}C / t_e$ horas	Espécies	
	Pinho bravo	Eucalipto
T_0	12,68 (<2%)	12,21 (<2%)
$T_{160} (2)$	12,04 (<2%)	11,18 (<2%)
$T_{160} (4)$	10,45 (<2%)	10,09 (<2%)
$T_{160} (8)$	10,22 (<2%)	9,63 (<2%)
$T_{180} (2)$	11,37 (<2%)	10,01 (2.24%)
$T_{180} (4)$	9,27 (<2%)	8,13 (<2%)
$T_{180} (8)$	7,20 (4.90%)	7,87 (<2%)

Da mesma forma que na análise em relação à temperatura, procedeu-se ao estudo da variação dimensional em relação à variável tempo. Na Tabela 17 apresentam-se os resultados obtidos para a análise da variação dimensional nas direções radial e tangencial a 160°C e 180°C com diferentes t_e para o Pinho bravo, utilizando como referência as mesmas amostras não tratadas dos pontos anteriores.

Tal como era esperado, a variação dimensional diminuiu, em ambas as direções (radial e tangencial), com o aumento do período de tratamento térmico aplicado às amostras.

Tabela 17 – Variação dimensional em função do tempo, para 160°C e 180°C, para o Pinho bravo.

Processo (°C/horas)	Pinho	
	Direção radial (%)	Direção tangencial (%)
T_0	6,53 (3.44%)	10,06 (3.38%)
$T_{160} (2)$	6,81 (<2%)	9,97 (2.07%)
$T_{160} (4)$	5,33 (4.40%)	9,15 (<2%)
$T_{160} (8)$	5,00 (4.92%)	8,96 (<2%)
$T_{180} (2)$	5,29 (2.25%)	7,80 (4.24%)
$T_{180} (4)$	4,46 (6.95%)	7,59 (2.09%)
$T_{180} (8)$	3,55 (4.79%)	5,81 (<2%)

Os resultados obtidos para esta análise estão em sintonia com a bibliografia existente e, tal como na primeira abordagem a 160°C e 180°C (2 horas), a variação dimensional diminui quanto mais prolongado é o tratamento térmico aplicado. Torna-se importante salientar que esta variação é também perceptível na comparação direta entre as diferentes temperaturas de modificação utilizadas, mesmo quando com diferentes durações.

Numa análise menos extensa, foi realizado o mesmo estudo para a espécie de Eucalipto. Na Tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos para as direções tangencial e radial, em tratamentos térmicos com duração de 4 e 8 horas.

Tabela 18 – Variação dimensional em função do tempo, para 160°C e 180°C, para o Eucalipto.

Processo (°C/horas)	Eucalipto	
	Direção radial (%)	Direção tangencial (%)
$T_{160} (4)$	9,66 (4.69%)	12,11 (4.13%)
$T_{160} (8)$	9,35 (3.54%)	11,62 (2.28%)
$T_{180} (4)$	8,20 (2.21%)	9,34 (2.31%)
$T_{180} (8)$	7,77 (5.26%)	8,83 (<2%)

Tal como revelado para a espécie de Pinho, o Eucalipto apresentou um comportamento semelhante: quanto maior a duração do tratamento térmico de tratamento menor a variação dimensional apresentada.

Numa fase seguinte, para as espécies de Pinho bravo e Eucalipto, os ensaios de flexão estática foram repetidos de forma a analisar a influência do aumento do tempo

de tratamento, para as temperaturas de 160°C e 180°C. Desta forma, fez-se a análise da variação da f para o Pinho e Eucalipto não tratados e submetidos a tratamentos térmicos durante 2, 4 e 8 horas, para as temperaturas de 160°C e 180°C, respetivamente (Tabela 19).

Na Fig. 6 pode analisar-se o comportamento das várias espécies analisadas, que revelam a diminuição da f em função do aumento do tempo de tratamento, mais notório para os tratamentos realizados a 180°C.

Tabela 19 – f por flexão estática (MPa).

Processo (°C/horas)	Pinho	Eucalipto
T_0	130 (21.5%)	129 (5.9%)
$T_{160}(2)$	127 (17.4%)	105 (21.7%)
$T_{160}(4)$	91.6 (17.1%)	119 (15.4%)
$T_{160}(8)$	92.4 (14.9%)	74 (36.3%)
$T_{180}(2)$	104 (12.2%)	86 (25.6%)
$T_{180}(4)$	49.3 (32.4%)	73.8 (45.4%)
$T_{180}(8)$	58.4 (18.1%)	78.6 (32.1%)

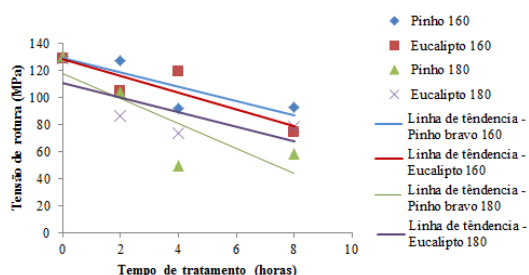


Fig. 6 – Tensão de rotura em flexão estática para Pinho e Eucalipto, não tratados e modificados a 160°C e 180°C durante 2, 4 e 8 horas.

Por análise dos resultados obtidos é possível constatar a constante diminuição da f em função do prolongamento do tempo de tratamento, não obstante uma diminuição mais acentuada para a espécie de eucalipto. A diminuição da f revelou-se consistente para ambas as temperaturas (160°C e 180°C) diminuindo em função do aumento do tempo de tratamento.

3.7.Avaliação complementar (Cor)

Em paralelo com todos os estudos realizados, foi possível constatar as

variações de coloração nos provetes submetidos à modificação térmica. Esta variação revelou-se bem expressiva nas várias espécies estudadas. Nas Figs. 7, 8, 9 e 10 apresenta-se a variação de coloração para tratamentos térmicos de 2 horas a 160°C, 180°C e 200°C, nas espécies selecionadas, relativamente à coloração da espécie sem tratamento (T_0).

Nas Figs. 11 e 12 apresenta-se a variação de cor para tratamentos térmicos de 2, 4 e 8 horas a 160°C e 180°C, nas espécies de Pinho bravo e Eucalipto, relativamente à coloração da espécie sem tratamento.

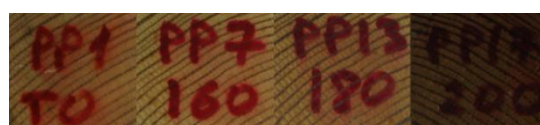


Fig. 7 – Variação da cor, Pinho bravo.



Fig. 8 – Variação da cor, Eucalipto.

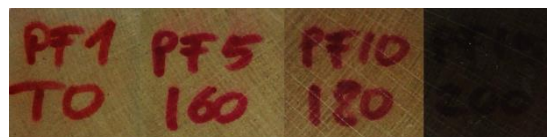


Fig. 9 – Variação da cor, Faia.



Fig. 10 – Variação da cor, Freixo.



Fig. 11 – Variação da cor (variável t_e), Pinho bravo.



Fig. 12 – Variação da cor (variável t_e), Eucalipto.

4. CONCLUSÃO

A modificação térmica influencia as propriedades físicas e mecânicas da madeira. O TAE diminui em função da severidade do tratamento térmico aplicado e a estabilidade dimensional é melhorada quanto maior a severidade do tratamento térmico aplicado. Ao mesmo tempo, o E não sofre uma diminuição imediata, ao contrário disso, para o tratamento térmico a 160°C (2 horas) até aumenta, diminuindo depois com o progressivo aumento da severidade do tratamento térmico aplicado. Tal como esta propriedade, a f apresenta também uma diminuição em função do tratamento térmico aplicado. Estas propriedades diminuem, tanto em função da temperatura, como do tempo utilizados no tratamento térmico. Fazendo uma análise mais pormenorizada, no caso do Pinho bravo tratado a 160°C a perda de resistência foi inferior a 3%, logo para qualquer classe de resistência em questão, não iria ocorrer nenhuma mudança. No entanto, para o tratamento a 180°C a diminuição foi de 20%, sendo que neste caso para uma classe C30, esta seria classificada (após o tratamento) como C24, ainda viável para aplicações estruturais. Realizando a mesma análise para a Faia, a perda de resistência quando tratada a 180°C foi de 7,5%. Desta forma, mesmo atuando pelo lado da segurança e diminuindo (por ex.) da classe D35 para a classe D30, mesmo após tratamento seria possível utilizar esta madeira para aplicações estruturais.

Ainda relativamente ao estudo das propriedades mecânicas, foi possível verificar-se um aumento da tensão de rotura à compressão axial comparativamente com as mesmas espécies não tratadas.

Foi possível, ainda, verificar a influência do teor de água nas propriedades mecânicas de Pinho tratado industrialmente a 208°C. Tal como a madeira não tratada, obtiveram-se E e f mais elevados para teores de água mais baixos, assim como E e f mais baixos para teores de água mais altos. Tal como previsto, para o TAE destas mesmas amostras obtiveram-se valores intermédios entre os dois estados.

5. REFERÊNCIAS

- Boonstra, M. (2008) A two-stage thermal modification of wood, *Ph.D. thesis in applied biological sciences: soil and forest management*. Henry Poincaré University-Nancy, France.
- Boonstra, M., Tjeerdsma, B., Groeneveld, H. (1998) Thermal modification of non-durable wood species 1. The Plato technology: thermal modification of wood, International Research Group Wood Pro, section 4: processes. 29 Annual meeting, Maastricht, June 14–19, p 13.
- Boonstra, M., Van Acker, J., Kegel, E., Stevens, M. (2007) Optimisation of a two-stage heat treatment process. Durability aspects. *Wood Sci Technol* 41(1):31–57.
- Esteves, B. Domingos, I., Pereira, H. (2013). Comparison between heat treated sapwood and heartwood from Pinus pinaster. *Eur. J. Wood Prod.* DOI: 10.1007/s00107-013-0751-y.
- Esteves, B. Domingos, I., Pereira, H. 2007b. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C, *Forest Products Journal*, 57 (1/2), 47-52.
- Esteves, B. Velez Marques, A. Domingos, I. e Pereira, H. 2008 Heat induced colour changes of pine (Pinus pinaster) and eucalypt (Eucalyptus globulus) wood. *Wood Science and Technology*. 42(5) 369-384. DOI : 10.1007/s00226-007-0157-2.
- Esteves, B. Domingos, I. Velez Marques, A. Nunes, L. e Pereira, H. 2006. Variation of Dimensional Stability and Durability of Eucalypt Wood by Heat Treatment. *ECOWOOD 2006, 2nd International Conference on Environmentally compatible Forest Products*. Fernando Pessoa University, Porto, Portugal.
- Esteves, B. e Pereira, H. 2009. Wood modification by heat treatment: a review, *BioRes.* 4(1), 370-404.
- Esteves, B. Velez Marques, A. Domingos, I. e Pereira, H. 2007a. Influence of steam heating on the properties of pine (Pinus pinaster) and eucalypt (Eucalyptus globulus) wood, *Wood Sci. Technol.* 41: 193-207 DOI : 10.1007/s00226-006-0099-0.
- Finnish ThermoWood Association. (2003). *ThermoWood® Handbook*.
- FP904, C. A. (2011). Mechano-Chemical transformations of wood during Thermo-

- Hydro-Mechanical processing. *COST ATION FP0904*. Switzerland.
- Hill, C. A. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons, Ltd.
- ISO 3130 (1975) Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. *International Organization for Standardization*.
- ISO 3133 (1975) Wood - Determination of ultimate strength in static bending. *International Organization for Standardization*.
- Jämsä, S. e Viitaniemi, P. 2001. Heat treatment of wood – Better durability without chemicals, Proceedings of special seminar held in Antibes, France.
- Kim, G. Yun, K. e Kim, J. 1998. Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood, *Material und Organismen* 32 (2): 101-108.
- Modification, T. T. (2007). The Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom.
- NP 615 (1973) Determinação da retração.
- NP 618 (1973) Ensaio de compressão axial.
- Pentti Ek, S. J. (1993). *Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. Patente N.º EP0695408 A1*.
- Tjeerdsma, B. Boonstra e M. Militz, H. 1998. Thermal modification of nondurable wood species: improved properties of thermally treated wood, International Research Group on Wood Preservation, document N° IRG/WP 98-40124.
- Viitaniemi, P. Jämsä, S. e Viitanen, H. 1997. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products, United States Patent N° 5678324 (US005678324).
- Kubojima, Y. Okano, T. e Ohta, M. 2000. Bending strength of heat-treated wood, *Journal of Wood Science* 46: 8-15.
- Yutaka Ishimaru, K. A. (2000). Changes in the mechanical properties of wood during a period of moisture conditioning. *Wood science and technology*.
- Yutaka Ishimaru, K. A. (2000). Physical and mechanical properties of wood after water conditioning. *Wood science and technology*.
- Juanito P. Jimenez, J. M. (2011). Physico-Mechanical Properties and Durability of Thermally Modified Malapapaya [*Polyscias nodosa* (Blume) Seem.] Wood. *Philippine Journal of Science* 140 (1): 13-23.
- E22, C. A. (2001). Environmental optimisation of wood protection. *COST ATION E22 - Review on heat treatments of wood*. France.