

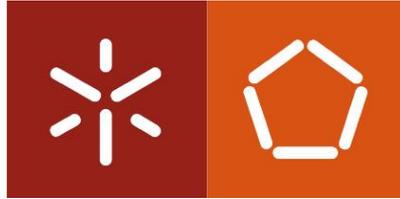
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rui Manuel Lopes de Sousa

**Avaliação Experimental da Estabilidade
Dimensional de Elementos em Pinho
Bravo e Madeira Tratada Termicamente**

26 de Novembro de 2012



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

**Avaliação Experimental da Estabilidade
Dimensional de Elementos em Pinho
Bravo e Madeira Tratada Termicamente**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Construção e Reabilitação
Sustentáveis

Trabalho efectuado sob a orientação do

Professor Doutor Jorge Branco

26 de Novembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Branco, o meu agradecimento pela permanente disponibilidade e rigor que contribuíram para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Às empresas Banema e AOF pela disponibilidade e fornecimento das espécies de madeira necessárias e fundamentais para o trabalho experimental.

À minha família, pelo apoio incondicional, pela confiança e paciência que demonstraram ao longo deste processo de formação.

RESUMO

A madeira é um material higroscópico, cujas propriedades físicas e mecânicas dependem do seu teor de água. Sendo um material natural exibe uma heterogeneidade significativa e por ter uma estrutura celular, apresenta uma anisotropia acentuada.

Pretende-se com este trabalho avaliar a influência do teor de água na estabilidade dimensional da madeira mais comum em Portugal (Pinho bravo) e de uma madeira tratada termicamente. Nesta avaliação está integrada a variação da massa e a variação das dimensões no sentido radial e tangencial do lenho.

A metodologia utilizada é baseada nas normas portuguesas NP 614 – Determinação do teor de água e NP 615 – Determinação da retração.

A madeira tratada termicamente apresenta resultados vantajosos no que respeita à relação entre teor de água e instabilidade dimensional, na direcção radial e tangencial, quando comparado com o Pinho bravo. Para além dos provetes da Madeira tratada termicamente serem de maior dimensão, absorvem a mesma percentagem de água que o Pinho e apresentam deformações até 3,3% inferiores.

O envelhecimento da madeira é perceptível tanto na Madeira tratada termicamente como no Pinho bravo, sendo o Pinho bravo aquele que apresenta uma maior diferença relativamente ao seu aspeto inicial.

Palavras-Chave: Madeira; Higroscopicidade; Pinho bravo; Madeira tratada termicamente; Estabilidade dimensional.

ABSTRACT

Wood is a hygroscopic material whose physical and mechanical properties depend on its water content. Being a natural material exhibits significant heterogeneity and having a cellular structure, presents a pronounced anisotropy.

The aim of this study was to evaluate the influence of water content in the dimensional stability of the wood more common in Portugal (*Pinus pinaster*, Ait) and modified wood. This review is the integrated mass variation and the variation of the dimensions in the radial and tangential wood.

The methodology is based on standards Portuguese NP 614 - Determination of water content and NP 615 - Determination of shrinkage.

The thermic treated wood gives advantageous results regarding the relationship between water content and dimensional instability in the radial and tangential direction as compared with the *Pinus pinaster*, Ait. Although the pieces of thermic treated wood are larger, they absorb the same percentage of water than Pine and are deformed up to 3.3% lower.

The aging of the wood is perceptible in both thermic treated wood as the wild Pine, and the pine mad one that has a greater difference with respect to its initial shape.

Keywords: Wood; Hygroscopicity; *Pinus pinaster*, Ait; Madeira tratada termicamente; Dimensional Stability.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos propostos	1
1.3	Conteúdo e organização da dissertação	2
2	ESTADO DO CONHECIMENTO	3
2.1	Madeira na construção civil	3
2.2	Estrutura microscópica da madeira	6
2.3	Características macroscópicas	7
2.3.1	Estrutura interna	7
2.3.2	Características gerais da madeira	8
2.4	Variabilidade da madeira	9
2.5	Defeitos da madeira	9
2.6	Anisotropia	11
2.7	Água na madeira	12
2.8	Propriedades da madeira	14
2.8.1	Teor de água de equilíbrio.....	15
2.8.2	Densidade. Massa volúmica	16
2.8.3	Retração e expansão.....	18
2.8.3.1	Secagem da madeira	20
2.8.3.2	Medição da retração.....	22
2.8.4	Dilatação térmica	24
2.8.5	Condutibilidade térmica.....	24
2.9	Propriedades mecânicas da madeira	25
2.9.1	Resistência à compressão, à tração e à flexão	25
2.9.2	Fluência e fadiga.....	26
2.9.3	Comportamento ao fogo.....	26

2.10	Madeiras modificadas.....	26
3	TRABALHO EXPERIMENTAL	31
3.1	Materiais e Equipamento.....	31
3.2	Procedimentos de ensaio	32
3.3	Resultados	33
3.3.1	Madeira tratada termicamente	34
3.4	Pinho Bravo	38
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	42
4.1	Teor de Água (H).....	42
4.2	Varição Radial	43
4.3	Varição Tangencial	45
5	CONCLUSÕES GERAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	47
5.1	Desenvolvimentos futuros.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Aplicação estrutural: Cobertura do Pavilhão Atlântico, Lisboa; e (b) Aplicação não estrutural: revestimento interior de habitação	3
Figura 2 – (a) e (c) Madeiras resinosas (b) e (d) madeiras folhosas [adaptado de (Martins & Araújo, 2005)].....	4
Figura 3 – Origem da madeira: (a) florestas nativas; e (b) florestas plantadas	5
Figura 4 – Tipos de corte: (a) Corte de extremo a extremo; (b) Corte simples; (c) Corte em quartos radia; e (d) corte em quartos. [Adaptado de (Correia, 2001)].....	5
Figura 5 – Estrutura microscópica da madeira: (a) coníferas; e (b) folhosas [adaptado de (Stamato & Góes, s.d.)].....	7
Figura 6 – Cerne e Borne	7
Figura 7 – Defeitos na madeira: (a) nó; e (b) podridão.....	10
Figura 8 – Anisotropia da madeira (Stamato & Góes, s.d.)	11
Figura 9 – Teor de água na madeira (Stamato & Góes, s.d.)	13
Figura 10 – Determinação do teor de água de equilíbrio (Machado, 2006).....	16
Figura 11 – Ábaco de Kollman – Efeito do teor de água na densidade da madeira	17
Figura 12 – Empenos (LNEC, 1997)	18
Figura 13 – Coeficientes de retração (Carvalho, 1996)	19
Figura 14 – Secagem da madeira: (a) ao ar livre; e (b) em estufa	20
Figura 15 – Energia necessária para a retirada da água presente na madeira (Klitzke, s.d.) ..	21
Figura 16 – Resistência Vs. teor de água (Silva, 2009)	22
Figura 17 – Dispositivo para medição da retração (obtido de LNEC NP615:1973)	22
Figura 18 – Comportamento estrutural da madeira [obtido de (Stamato & Góes, s.d.)]	25
Figura 19 – Processo Madeira tratada termicamente (Finnish Thermowood Association, 2003)	27
Figura 20 – Geometria dos provetes: (a) Madeira tratada termicamente; (b) Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> , ait).....	31
Figura 21 – Equipamentos: (a) paquímetro digital; (b) balança KERN PLS 4000-2 e (c) exsiccador com sílica	32
Figura 22 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) (Madeira tratada termicamente).....	34
Figura 23 – Variação dimensional nas direcções radial (a) e tangencial (b) em função do tempo (Madeira tratada termicamente).	35

Figura 24 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) (Madeira tratada termicamente).....	35
Figura 25 – Variação dimensional nas direcções: (a) radial e (b) tangencial, em função do tempo (Madeira tratada termicamente)	36
Figura 26 – Curvas teor de humidade – tempo: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros .	37
Figura 27 – Variação dimensional na direcção radial: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros	37
Figura 28 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) Pinho bravo.	38
Figura 29 – Variação dimensional nas direcções radial (a) e tangencial (b) em função do tempo (Pinho bravo).....	39
Figura 30 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) Pinho bravo.	39
Figura 31 – Variação dimensional nas direcções: (a) radial e (b) tangencial, em função do tempo (Pinho bravo).....	40
Figura 32 – Curvas teor de humidade – tempo: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros .	40
Figura 33 – Variação dimensional na direcção radial: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros	41
Figura 34 – Curvas teor de água – tempo.....	42
Figura 35 – Curvas teor de água – tempo.....	42
Figura 36 – Variação dimensional na direcção radial em função do tempo.	43
Figura 37 – Variação dimensional na direcção radial em função do tempo.	43
Figura 38 – Variação dimensional na direcção tangencial em função do tempo.	45
Figura 39 – Variação dimensional na direcção tangencial em função do tempo.	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Massa volúmica do Pinho bravo (LNEC, 1997) e da madeira tratada termicamente	18
Quadro 2 – Coeficiente de retração unitária do Pinho bravo (LNEC,1997)	20
Quadro 3 – Alterações dimensionais da Madeira tratada termicamente em comparação com o Pinho não tratado	28
Quadro 4 – Madeira tratada pelo processo Thermowood® (Esteves, Machado, & Nunes, 2011)	28
Quadro 5 – Nomenclatura do programa experimental.....	34
Quadro 6 – Valores médios do coeficiente de retração radial.....	44
Quadro 7 – Valores médios do coeficiente de inchamento radial	44
Quadro 8 – Valores médios do coeficiente de retração tangencial.....	46
Quadro 9 – Valores médios do coeficiente de inchamento tangencial	46

SIMBOLOGIA

H	Teor de água da madeira
m_1	Massa do provete húmido
m_2	Massa do provete completamente seco
ρ_H	Densidade. Massa volúmica
m_H	Massa do provete com um determinado teor de água
V_H	Volume do provete com um determinado teor de água
ε	Retração linear
l_1	Dimensão numa dada direção do provete saturado
l_2	Dimensão, na mesma direção, do provete seco ao ar
l_3	Dimensão na mesma direção com o provete seco ($H=0\%$)
α	Coefficiente de retração linear
ε_v	Retração volumétrica
ε_a	Retração volumétrica na direção axial
ε_r	Retração volumétrica na direção radial
ε_t	Retração volumétrica na direção tangencial
v_1	Volume do provete saturado
v_2	Volume da peça seca ao ar
v_3	Valor do provete totalmente seco
S	Teor de saturação das fibras
α_l	Dilatação térmica linear
L_0	Comprimento do provete à temperatura ambiente
ΔL	Varição do comprimento do provete entre a temperatura ambiente e 100°C
Δt	Varição da temperatura
K	Condutibilidade térmica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A madeira é uma matéria-prima importante e versátil em vários setores da atividade humana podendo ser aplicada em diversas situações. É um material produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas, orgânico, sólido e de composição complexa. É naturalmente resistente e relativamente leve, sendo frequentemente utilizado na construção civil para fins estruturais e não estruturais.

O desenvolvimento tecnológico mundial da madeira quer a nível estrutural como não estrutural, cresceu substancialmente nas últimas décadas. Consequência disso, a industrialização das construções em madeira tem, igualmente, aumentado. A aplicação da madeira como material estrutural exige um domínio do conhecimento da sua estrutura interna relativamente aos seus diferentes tipos. Paralelamente, o melhor conhecimento das propriedades da madeira permite prever novas perspectivas para um maior e mais efetivo emprego da madeira no setor da construção civil. Em lado oposto, o desconhecimento dessas propriedades por muitos dos seus usuários pode ser uma das maiores causas de desempenho insatisfatório da madeira relativamente a outros materiais.

A madeira é um material higroscópico, sendo que várias das suas propriedades são condicionadas pelo teor de água presente, apresenta grande variabilidade, resultado da sua origem biológica, exibe uma heterogeneidade significativa e uma anisotropia acentuada.

Por estas razões é de especial interesse a identificação e o conhecimento das características anatómicas das espécies de madeira nas peças que posteriormente serão usadas para diversos fins na construção. Portanto, na escolha correta da madeira para um determinado uso, deve-se considerar quais as propriedades e os respetivos níveis requeridos para que a esta possa ter um desempenho satisfatório. Adicionalmente, o melhor conhecimento das propriedades da madeira permite prever novas perspectivas para um maior e mais efetivo emprego da madeira na construção civil.

1.2 Objetivos propostos

Pretende-se com este trabalho avaliar a influência da água na estabilidade dimensional da madeira mais comum em Portugal, o Pinho bravo, e numa madeira tratada, a Madeira tratada

termicamente. Nesta avaliação está integrada a variação da massa e ainda a variação das dimensões no sentido radial e tangencial.

A metodologia utilizada é baseada nas normas portuguesas NP 614 – Determinação do teor de água e NP 615 – Determinação da retração e ponto de saturação das fibras.

1.3 Conteúdo e organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. No capítulo 1 aparece a introdução onde são apresentadas considerações gerais acerca do uso da madeira na construção e os objetivos a que esta dissertação se propõe

No capítulo 2 encontra-se o estado do conhecimento onde se identificam as bases teóricas nas quais todo o processo experimental se apoia.

O capítulo 3 apresenta a metodologia experimental adotada de forma a obter bons resultados

No 4º capítulo apresentam-se os resultados e correspondente discussão.

Por último o capítulo 5 envolve as conclusões gerais e a apresentação de possíveis desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Madeira na construção civil

Desde os tempos mais remotos que a madeira tem vindo a ser utilizada pelo Homem quer nas civilizações primitivas, quer nas desenvolvidas, no oriente ou ocidente, para a construção de abrigos e utensílios. Sendo a madeira fácil de trabalhar, o ser humano viu neste material uma fonte de intermináveis aptidões. Ao longo dos tempos, até aos dias de hoje, têm-se desenvolvido estudos com o intuito de se conhecer o seu comportamento quando sujeita, por exemplo, às condições ambientais. Desta forma, à medida que o conhecimento adquirido aumenta, torna-se cada vez mais importante explorar as potencialidades deste material, promovendo o seu correto uso de forma a obter os melhores resultados nas suas aplicações. A Figura 1 mostra algumas das aplicações da madeira na construção civil, apresentando um exemplo de aplicação estrutural e um outro exemplo de aplicação não estrutural.

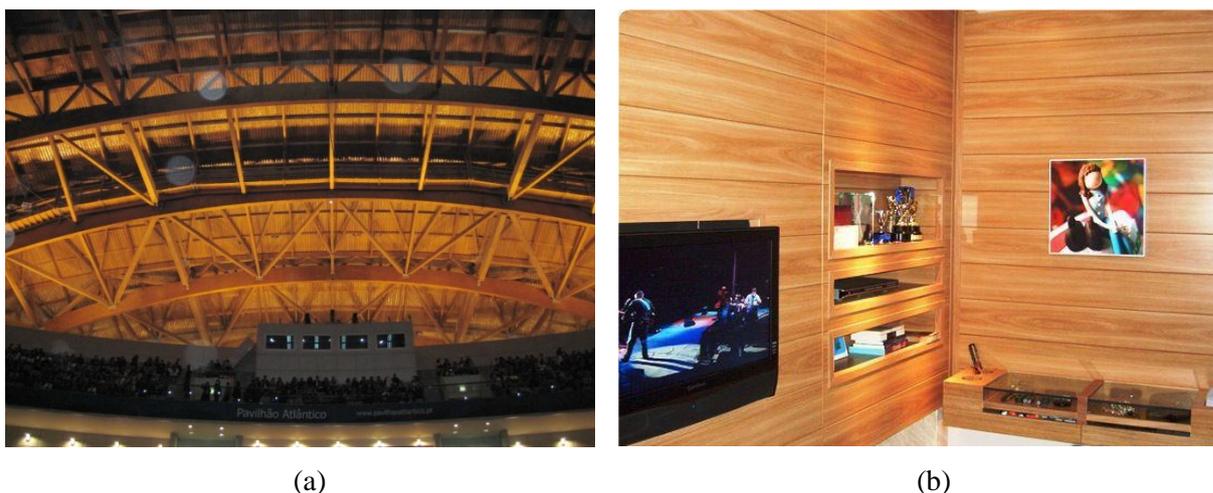


Figura 1 – (a) Aplicação estrutural: Cobertura do Pavilhão Atlântico, Lisboa; e (b) Aplicação não estrutural: revestimento interior de habitação

A variabilidade das propriedades físicas e mecânicas da madeira dentro de uma mesma espécie e entre espécies dificulta a seleção da espécie de madeira com melhor potencial para determinada aplicação. As espécies de madeira mais comuns no mercado português e que são usadas em estruturas de madeira estão divididas em dois tipos. São eles:

- Resinosas (Figuras 2a e 2c) – abeto branco ou Pinho abeto; espruce; casquinha; Pinho bravo; Pinho larício; Pinho americano; e Pinho do oregão.
- Folhosas (Figuras 2b e 2d) – câmbala; carvalho; eucalipto; castanho; teca; ipê.

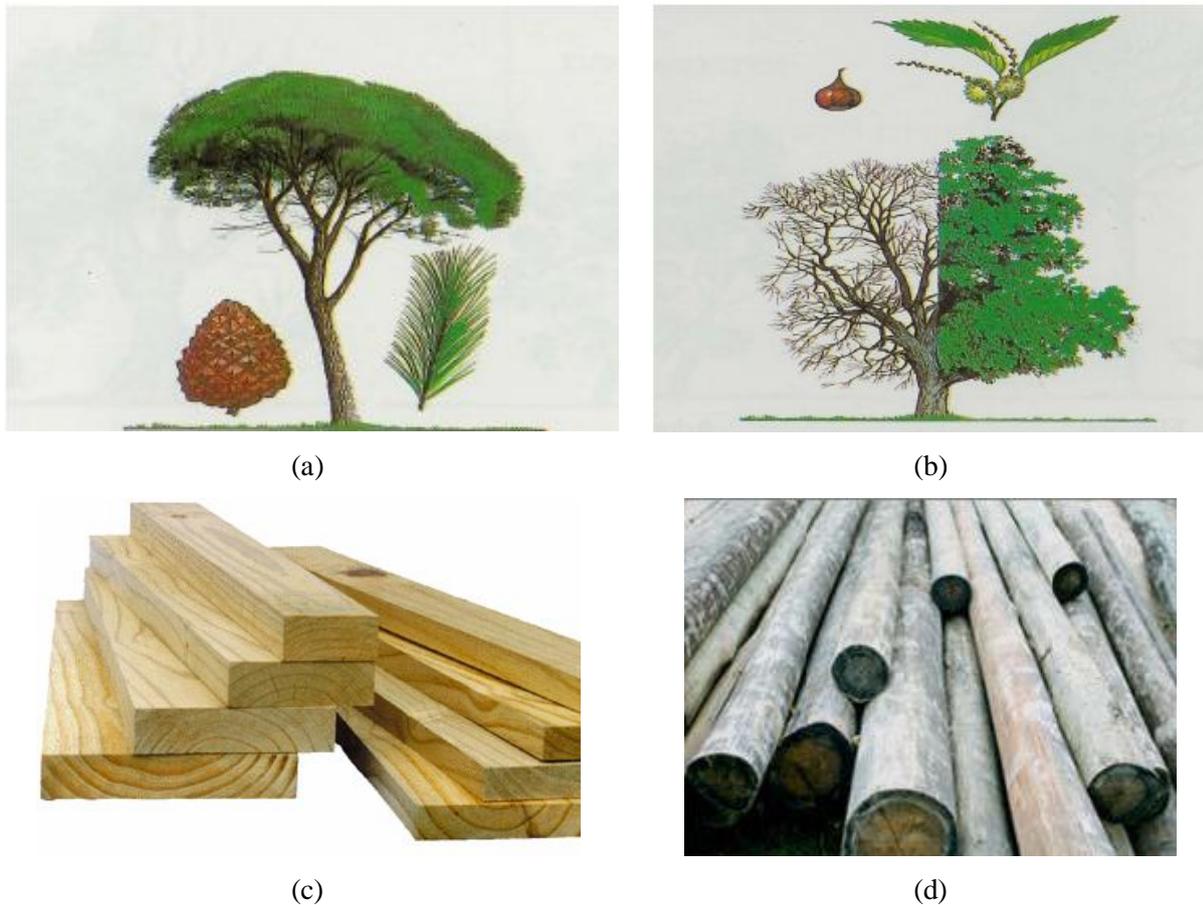


Figura 2 – (a) e (c) Madeiras resinosas (b) e (d) madeiras folhosas [adaptado de (Martins & Araújo, 2005)]

Estas espécies distinguem-se pela sua densidade, resistência, durabilidade natural e, conseqüentemente, pelo seu campo de aplicação. As madeiras resinosas, chamadas de madeiras brandas, por regra geral, são relativamente macias e fáceis de trabalhar. Contêm naturalmente resina, são próprias das zonas frias e temperadas e representam as espécies mais usadas na construção. Contudo, usualmente, apresentam uma durabilidade natural inferior. Já as madeiras folhosas, próprias de zonas temperadas tropicais, também designadas por madeiras duras, são normalmente mais resistentes e densas que as madeiras resinosas.

A madeira possui diversas propriedades que a tornam agradável quando comparada com outros materiais. De acordo com a bibliografia existente pode-se enumerar um conjunto de vantagens e desvantagens decorrentes do uso da madeira. Destaca-se pela positiva a elevada resistência mecânica (tração e compressão) que a tornam ideal para aplicações estruturais e a baixa massa específica da madeira (650kg/m^3), comparativamente com o betão armado (2500 kg/m^3), o aço (7850 kg/m^3) ou o alumínio (2700 kg/m^3), possibilitando assim construções leves. A madeira apresenta ainda uma baixa condutibilidade térmica

Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho bravo e Madeira tratada termicamente

($\lambda=0,18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), característica importante, por exemplo, em aplicações construtivas em climas frios. O baixo custo, a grande diversidade de tipo e a abundância são outros aspetos positivos do uso da madeira na construção civil. De facto, relativamente ao último ponto enunciado, as florestas europeias (Figura 3) são capazes de atender à procura de madeira para a construção na Europa (Mahapatra & Gustavson, 2009). Dado o posicionamento da União Europeia (UE) como principal consumidor e produtor florestal foram introduzidas políticas de exploração sustentável nos principais países produtores e exportadores, no entanto é expectável que circule no espaço europeu madeira ilegal (Montezuma, 2010).



Figura 3 – Origem da madeira: (a) florestas nativas; e (b) florestas plantadas

É de destacar ainda que, a madeira é um material natural de fácil obtenção, facilmente cortada nas dimensões e formas exigidas (Figura 4); é um material que se renova naturalmente e é reciclável na sua totalidade.

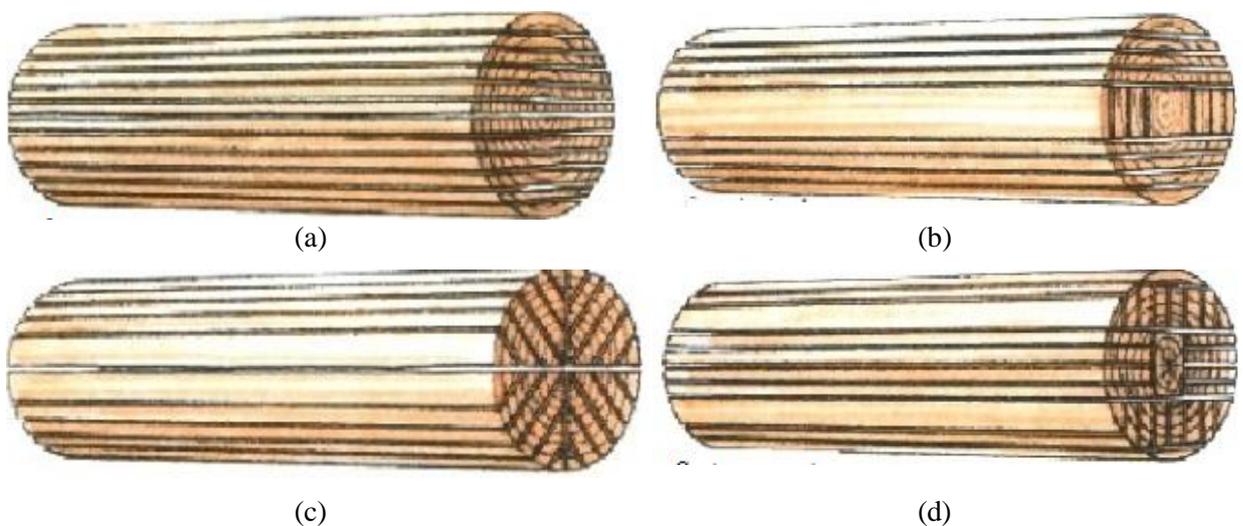


Figura 4 – Tipos de corte: (a) Corte de extremo a extremo; (b) Corte simples; (c) Corte em quartos radia; e (d) corte em quartos. [Adaptado de (Correia, 2001)]

Apesar deste conjunto de vantagens fazer supor que a madeira se trata do material ideal e completamente perfeito para se utilizar na construção civil, tal suposição pode ser atenuada com a apresentação de algumas características que representam aspetos menos positivos. Destacam-se a sua higroscopicidade; a sua suscetibilidade ao fogo; a sua propensão à deterioração por agentes biológicos e atmosféricos; anisotropia e heterogeneidade da estrutura. É de destacar, ainda, a sua alteração dimensional de acordo com a humidade e temperatura dos locais onde está inserida; a tendência para o aparecimento de fendas e, com o passar dos anos, sofrer deformações importantes e muitas vezes irreversíveis através do fenómeno da fluência.

2.2 Estrutura microscópica da madeira

A nível microscópico a madeira é constituída por células, denominadas fibras, cujas funções são diversificadas – transporte de substâncias, armazenamento de nutrientes, entre outros – e cuja disposição ocorre funcionalmente em consonância com o desenvolvimento da árvore.

Ao microscópio, distinguem-se duas formações básicas nas resinosas: os traqueídeos e os raios medulares - Figura 5-a. Os traqueídes são células alongadas podendo constituir até 95% da madeira das coníferas cuja função, segundo a bibliografia existente, é conduzir a seiva bruta (seiva presente no borne) e conferir resistência mecânica ao tronco Silva (2009). Os traqueídeos são também designados tecnicamente por fibras. Além dos traqueídeos existem também os raios lenhosos que se desenvolvem radialmente que conduzem ou simplesmente nutrientes no sentido radial do tronco.

Já as madeiras folhosas, quando observadas ao microscópio, apresentam três elementos básicos: os vasos, as fibras e os raios medulares - Figura 5-b. De acordo com (Silva, 2009) os vasos são células alongadas, com secção transversal arredondada e vazada. Podem constituir até 50% da madeira e tem a função de transporte ascendente da seiva bruta. As fibras são células alongadas, fechadas, não possuindo comunicação através das extremidades. Dependendo da espécie da madeira, as fibras podem conferir até 50% da madeira das folhosas, sendo as principais responsáveis pela sua resistência mecânica e pela sua rigidez.



Figura 5 – Estrutura microscópica da madeira: (a) coníferas; e (b) folhosas [adaptado de (Stamato & Góes, s.d.)]

2.3 Características macroscópicas

2.3.1 Estrutura interna

A madeira é um dos produtos mais valiosos que as árvores oferecem. É um material originário do tecido vegetal com características intrínsecas definidas pela fisiologia da árvore.

Segundo uma análise macroscópica, a madeira constitui a maior parte do tronco da árvore que é composto por, para além de outras, duas zonas fundamentais – o *cerne* e o *borne* – como pode ser entendido através da Figura 6.

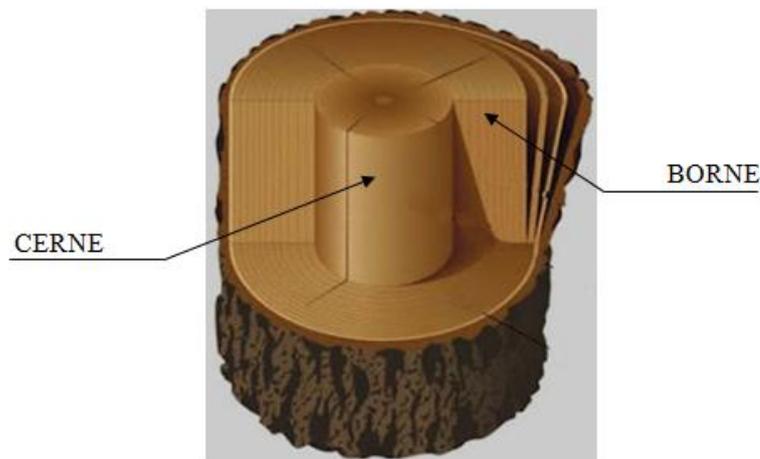


Figura 6 – Cerne e Borne

O *cerne*, palavra com a mesma origem etimológica que núcleo é a designação dada à parte do tronco que já não participa de forma ativa na condução de água por ser constituída por células mortas. O *cerne* assume uma função, essencialmente, de suporte mecânico da estrutura da

planta. Em corte transversal do tronco (Figura 6) pode observar-se que o cerne forma um círculo interior. No que se refere ao seu diâmetro, possui a característica de diminuir a sua dimensão ou largura à medida que se caminha em direção ao cume da árvore.

Por sua vez, o *borne* é a porção viva da árvore ao longo do qual se processa a circulação da água e de nutrientes. Sendo essa zona constituída por células vivas, o borne, apresenta, geralmente, coloração mais clara rodeando a porção interior de cor mais escura, o cerne.

Com base nisto podemos dizer que, a madeira começa por ser madeira de borne que, com o passar dos anos, transforma-se em madeira de cerne.

A maior ou menor presença de cerne no tronco de uma árvore é, frequentemente, um critério de seleção da madeira como matéria-prima para determinado fim (Gominho, Knapic, & Pereira, s.d.). Pelo fato de o cerne apresentar uma densidade mais elevada que a do borne, talvez devido à sua maior concentração de substâncias que lhe conferem maior massa volúmica, este constitui a parte mais importante do tronco para aplicações exteriores ou em ambientes húmidos devido à sua durabilidade natural e à menor permeabilidade. Assim, a maior presença de cerne é um fator de valorização quando se pretende usar madeira para a atividade de construção. A título de curiosidade, a diminuta presença de cerne poderá ser desejável quando o fim a que se pretende dar à madeira é a produção de pasta de papel.

O cerne e o borne formam a camada globalmente denominada por lenho, responsável assim pela sustentação e resistência da madeira e é onde circula a seiva bruta.

2.3.2 Características gerais da madeira

Dada a diversidade das espécies de madeira, este material apresenta grande diversidade de características diferenciadoras que pode determinar os usos da madeira. Entre estas características, enumera-se a/o :

- **Cor** – deriva das substâncias químicas presentes no tronco e varia de acordo com o teor de humidade, normalmente tomando um aspeto mais escuro quando exposta ao ar, ao sol, quando em contato com certos metais ou quando atacada por certos fungos e bactérias. A cor tende a alterar-se com o passar do tempo;
- **Cheiro** – o odor característico de algumas madeiras é resultado da presença de certas substâncias voláteis que se concentram principalmente no cerne.
- **Gosto** – o gosto é originário das mesmas substâncias que dão cheiro às madeiras;

- **Fio** – corresponde à orientação dos elementos verticais constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore. As orientações são influenciadas durante o crescimento da árvore;
- **Grão** – impressão visual produzida pelos poros da madeira, podendo ser grosso, médio ou fino;
- **Textura** – depende das dimensões, da distribuição e percentagem dos diversos elementos estruturais constituintes do lenho no seu conjunto;
- **Brilho** – depende da intensidade dos raios medulares. A faixa longitudinal radial é sempre a mais reluzente;
- **Desenho** – corresponde à aparência natural das faces da madeira resultante das várias características macroscópicas.

2.4 Variabilidade da madeira

A madeira é um material natural resultante do crescimento de um ser vivo, portanto as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira podem variar. Define-se, pela literatura, três fatores de variabilidade da madeira: variabilidade entre espécies (Interespecífica); variabilidade que ocorre dentro das mesmas espécies (Intraespecífica); e a variabilidade dentro de cada árvore.

A variabilidade natural entre espécies designa-se apenas às diferenças genéticas. Por sua vez, a variabilidade que ocorre entre a mesma espécie pode dever-se quer à genética, quer a fatores característicos do meio ambiente como, por exemplo, o clima, o solo, o fornecimento de água, a disponibilidade de nutrientes e a exposição à luz solar. O último fator, correspondente à variabilidade que se verifica no interior de cada árvore, é devido principalmente aos fatores do meio ambiente que condicionam o seu comportamento específico.

2.5 Defeitos da madeira

De acordo com uma publicação disponível pela empresa portuguesa *Madeidura – Valorização de madeira, Lda*¹, defeitos da madeira definem-se como: “toda e qualquer irregularidade, descontinuidade ou anomalia estrutural, alteração química ou de coloração, modificação morfológica do fuste ou das peças, originada durante a vida da árvore, na exploração e transporte da madeira, na conversão primária, na secagem, na preparação e noutras operações

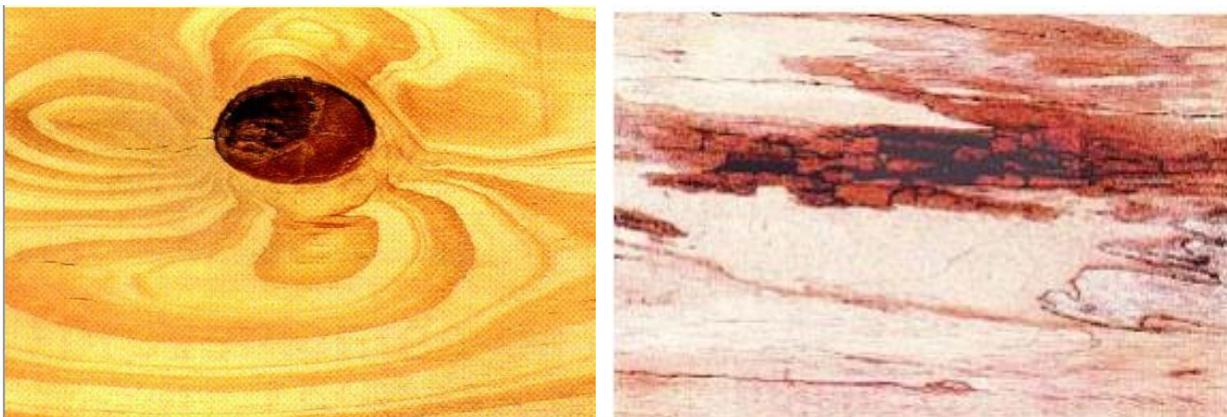
¹ <http://www.madeidura.com/publicacoes/caracteristicas-e-propriedades-da-madeira> consultado em Setembro de 2012

tecnológicas, sempre que qualquer um desses aspetos comprometa o valor intrínseco da madeira.”

Assim sendo, é considerado um defeito qualquer irregularidade ou imperfeição na constituição e estrutura da madeira que resultem em alterações lesivas às propriedades físicas e mecânicas e por consequência comprometem a sua aplicação.

Para efeitos de classificação visual, os defeitos na madeira estão classificados. Entre os defeitos mais comuns, temos os seguintes²:

- Defeito físico (deformidade na estrutura) – nós, bolsa de resina;
- Anomalia (irregularidades estruturais) – anel desigual, fio torcido;
- Alteração (modificação no lenho) – mancha, podridão;
- Defeito de exploração (operação de abate descuidada) – fenda ou fissuras de abate
- Defeitos de secagem e laboração (má realização das operações de conversão e secagem) – fendas de secagem. (tema discutido no capítulo 2.8.3.1)



(a)

(b)

Figura 7 – Defeitos na madeira: (a) nó; e (b) podridão

Resume-se que a madeira por ser um material natural apresenta inúmeros defeitos que interferem nas suas propriedades mecânicas, o que requer um bom controlo da qualidade das peças, pois há necessidade de garantir a sua rigidez e resistência mecânica.

² Classificação obtida em documento web consultado em Outubro 2012:
<http://pt.shvoong.com/exact-sciences/earth-sciences/1955564-defeitos-tratamentos-da-madeira/>

2.6 Anisotropia

Diz-se que um material é anisotrópico quando as propriedades físicas e mecânicas não apresentam as mesmas características nas diversas direções em que se pode analisar tal material. Devido às diferentes orientações das fibras, a madeira é um material anisotrópico, o que faz com que a madeira não tenha as mesmas propriedades em qualquer direção. Torna-se imperioso tomar especial cuidado no dimensionamento de estruturas de madeira. Deverá prestar-se atenção as diferentes propriedades físicas e mecânicas nas três direções principais: longitudinal, radial e tangencial, conforme o observado na Figura 8.

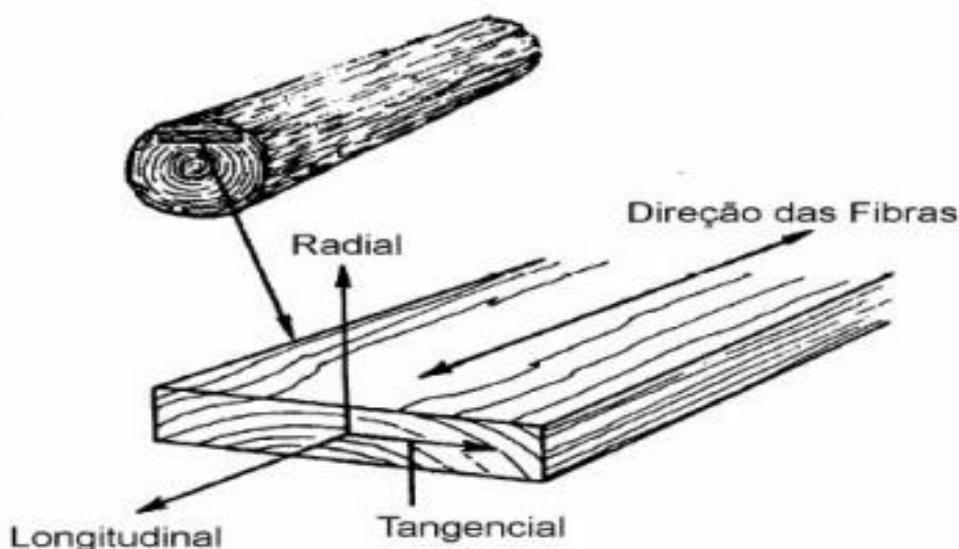


Figura 8 – Anisotropia da madeira (Stamato & Góes, s.d.)

A direção longitudinal corresponde a um eixo vertical imaginário, paralelo as fibras, que passa pelo centro de um corte transversal da árvore. Por sua vez, a direção radial diz respeito ao eixo perpendicular às chamadas camadas de crescimento (anéis de crescimento). Por último, a direção tangencial corresponde ao eixo perpendicular as fibras mas tangencial as camadas de crescimento.

Dependendo do modo como é feito o corte, a madeira vai ficar mais resistente num determinado sentido, ou em outro sentido. Cada uma das direções citadas têm um comportamento característico e único na medida em que possuem diferentes propriedades quer físicas quer mecânicas. A diferença de propriedades entre as direções radial e tangencial raramente tem importância prática, sendo necessário apenas diferenciar as propriedades na direção das fibras principais e na direção perpendicular as mesmas.

2.7 Água na madeira

A humidade é o teor de água existente na madeira. A água é importante para o crescimento de todas as plantas, na qual, obviamente, se incluem as árvores. A função primordial da água é circular pelos tecidos da planta (estrutura microscópica da madeira) conduzindo os nutrientes minerais para as folhas. O estudo da sua presença dentro do tronco da árvore é indispensável por se tratar de um parâmetro que afeta o comportamento do material durante as fases de processamento, secagem e preservação. Posto isto, a água apresenta-se, na madeira, de duas formas:

- Água livre (contida nas cavidades das células, também designada por água de capilaridade);
- Água impregnada (contida nas paredes das células; pode igualmente ser entendida por água de adesão ou higroscópica).

Após o corte da árvore, a mesma tende a perder rapidamente a água livre existente no seu interior e só depois perder lentamente a água de impregnação. Este processo de secagem natural da madeira, continua a desenvolver-se durante as fases de transporte, desdobro e aparelhamento atingindo valores de humidade da ordem de 100 a 30% (Almeida, s.d.). Quando toda a água livre for retirada mantendo-se as paredes celulares da madeira completamente saturadas, diz-se que a madeira atingiu o **ponto de saturação das fibras (PSF)**, Figura 9. Assim, o teor de água corresponde ao mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação. A perda de água até ao referido ponto de saturação das fibras dá-se sem ocorrência de problemas na estrutura da madeira. Este ponto situa-se em torno dos 25-30% dependendo do tipo de espécie.

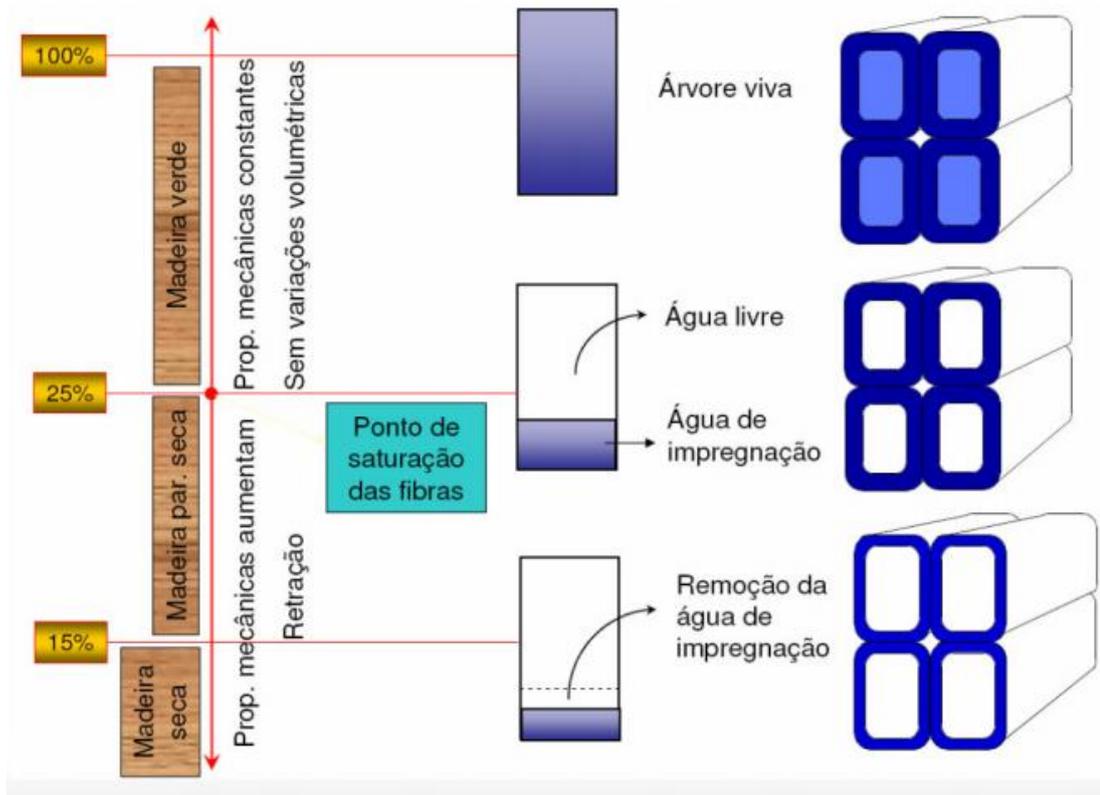


Figura 9 – Teor de água na madeira (Stamato & Góes, s.d.)

A partir do PSF a água presente na madeira é aquela que se encontra localizada no interior das paredes celulares em forma de vapor – água impregnada. A remoção deste tipo de água é mais difícil e o processo de secagem (assunto discutido no capítulo 2.8.3.1) geralmente requer o uso de energia. A partir do PSF a perda de água é acompanhada pela retração por isso a secagem deve ser um processo devidamente controlado e inspecionado para se evitarem problemas na madeira.

O valor do ponto de saturação das fibras para o Pinho bravo situa-se entre os 25-35%, sendo considerado normal (Carvalho, 1996).

Existe ainda um tipo de água presente na madeira e que não foi identificado anteriormente. É a designada água de constituição. É aquela água que se encontra como constituinte do material lenhoso, na sua combinação química. Não é eliminada na secagem pelo que podemos dizer que a madeira terá sempre uma ligeira presença de água.

O teor de água de um provete de madeira (H) pode ser determinado segundo a Norma Portuguesa NP 614 – “Madeira. Determinação do teor em água”. É o resultado do quociente, expresso em percentagem, da massa da água que se evapora do provete por secagem em

estufa ($103^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$) até que o seu peso se torne constante (m_1), pela massa do provete depois de seco (m_2), conforme expressa a Equação (1).

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

(Stamato & Góes, s.d.) classifica a madeira, de acordo com a humidade presente no seu interior, em três tipos. São eles:

- Madeira verde: acima de 25%
- Madeira parcialmente seca: entre 15 a 25%
- Madeira seca: entre 0 e 15%

Silva (2009), na sua pesquisa, classifica a madeira com base em intervalos mais definidos de humidade expressos em percentagem. Segundo o autor:

- Madeira verde: acima de 30%
- Madeira semi seca: acima de 23%
- Madeira comercialmente seca: entre 18 a 23%
- Madeira seca ao ar: entre 13 a 18%
- Madeira dessecada: entre 0 e 13%
- Madeira seca: 0%

De destacar ainda que o teor de água apresenta grande influência na densidade da madeira. Durante o processo de secagem de uma determinada espécie de madeira, enquanto o valor da humidade de situar acima do PSF, apenas se verificará na madeira uma alteração do seu peso, mantendo-se praticamente inalterável as suas dimensões. Contrariamente, quando o teor de água desce abaixo do PSF, as paredes começam a perder água e, conseqüentemente, dá-se uma alteração das suas dimensões.

2.8 Propriedades da madeira

Conhecer as propriedades da madeira é de grande importância. Neste capítulo pretende-se apresentar as propriedades da madeira cujo conhecimento é relevante para a sua utilização como material de construção.

Em primeiro lugar, é importante saber a razão pela qual a madeira possui um conjunto de propriedades que a diferenciam de outros materiais. Nesse sentido, Szücs, Terezo, Valle, & Mores (2005) enumeram fatores que influem nas propriedades físicas da árvore. São eles:

- a espécie da árvore;
- o solo e o clima da região de origem da árvore;
- anatomia do tecido lenhoso;
- fisiologia da árvore;
- variação da composição química.

As relações entre as propriedades abaixo apresentadas, todas elas ligadas à estrutura e crescimento das árvores, são de fundamental importância para a correta utilização da madeira em projetos de engenharia civil.

2.8.1 Teor de água de equilíbrio

Quando uma determinada peça é sujeita a um processo de secagem até atingir os 0% de humidade sendo posteriormente colocada exposta ao meio ambiente, esta tende a absorver imediatamente a água vaporizada dispersa no ar. Esta é a razão pela qual dizemos que a madeira é caracteristicamente higroscópica. A água absorvida é designada por água impregnada, atrás especificada. Deste modo, quando uma peça de madeira absorve água do meio ambiente e atinge um valor final de humidade, estabilizado, diz-se que a madeira atingiu o seu teor de água de equilíbrio. Este valor é variável uma vez que depende da espécie de madeira e das condições do meio ambiente.

O teor de água de equilíbrio da madeira é determinado em grande medida pelo teor de água ou humidade relativa do ar envolvente. Através do ábaco apresentado na Figura 10 pode-se observar que se a humidade relativa do ar for elevada, o teor de água de equilíbrio da madeira será também elevado.

Machado (2006), na investigação que redigiu, apresenta um exemplo de cálculo do teor de água relativa para uma peça de madeira, fechada num compartimento a uma temperatura de 25°C e 60% de humidade relativa. Recorrendo às curvas da humidade de equilíbrio da madeira, esta terá um teor de água aproximado de 11%.

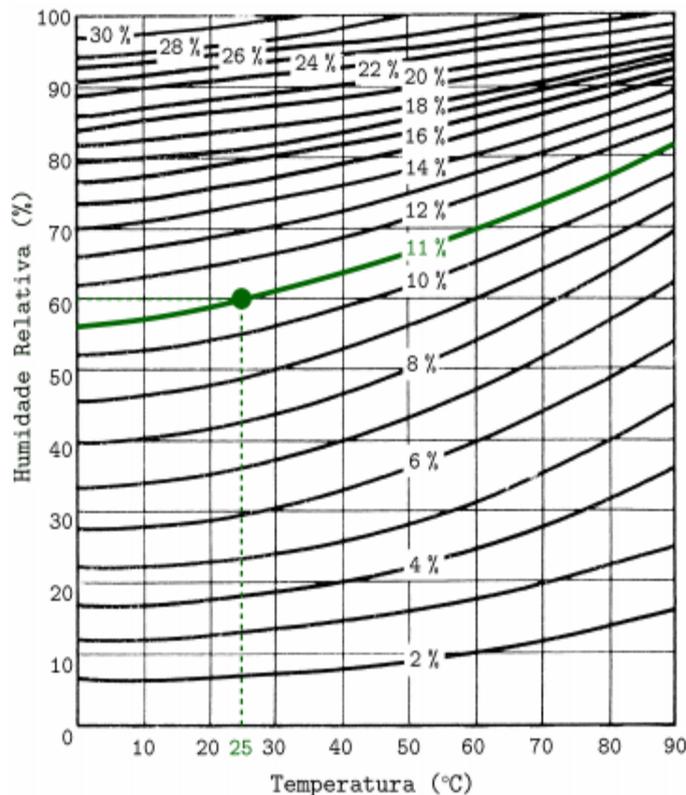


Figura 10 – Determinação do teor de água de equilíbrio (Machado, 2006)

Observando o ábaco para determinação do teor de água em equilíbrio, depreende-se que a temperatura e a humidade relativa sejam os principais fatores que condicionam a humidade de equilíbrio, embora se saiba que a composição química da madeira também atua no fenómeno de absorção de água (Jankowsky & Galvão, 1979).

2.8.2 Densidade. Massa volúmica

A densidade da madeira está extremamente ligada ao seu teor de água (quanto maior o teor de água maior o valor da densidade) por consequência das variações de massa e de volume. Este indicador permite determinar o peso que a madeira tem por cada unidade de volume. A densidade pode ser básica ou aparente. Ambos os índices variam de espécie para espécie e dependem de um conjunto de fatores da estrutura da madeira, bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho (Costa A. , 2001).

A densidade a H% de teor de água de um provete, ρ_H , é o quociente da massa do provete pelo seu volume, ambos os dados determinados naquele estado de humidade H%.

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (2)$$

Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho bravo e Madeira tratada termicamente

A densidade aparente é determinada para uma unidade padrão de referência de 12% de teor de água (H=12%), para cada classe de resistência. A densidade aparente é aquela que é utilizada para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Para se obter de uma forma expedita o valor da densidade para qualquer teor de água usa-se o Ábaco de Kollman (Figura 11). Através deste ábaco, o conhecimento da massa volúmica da madeira a um determinado teor de água permite a avaliação aproximada da densidade correspondente a qualquer outro teor de água.

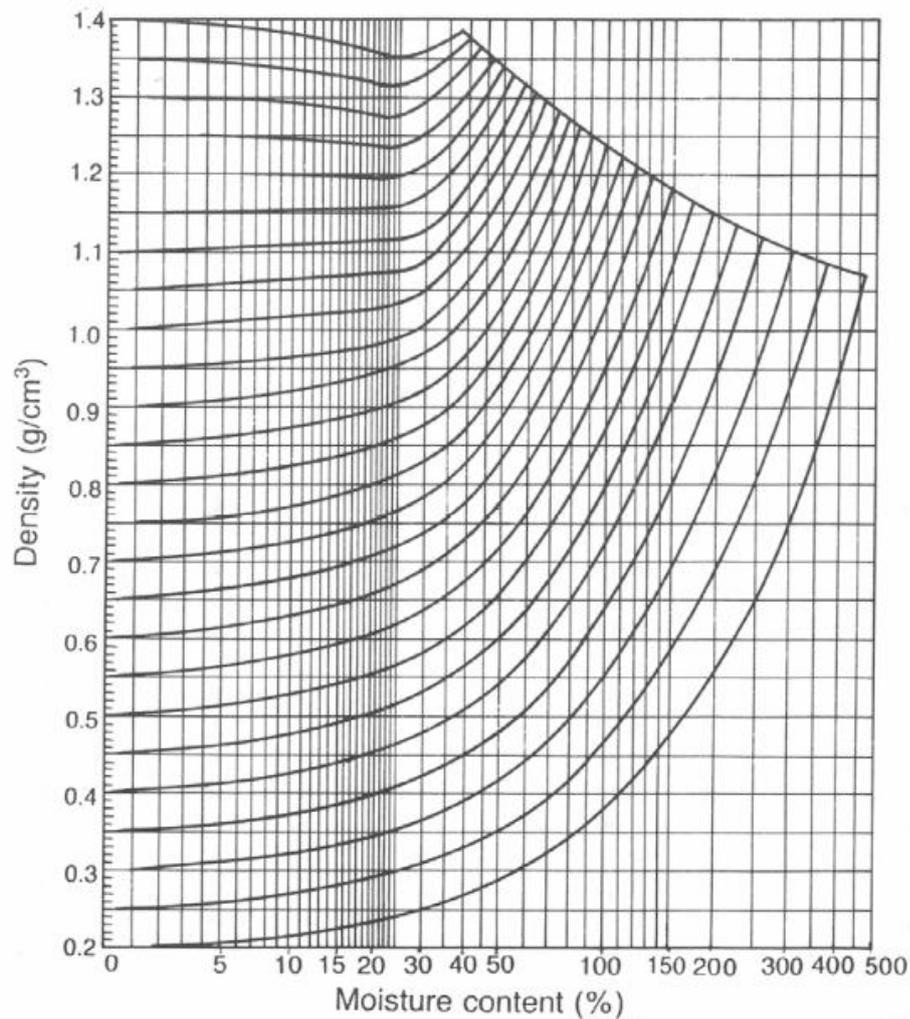


Figura 11 – Ábaco de Kollman – Efeito do teor de água na densidade da madeira

A densidade não é constante na mesma espécie. Geralmente, as espécies de madeira mais pesadas, apresentam características mais duradouras. À medida que o peso específico aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e a durabilidade e, em sentido contrário, diminuem a permeabilidade a soluções preservantes e a trabalhabilidade (Costa A. , 2001).

Quadro 1 - Massa volúmica do Pinho bravo (LNEC, 1997) e da madeira tratada termicamente

MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	
Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> , Ait)	Madeira tratada termicamente ³
530 - 600	350 - 480

2.8.3 Retração e expansão

A retração e a expansão são fenómenos que ocorrem com alargada frequência na madeira. O estudo do comportamento das variações dimensionais da madeira é essencial para a sua correta utilização tanto a nível estrutural como não estrutural.

A retração é definida como a perda de volume provocada pela redução da humidade da madeira. Um processo inverso também pode ocorrer, a expansão, que se dá devido à absorção de água por parte da madeira – quando exposta a condições de alta humidade - que se alojará nos espaços vazios celulares da mesma, provocando um aumento de volume da madeira.

A humidade da madeira, nomeadamente o seu ponto de saturação das fibras, é um aspeto importante neste fenómeno de retração e expansão. É a partir deste ponto que ocorrem as alterações na estrutura da madeira que podem causar defeitos, apresentados na Figura 12, e consequentemente alterações na sua resistência mecânica e física. Os fenómenos de retração ou expansão na madeira ocorrem com a variação da humidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (25-30%).

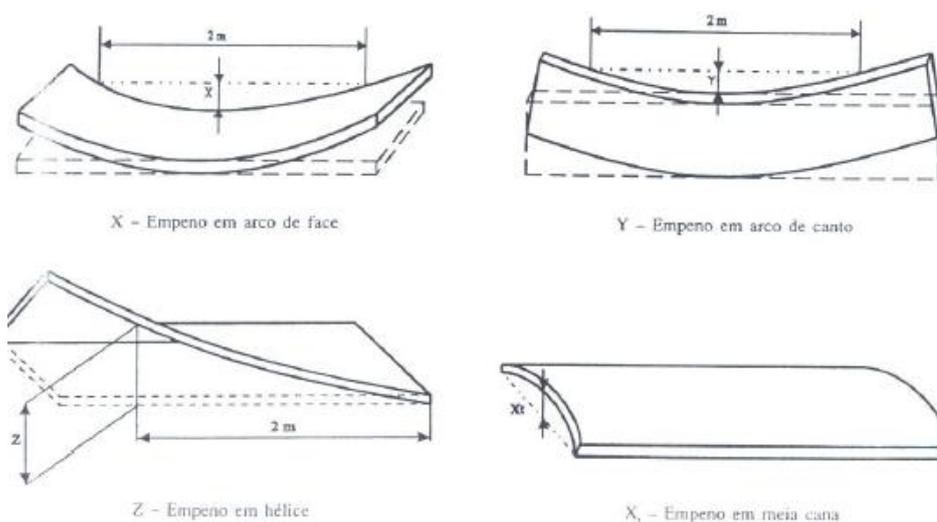


Figura 12 – Empenos (LNEC, 1997)

³ ThermoWood Technical Manual – disponível em: <http://www.ribaproductselector.com/Docs/0/04880/external/COL804880.pdf>

É um facto adquirido que a madeira é um material heterogéneo e anisotrópico, e consequentemente a variação dimensional também se processa de forma anisotrópica, ou seja, a madeira não apresenta valores de retração equivalentes segundo as três direções – retração tangencial, retração radial e retração axial (Figura 13).

A retração tangencial corresponde à variação das dimensões da madeira no sentido perpendicular aos raios enquanto a retração radial corresponde à variação das dimensões da madeira no sentido dos raios de uma secção transversal do tronco da árvore. A retração axial ocorre segundo a direcção das fibras da madeira. A retração volumétrica define-se como a variação das dimensões da madeira considerando-se como parâmetro o seu volume total (Costa A. , 2001). Sendo o resultado das três anteriores, é a maior de todas.

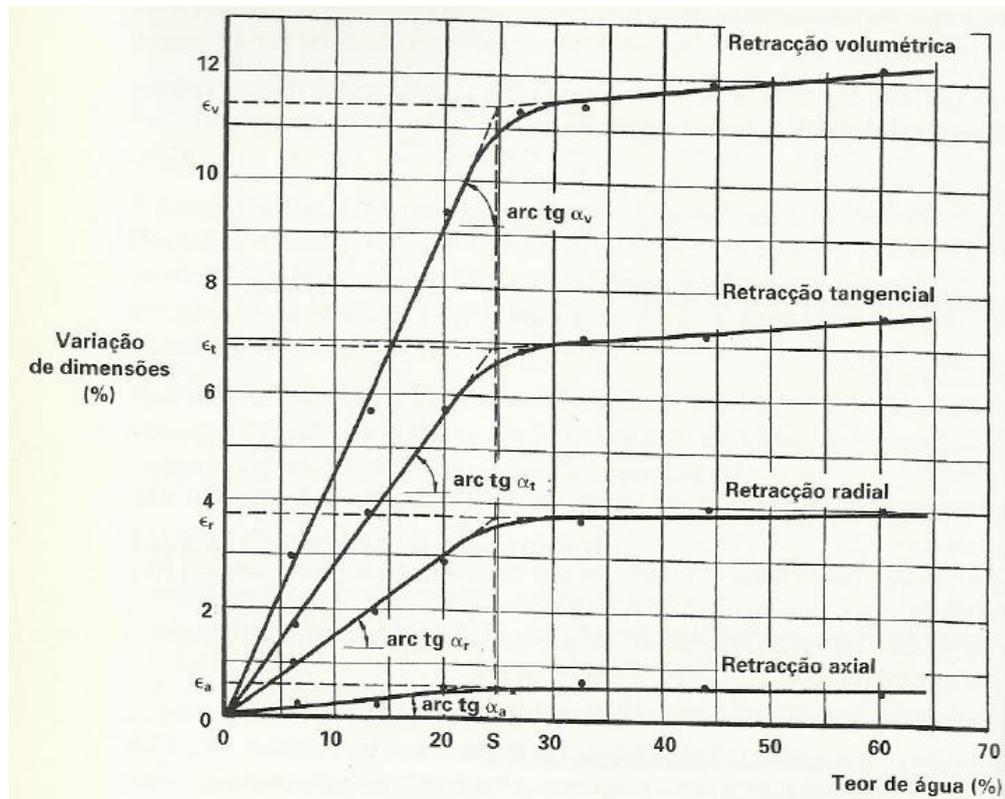


Figura 13 – Coeficientes de retração (Carvalho, 1996)

Através da Figura 13 podemos constatar que a retração é consideravelmente maior nas direções radial e tangencial do que na direcção axial.

Apresentam-se no Quadro 2 os valores médios dos coeficientes de retração unitária da madeira de Pinho bravo.

Quadro 2 – Coeficiente de retração unitária do Pinho bravo (LNEC,1997)

Madeira	COEFICIENTE DE RETRAÇÃO UNITÁRIA (%/%)		
	Tangencial	Radial	Volumétrica
<i>Pinho bravo</i> (<i>Pinus pinaster</i> , Ait)	0,36	0,21	0,60

Os valores mencionados no quadro foram determinados no LNEC em ensaios realizados sobre provetes pequenos sem defeito, referidos ao teor de água de 12%

A variabilidade dos valores da retração nas três direções explica a maior parte dos defeitos que ocorrem durante a secagem da madeira (Affonso, Barbosa, & Vilató, 1999). A retração tangencial pode causar problemas de torção nas peças de madeira enquanto a retração radial pode traduzir-se em problemas de fissuras das peças de madeira (Silva, 2009).

2.8.3.1 Secagem da madeira

A secagem da madeira visa a redução do teor de água até determinados valores conforme o uso final a que esta se destina o produto. Pode ser conseguida de duas formas distintas (Figura 14):

- Secagem ao ar livre – realizada em locais abertos, empilhando as tábuas de modo a que seja possível a circulação de ar entre as peças. As peças devem ser isoladas do solo, dispostas alinhadamente e devidamente protegidas das intempéries ambientais;
- Secagem em câmaras próprias (secagem artificial) – a secagem é efetuada em câmaras próprias fechadas, com temperaturas, humidade relativa e a circulação de ar controladas. O processo de secagem é muito mais rápido. Porém, a construção de uma estufa é bastante dispendiosa.



(a)



(b)

Figura 14 – Secagem da madeira: (a) ao ar livre; e (b) em estufa

A secagem natural, apesar de mais longa no tempo, assegura um menor número de defeitos na madeira. Hoje em dia, as secagens da madeira são realizadas numa combinação de vários tipos de secagem. O processo de secagem inicia-se com uma secagem natural com posterior colocação das madeiras em estufa para secagem artificial.

No processo de secagem artificial é fornecida energia térmica para promover a retirada da água da madeira. A energia necessária para a retirada da água varia com o teor de água da madeira, como pode observar-se pelo gráfico apresentado na Figura 15.

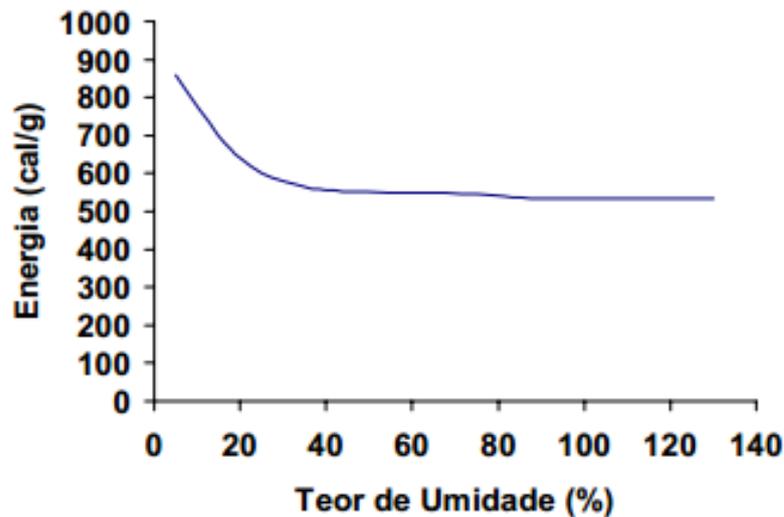


Figura 15 – Energia necessária para a retirada da água presente na madeira (Klitzke, s.d.)

O processo de secagem da madeira deve ser devidamente controlado para que as madeiras não sofram fenómenos de retração e expansão. É um processo com importância já que permite, quando executada segundo as normas, aumentar a resistência e rigidez da madeira; reduzir a fluência; aumentar a durabilidade pela redução do risco de ataques biológicos; dotar a madeira de uma estabilidade dimensional e, por último, reduzir os defeitos.

Segundo uma publicação da Madeidura, Lda⁴, a deficiente realização das operações de secagem da madeira conduz a consequências indesejadas para as peças deste material. Denominados por defeitos de secagem, resultam as fendas e fendilhamento superficial, empenos, em forma de arco, meia-cana, aduela e hélice, em colapsos e queimado de estufa (Carvalho, 1996). Alterações na humidade abaixo do PSF conduzem ao acréscimo das propriedades resistentes da madeira e retrações volumétricas (Silva, 2009).

⁴ <http://www.madeidura.com/publicacoes/caracteristicas-e-propriedades-da-madeira> consultado em Setembro de 2012

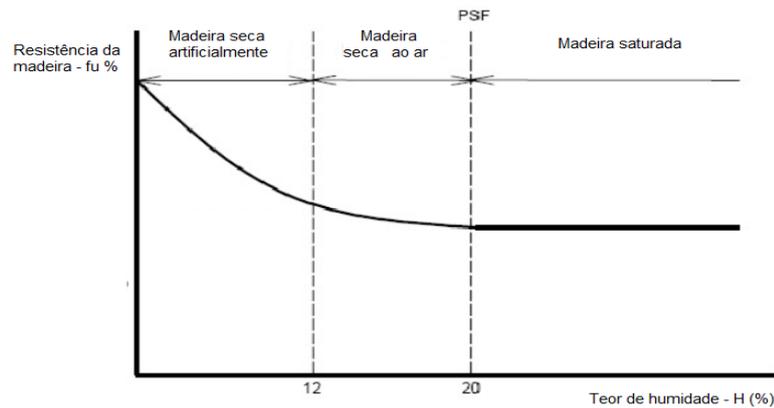


Figura 16 – Resistência Vs. teor de água (Silva, 2009)

2.8.3.2 Medição da retração

A quantificação das grandezas características da retração de um provete de madeira é determinada de acordo com a NP-615:1973 – “Determinação da retração”. Resumidamente, a técnica consiste em pesar inicialmente um provete. Seguidamente saturar-se o provete emergindo-o em água durante uma ou duas semanas. Depois de completamente saturado, retira-se o provete da água e medem-se as dimensões do provete segundo as direções que interessam para as determinações que se pretendem fazer. A dimensão segundo uma direção é tomada como a média dos dois valores obtidos nessa direção.

É possível determinar a retração de um provete de madeira, segundo um processo inverso. Utilizando um provete, isento de defeitos, completamente saturado é efetuada a leitura das dimensões nas direções desejadas. Posteriormente, os provetes são secos em estufa para as condições definidas pela Norma NP-614:1973 – “Determinação do teor em água”. Recorrendo a um dispositivo de medição (Figura 17), determina-se a retração entre o estado saturado do provete e o estado de madeira completamente seca.

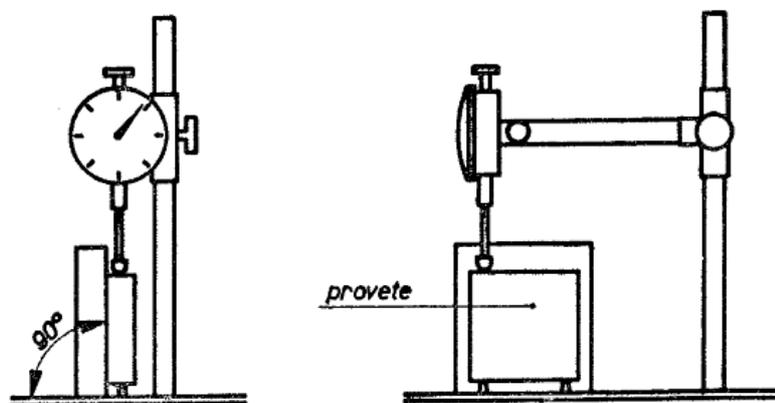


Figura 17 – Dispositivo para medição da retração (obtido de LNEC NP615:1973)

A norma NP-615:1973 permite determinar vários coeficientes úteis na definição do comportamento da madeira.

- a) **Retração linear (axial, radial, tangencial), (ε)** – consiste na retração segundo a direção axial, radial ou tangencial do provete, correspondente à diminuição do teor de água desde o de saturação das fibras até 0%.

Sendo que l_1 corresponde à dimensão numa dada direção do provete saturado; l_2 a dimensão, na mesma direção, do provete seco ao ar; e l_3 é o valor da dimensão na mesma direção com o provete seco ($H=0\%$), o valor da retração linear, segundo uma dada direção, é dado pela Equação (3).

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_3}{l_3} \times 100 \quad (3)$$

O cálculo do **coeficiente de retração linear (α)**, (axial, radial ou tangencial) expresso em percentagem é dado pela Equação (4).

$$\alpha = \frac{l_2 - l_3}{l_3 \times H} \times 100 \quad (4)$$

Onde H corresponde ao teor de água de equilíbrio do provete.

- b) **Retração volumétrica total (ε_v)** – corresponde à diminuição do teor de água de saturação das fibras até 0%.

Sendo que v_1 corresponde ao volume do provete saturado; v_2 é o volume da peça seca ao ar; e v_3 é o valor do provete totalmente seco; H é o teor de água do provete a determinada humidade relativa do ar (%), o valor da retração volumétrica, segundo uma dada direção, é dado pela Equação (5).

$$\varepsilon_v = \frac{v_1 - v_3}{v_3} \times 100 \quad (5)$$

O cálculo do **coeficiente de retração volumétrica (α_v)** expresso em percentagem é dado pela Equação (6).

$$\alpha_v = \frac{v_2 - v_3}{v_3 \times H} \times 100 \quad (6)$$

O coeficiente retração volumétrico pode ser determinado expeditamente por soma das retrações lineares totais segundo as direções axial (ε_a), radial (ε_r) e tangencial (ε_t). Assim sendo, o valor da retração volumétrica total é dada pela Equação (7).

$$\varepsilon_v = (1 + \varepsilon_a)(1 + \varepsilon_r)(1 + \varepsilon_t) - 1 \quad (7)$$

ou, desprezando infinitésimos de ordem superior,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + \varepsilon_r + \varepsilon_t \quad (8)$$

- c) **Teor de água de saturação das fibras** – corresponde ao ponto no qual a reta da variação das dimensões de uma madeira intersesta a reta da humidade.

$$S = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (9)$$

2.8.4 Dilatação térmica

As deformações dos materiais, incluindo a madeira, podem ter origem em várias causas. A variação da temperatura pode ser um dos fatores responsáveis por essas deformações. Quando aquecida a madeira dilata e assim que arrefece contrai.

Define-se como coeficiente de dilatação térmica linear, α_l , da madeira a percentagem da variação duma dimensão (axial, radial ou tangencial) relativamente à temperatura. É expresso em 10^{-6} por grau *Celcius* ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), de acordo com a expressão seguinte:

$$\alpha_l = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (10)$$

Onde L_0 corresponde ao comprimento do provete à temperatura ambiente; ΔL é o aumento do comprimento do provete entre a temperatura ambiente e 100°C ; e Δt é o aumento da temperatura.

2.8.5 Condutibilidade térmica

Condutibilidade térmica depreende-se como a velocidade com que o calor se movimenta pelo material. A capacidade da madeira conduzir calor é expressa pelo seu coeficiente de condutibilidade térmica (K). Devido à organização estrutural do tecido, que retém pequenos volumes de ar no seu interior, a madeira impede a transmissão de ondas de calor ou frio (Costa A. , 2001). Adicionalmente, Martins & Araújo (2005) afirmam que a presença de

celulose, material caracterizado por ser um mau condutor de calor, torna a madeira num bom isolante térmico.

Pelo facto de a madeira possuir um valor de K, ($K_{\text{madeira}} = 0.11$ a 0.14)⁵ muito menor que outros materiais como por exemplo o alumínio, o cobre ou o ferro e o betão, depreende-se que as estruturas de madeira são então mais seguras em caso de incêndio.

2.9 Propriedades mecânicas da madeira

2.9.1 Resistência à compressão, à tração e à flexão

A compreensão do comportamento mecânico da madeira exige o entendimento da sua constituição anatómica. Como foi dito anteriormente, a madeira é considerada um material anisotrópico formado por tubos ocos cuja estrutura é desenhada especificamente para resistir a tensões paralelas às fibras. As resistências e o módulo de elasticidade, na direção paralela às fibras, são sempre mais elevados que na direção perpendicular às mesmas.

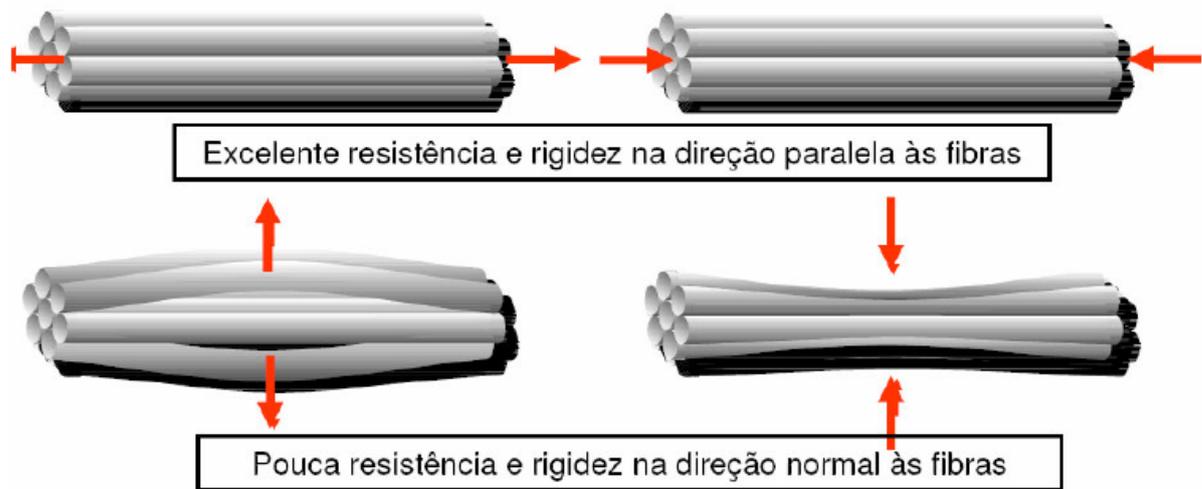


Figura 18 – Comportamento estrutural da madeira [obtido de (Stamato & Góes, s.d.)]
Deste modo, a resistência à compressão está relacionada com o comportamento da madeira quando está exposta a pressões a partir das suas extremidades enquanto a resistência à tração relaciona-se com o comportamento da madeira quando nas suas extremidades atuam forças iguais mas em sentidos opostos. A propriedade de resistência à flexão consiste na capacidade de reação às cargas uniformemente distribuídas em todo o comprimento da madeira ou em pontos variados e isolados uns dos outros.

⁵ Madeiras resinosas

2.9.2 Fluência e fadiga

A fluência e fadiga da madeira correspondem para além da sua deformação elástica, um acréscimo de deformação com o tempo, mesmo com a carga sendo mantida uniforme. Ao ser retirada a carga somente uma parte da deformação é recuperada, mantendo-se um resíduo de deformação variável com o tempo (Britez & Nogueira, 2006). Em termos regulamentares este fenómeno é tido em conta através do coeficiente k_{def} , função da classe de serviço (teor em água) e da duração da cargas.

2.9.3 Comportamento ao fogo

O desempenho de determinado material de construção, face à ação de um incêndio, depende da reação e da resistência ao fogo, próprias do material (Branco, 2003).

A madeira é um material mau condutor térmico, ou seja tem baixa condutibilidade térmica. Esta propriedade intrínseca da madeira torna-a vantajosa em relação a outros materiais – como por exemplo o aço, alumínio, entre outros – evitando assim a elevação da temperatura retardando a combustão da peça e dilatação excessiva da estrutura.

O parâmetro que distingue os comportamentos ao fogo das várias espécies de madeira é a massa volúmica. Com o aumento da massa volúmica, a velocidade de combustão diminui e o tempo de ignição aumenta (Branco, 2003).

A condutibilidade térmica da madeira depende da sua densidade e do teor de água contido na peça. Quanto maior for o valor da densidade e o valor da humidade maior será a capacidade da madeira em conduzir calor, sendo, por isso, melhores isolantes aquelas madeiras secas que possuem um teor de água constante (Anastácio, 2010).

2.10 Madeiras modificadas

Para madeiras sujeitas a maiores agressões do meio ambiente, existem processos de tratamento que permitem a sua preservação prevenindo a sua deterioração e por conseguinte aumentando o seu tempo de vida útil. Os processos de modificação da madeira melhoram as propriedades de madeiras menos nobres como o Pinho, o Espruce ou a Bétula, sem a introdução de compostos químicos potencialmente perigosos para o ambiente, mas principalmente pela redução violenta do teor de água de equilíbrio da madeira (Esteves, Machado, & Nunes, 2011).

Existem quatro tipos de processos de modificação da madeira: a modificação térmica, modificação química, modificação de superfície e a modificação por impregnação.

A modificação térmica é aquela que tem mais sucesso sendo este processo o mais utilizado, (Esteves & Pereira, 2009) e por conseguinte o tomado por enfoque neste capítulo. O sucesso deve-se ao facto de este método de modificação ser mais económico quando comparado com outros processos de modificação que se baseiam em produtos químicos. De acordo com o descrito no documento “Madeira tratada termicamente *Handbook*” os processos desenvolvem-se normalmente em três fases (Figura 19):

- **FASE 1: Aquecimento** – fase onde decorre o aumento gradual da temperatura em condições de elevada humidade do ar. Nesta etapa, o teor de água da madeira diminui para aproximadamente zero.
- **FASE 2: Tratamento** – é a fase onde ocorre a elevação lenta da temperatura e a diminuição gradual da humidade do ar dentro da estufa; é a fase onde a madeira vai perder água. A temperatura permanece constante, durante 2-3 horas, dependendo da aplicação final;
- **FASE 3: Arrefecimento e estabilização** – nesta ultima fase, o objetivo é homogeneizar a humidade da madeira. Por intermédio de sistemas de pulverização de água, é reduzida a temperatura (80-90°C) de forma conferir à madeira um teor de água para um nível utilizável (4-7%).

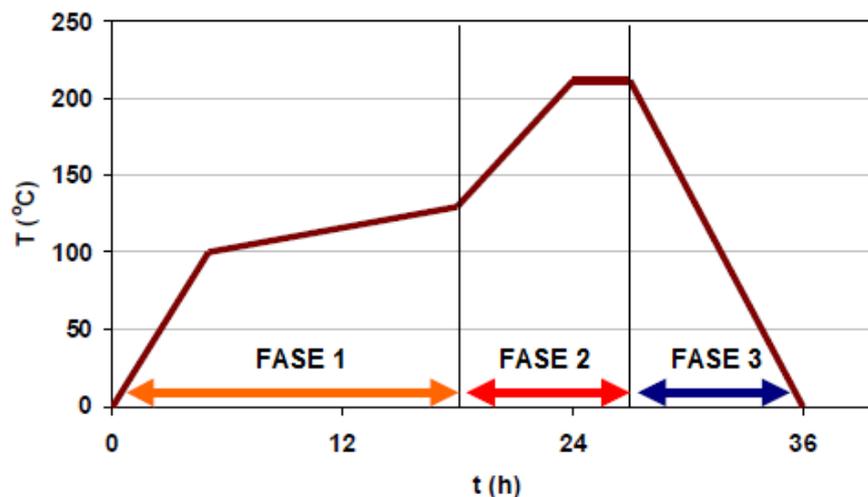


Figura 19 – Processo Madeira tratada termicamente (Finnish Thermowood Association, 2003)

Este processo de modificação altera diversas propriedades da madeira nomeadamente o seu teor de água de equilíbrio – quanto mais intenso o tratamento maior será a redução do teor de

água de equilíbrio. Segundo o publicado por Esteves, Machado, & Nunes, (2011), foi estimada uma redução do teor de água de equilíbrio de aproximadamente 40% para a madeira de Pinho e, adicionalmente, o aumento da estabilidade dimensional e da resistência contra fungos, constituindo vantagens significativas no uso de madeira tratada termicamente para aplicações no exterior quando comparada com a madeira não tratada.

O processo de tratamento térmico da madeira reduz o potencial para torção e empenamento da madeira. A madeira tratada termicamente, quando comparada com o Pinho Nórdico, exibe um decréscimo no equilíbrio do teor de água na madeira, no entanto existe uma correlação linear entre as propriedades de absorção de água e a estabilidade dimensional do material sob condições de humidade não constantes (Quadro 3).

Quadro 3 – Alterações dimensionais da Madeira tratada termicamente em comparação com o Pinho não tratado⁶

Amostras de Madeira	Teor de água %	Teor de água %	Alteração Dimensional por 1% de alteração HR		Alteração Dimensional 50%HR 90% HR (%)	
	50% RH	90% RH	Espessura	Largura	Espessura	Largura
Thermowood®	5%	10%	0.28	0.17	1.4%	0.85%
Pinho	10%	20%	0.31	0.19	3.1%	1.9%

Esteves, Machado, & Nunes, (2011), apresentam na sua publicação os valores para o inchamento tangencial da madeira tratada termicamente, vendida sob duas formas, e respetiva classe de durabilidade (Quadro 4).

Quadro 4 – Madeira tratada pelo processo Thermowood® (Esteves, Machado, & Nunes, 2011)

	Thermo-S (Stability)	Thermo-D (Durability)
Inchamento tangencial	6%	5-6%
Classe de durabilidade (EN 350-1)	3	2

Uma vez que o tratamento da madeira *Thermo-D* é mais intenso, a perda da resistência mecânica também é maior.

⁶ Tabela disponível em <http://www.jular.pt/pdf/Revestimento-exterior-madeira-ThermoWood.pdf>. Obtido em Outubro de 2012.

Segundo o publicado Esteves, Machado, & Nunes, (2011), este processo de modificação altera as propriedades mecânicas da madeira, nomeadamente a sua resistência à flexão, impossibilitando a utilização deste material em aplicações estruturais.

Ainda relativamente aos processos de modificação térmica da madeira, para além do já descrito processo *Thermowood*® (Finlândia), existem ainda os processo *Plato*® (Holanda); *Bois Perdure* (Canadá) e *Rectification* (França) e *Oil Heat Treatment* (Alemanha).

Já o tratamento químico consiste em fixar elementos químicos preservadores na madeira conduzindo a uma diminuição da sua higroscopicidade. Como vantagens deste processo de modificação é possível salientar o acréscimo: de resistência a fungos em contato com o solo e de resistência aos raios ultravioleta. Uma vez que o teor de água diminui significativamente com este tratamento, as madeiras assim tratadas gozam de estabilidade dimensional. Em contrapartida é exigida uma grande quantidade de químicos.

A modificação da superfície difere dos outros tipos uma vez que altera principalmente as propriedades da superfície da madeira (resistência à degradação pela luz solar, condições climáticas). Os principais métodos de modificação da superfície são: modificação química, modificação química com reagentes bifuncionais, termoplasticização da superfície, agente de ligação, ativação química, ativação enzimática e, por último, descarga de plasma e de corona. Tal como a modificação química a modificação da superfície da madeira é um processo caro.

A modificação por impregnação baseia-se na introdução de um ou vários compostos químicos na parede das células que, ao reagirem, formam um composto que permite a diminuição da higroscopicidade da madeira. Os dois mecanismos existentes são: a impregnação com um monómero e posteriormente polimerização; e introdução de um material solúvel que depois do tratamento se torna insolúvel.

A madeira tratada apresenta já uma considerável parcela de utilização no mercado da construção em madeira. A escolha do método a utilizar vai depender da aplicação final a dar à madeira.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta a descrição do trabalho experimental realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, recorrendo às Normas Portuguesas NP-614 e NP-615 para definir os procedimentos de ensaio.

Os ensaios experimentais estão divididos em três fases. A primeira fase dos ensaios representa a etapa “teste”, que serviu para obter os tempos de saturação e de secagem dos provetes. Da segunda e terceira fases fazem parte os ensaios definitivos para avaliar o teor de água de equilíbrio da madeira Pinho bravo e Madeira tratada termicamente, e consiste na saturação e secagem de 25 provetes de cada espécie colocando-os posteriormente numa câmara climática, registando a variação da massa do provete e das suas dimensões radial e tangencial.

3.1 Materiais e Equipamento

As madeiras escolhidas para o trabalho experimental foram a madeira resinosa de Pinho bravo (*Pinus pinaster*, ait) e a madeira tratada termicamente. Os provetes da madeira tratada apresentam uma geometria de 5x5x1 cm³, e os provetes de Pinho bravo apresentam dimensões de 4x4x1 cm³, figura 20. Os provetes da madeira tratada termicamente foram fornecidos pela empresa Banema, e os de Pinho bravo pela AOF.

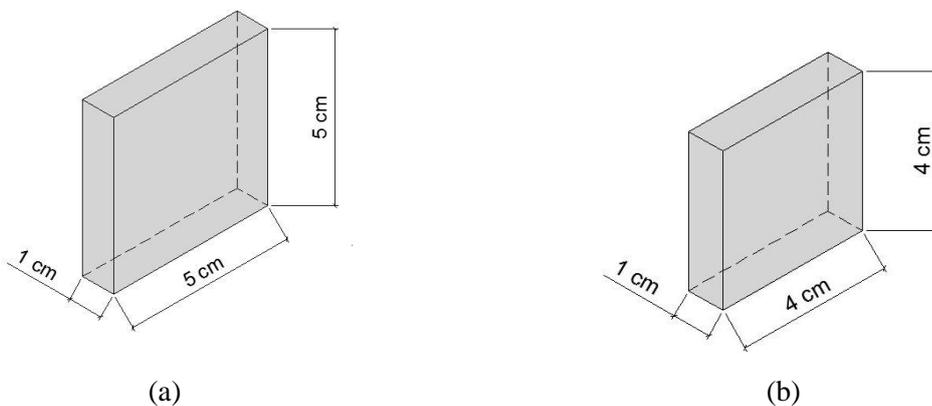


Figura 20 – Geometria dos provetes: (a) Madeira tratada termicamente; (b) Pinho bravo (*Pinus pinaster*, ait)

O equipamento usado para efetuar as medições geométricas dos provetes foi um paquímetro digital stainless hardened com a precisão de 0,02mm. A balança usada para registar a massa dos provetes é uma KERN PLS 4000-2. Qualquer medição dos provetes, após terem estado na estufa a 103±2°C, deve ser precedida pela colocação dos provetes num exsiccador com sílica de forma a evitar trocas de água com o meio envolvente enquanto a madeira está quente. Os

provetes depois de saturados/secos são posteriormente colocados numa câmara climática, do tipo WALK-IN da FITOCLIMA sob condições de humidade relativa e de temperatura controladas. A câmara climática encontrava-se a uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa $65\pm 5\%$.

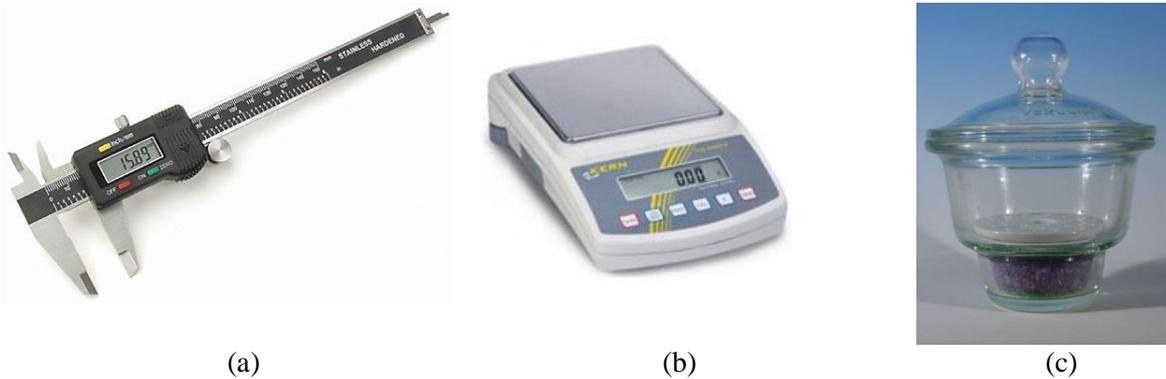


Figura 21 – Equipamentos: (a) paquímetro digital; (b) balança KERN PLS 4000-2 e (c) exsiccador com sílica

3.2 Procedimentos de ensaio

O trabalho experimental pode ser dividido em três etapas distintas. A primeira etapa teve como objetivo definir os tempos necessários para a saturação e secagem dos provetes. Para o efeito mergulharam-se 5 provetes de cada espécie de madeira (Madeira tratada termicamente e Pinho bravo) em água e outros 5 provetes foram postos a secar na estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, fazendo medições a partir das 20 horas a cada hora. Quando a massa dos provetes apresentava uma variação inferior 0,5% num intervalo de medição de 2 horas os provetes consideraram-se estabilizados, tal como definido na NP-614. Assim foi possível definir que o tempo de saturação dos provetes de ambas as espécies seria de 28 horas, e o tempo de secagem de 24 horas.

A segunda etapa do programa experimental divide-se em duas tarefas:

- Tarefa 1
 - i) Mergulho de 25 provetes de cada espécie em água durante 28 horas;
 - ii) Após as 28 horas, os provetes são colocados na câmara climática, onde se faz o registo da massa e das dimensões radiais e tangenciais de cada provete ao longo de 24 horas;
 - iii) Repete-se três vezes os pontos i), ii) e iii).

- Tarefa 2
 - iv) Após terminada a Tarefa 1 os provetes são colocados na estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas;
 - v) Retiram-se os provetes da estufa e coloca-se num exsiccador com sílica durante 1 hora;
 - vi) Os provetes são colocados na câmara climática onde se faz o registo da massa e das dimensões radiais e tangenciais do provete durante 24 horas.

A terceira etapa do programa experimental é também dividida em duas tarefas distintas:

- Tarefa 3
 - i) Colocam-se 25 provetes de cada espécie na estufa a $103\pm 2^{\circ}$ durante 24 horas;
 - ii) Retiram-se os provetes da estufa e são mantidos num exsiccador com sílica durante 1 hora;
 - iii) Os provetes são colocados na câmara climática onde se faz o registo da massa e das dimensões radiais e tangenciais do provete durante 24 horas;
 - iv) Repete-se três vezes os pontos i), ii) e iii).
- Tarefa 4
 - v) Após a Tarefa 3, os provetes são colocados em água durante 28 horas;
 - vi) De seguida, os provetes são colocados na câmara climática onde se faz o registo da massa e das dimensões radiais e tangenciais do provete durante 24 horas.

3.3 Resultados

Este capítulo destina-se à apresentação dos resultados obtidos no trabalho experimental realizado. A nomenclatura usada para identificação dos provetes e melhor interpretação resultados é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 – Nomenclatura do programa experimental.

S	Provetes saturados	1	Primeira saturação/secagem
A	Provetes anidros	2	Segunda saturação/secagem
T	Provetes de Madeira tratada termicamente	3	Terceira saturação/secagem
P	Provetes de Pinho bravo	4	Primeira secagem/saturação

3.3.1 Madeira tratada termicamente

A Figura 22 corresponde à variação do teor de água (H) e da massa (m) dos provetes da tarefa 1 e 2, ao longo de 24 horas.

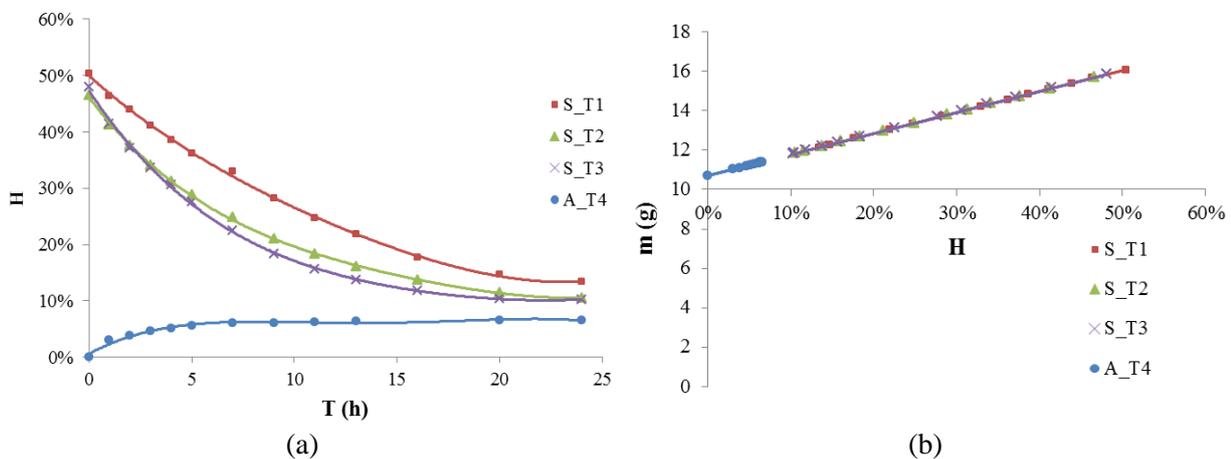


Figura 22 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) (Madeira tratada termicamente)

Nos presentes resultados, em termos de teor de água (H) a primeira saturação, S_T1, foi onde se obteve maior percentagem de água (T = 0h), cerca de 3% superior a S_T2 e S_T3, igualando a mesma diferença no momento da estabilização (T = [20;24] h). Ainda no gráfico teor de água (H) - Tempo (T) é perceptível que S_T2 e S_T3 apresentam uma perda de água mais acentuada do que S_T1 nas primeiras 12 horas, estabilizando com um teor de água de 10,2% e 10,5%. Relativamente à estabilização dos provetes anidros, A_T4, apresentam uma estabilização mais rápida que os provetes saturados, conseguindo estabilizar nas primeiras 7 horas, com um teor de água de 6,5%.

No que respeita ao estudo do comportamento da massa ao longo destas duas tarefas (Tarefas 1 e 2), conclui-se que a massa apresenta um comportamento linear relativamente ao processo de estabilização dos provetes.

A Figura 23 apresenta a variação dimensional na direção radial e tangencial da tarefa 1 e 2.

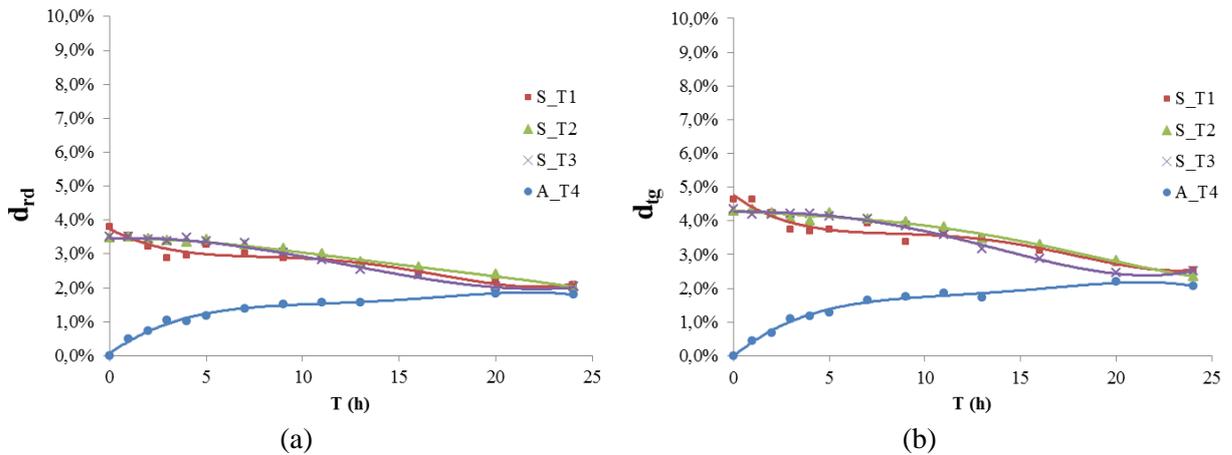


Figura 23 – Variação dimensional nas direcções radial (a) e tangencial (b) em função do tempo (Madeira tratada termicamente).

A primeira observação a ter nos resultados da Figura 23 é que a direção tangencial apresenta valores de variação superiores à direção radial. Na primeira medição dos provetes saturados (S_T1, S_T2, S_T3) a direção radial apresenta valores cerca de 0,8% inferiores á direção tangencial terminando com uma diferença de 0,5% quando estabilizado (T=24h). Os provetes anidros também apresentam uma variação na direção tangencial ligeiramente maior do que a direção radial, cerca de 0,2%.

A Figura 24 diz respeito à variação do teor de água (H) dos provetes da tarefa 3 e 4, ao longo de 24 horas.

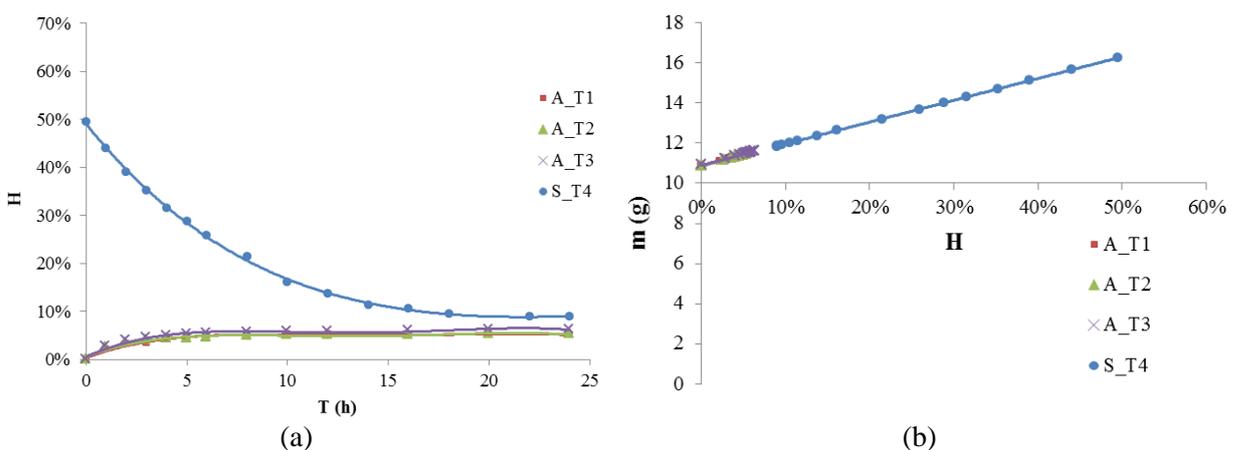


Figura 24 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) (Madeira tratada termicamente)

Nos resultados da Figura 24, em termos de teor de água (H) a estabilização dos provetes anidros (A_T1, A_T2, A_T3) é semelhante, a diferença maior localiza-se no momento de

estabilização, cerca de 1%. A estabilização dos provetes anidros ronda os 5,8% de teor de água. Em relação aos provetes saturados (S_T4) apresentam um teor de água de 49,9% na primeira medição, estabilizando nos 9% com uma diferença de 3,2% dos provetes anidro. O comportamento da massa ao longo destas duas tarefas (Tarefas 3 e 4) revelou-se linear relativamente ao processo de estabilização dos provetes.

A Figura 25 apresenta a variação dimensional do provete na direção radial e tangencial da tarefa 3 e 4.

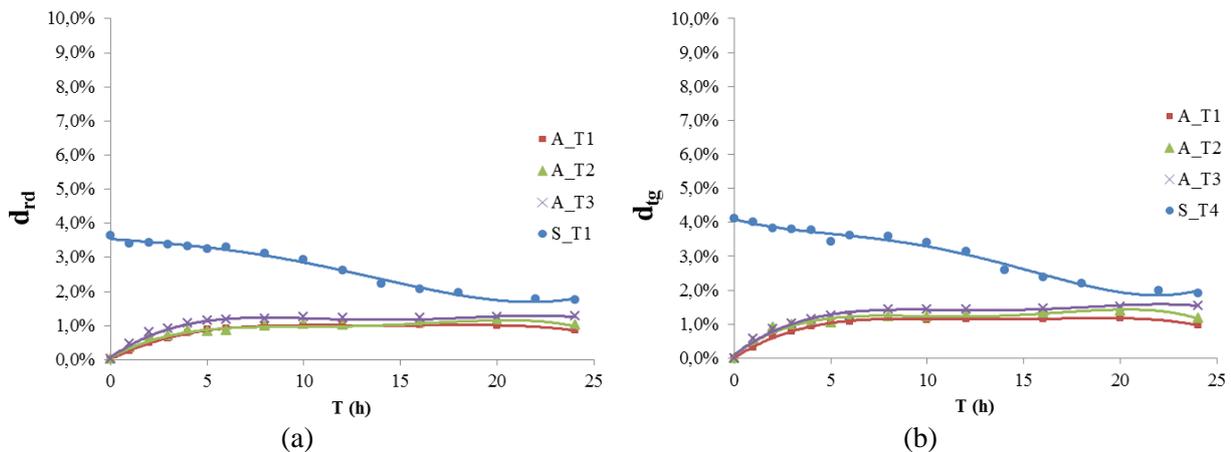


Figura 25 – Variação dimensional nas direções: (a) radial e (b) tangencial, em função do tempo (Madeira tratada termicamente)

De novo se observa que a direção tangencial apresenta uma variação superior à direção radial. Os provetes anidro (A_T1, A_T2, A_T3), ao fim de 24 horas, apresentaram uma variação radial de 0,9% a 1,3%, enquanto que na direção tangencial apresentaram uma variação de 1% a 1,6%. Os provetes saturados (S_T4) na primeira medição mostraram uma variação na direção radial de 3,6% e uma variação tangencial de 4,1%.

A figura abaixo ilustra a variação do teor de água dos provetes saturados (a) e anidros (b) da segunda e terceira etapa do programa experimental.

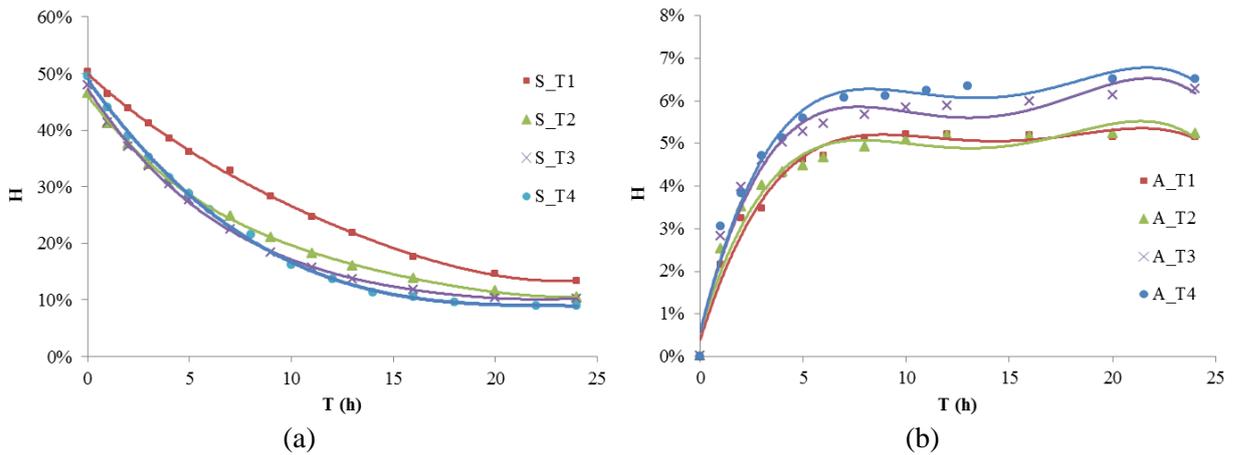


Figura 26 – Curvas teor de humidade – tempo: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros

A evolução das curvas mostra que os provetes “envelheceram”, ou seja, após os primeiros processos de saturação/secagem os provetes sofreram alterações a nível microscópico que afetaram a capacidade de perda/absorção de água.

Na figura seguinte é apresentado a variação dimensional na direção radial e tangencial dos provetes saturados (a) e anidros (b) da segunda e terceira etapa do programa experimental.

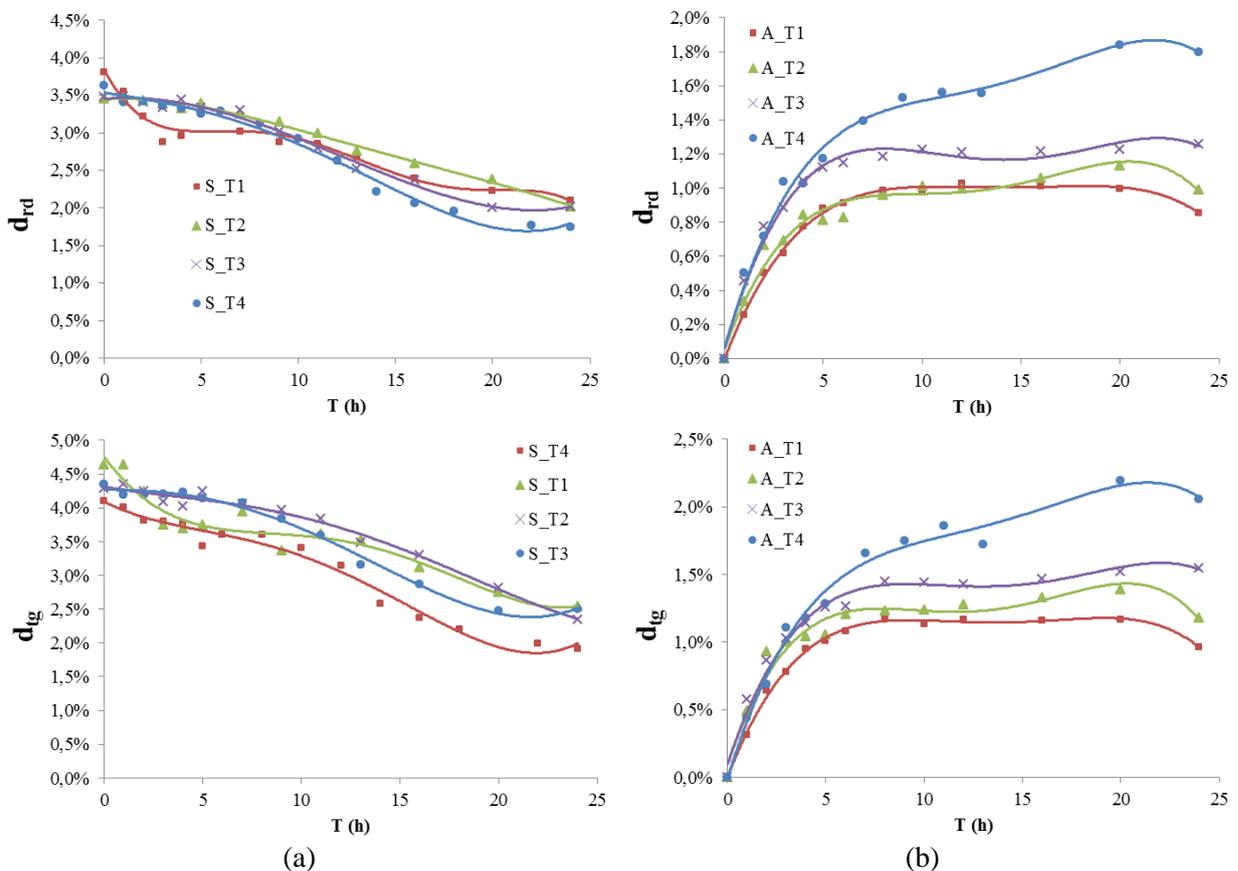


Figura 27 – Variação dimensional na direção radial: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros

A nível da direção radial e tangencial dos provetes saturados (a), as curvas têm o mesmo sentido, enquanto que nos provetes anidros (b) o desenvolvimento da curva A_T4, a partir das 4 horas, apresenta uma disposição significativamente diferente das restantes curvas. O significado desta análise incide sobre o facto de quando os provetes são saturados danificam microscopicamente a estrutura da madeira, de modo a perder a capacidade de retomar à sua forma inicial.

3.4 Pinho Bravo

Na Figura 28 é apresentado a variação do teor de água (H) dos provetes da tarefa 1 e 2, ao longo de 24 horas.

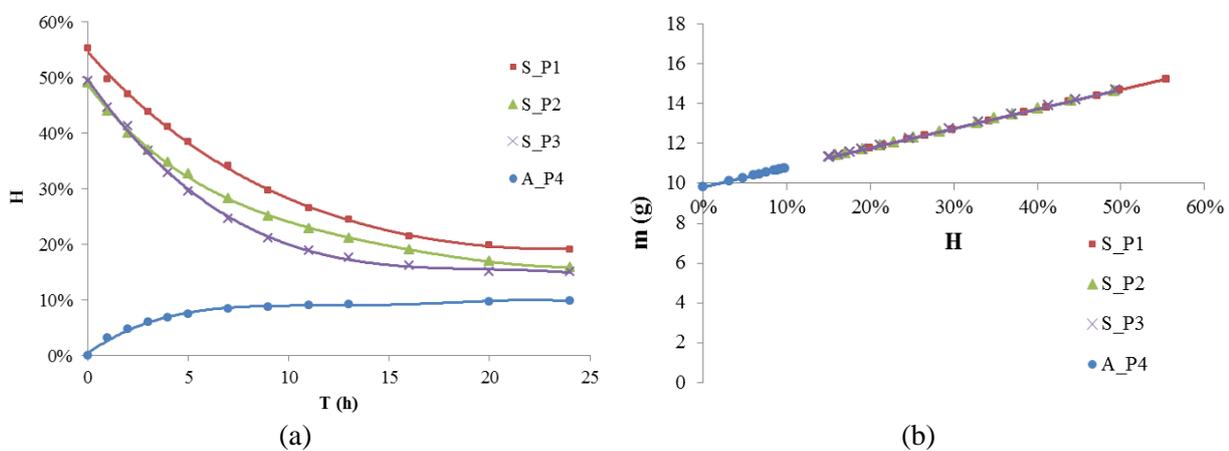


Figura 28 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) Pinho bravo.

Os resultados apresentados no quadro 5, revelam que a absorção de água na primeira saturação (S_P1) é superior relativamente às outras duas saturações. Começando com um teor de água de 55,4% e terminando por estabilizar nos 19,1% de teor de água. Já as outras saturações obtiveram valores semelhantes, iniciando com um teor de água a rondar os 49,2% e estabilizando em 15,9% (S_P2) e 15% (S_P3). Relativamente à estabilização dos provetes anidros, A_P4, apresentam uma estabilização mais rápida que os provetes saturados, conseguindo estabilizar nas primeiras 9 horas, com um teor de água de 9,8%.

O Pinho bravo apresenta um comportamento linear no processo de estabilização dos provetes nas Tarefas 1 e 2.

A Figura 29 apresenta a variação dimensional na direção radial e tangencial da tarefa 1 e 2.

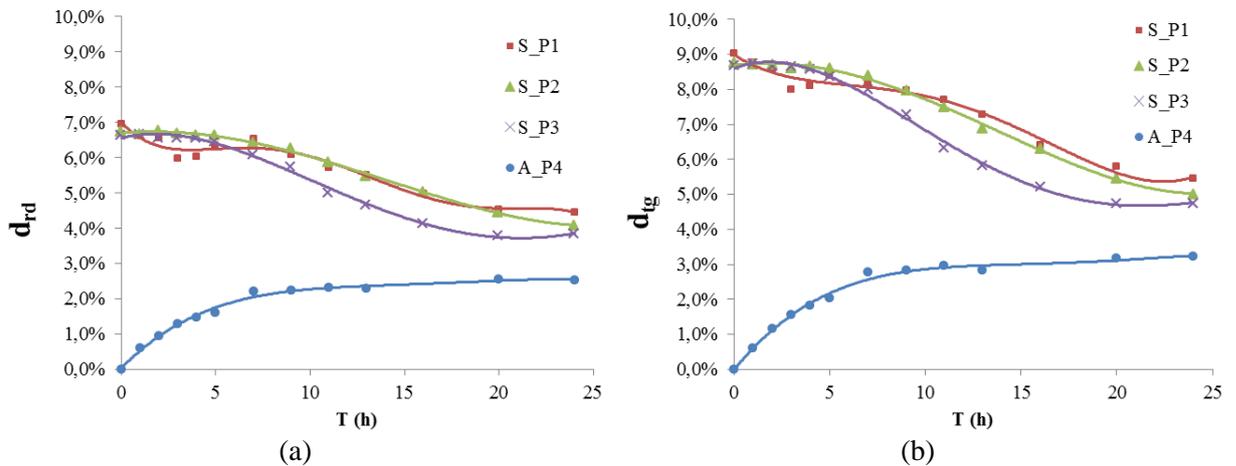


Figura 29 – Variação dimensional nas direcções radial (a) e tangencial (b) em função do tempo (Pinho bravo).

No Pinho bravo a diferença entre a retração radial e tangencial é bem visível. A direção radial entre provetes saturados (S_P1, S_P2 e S_P3), apresenta valores iniciais (T=0) inferiores á direção tangencial de 2,1%, terminando com uma diferença de 1% após 24 horas. Nos provetes anidros (A_P4) adquire-se a mesma informação, a direção tangencial é a que apresenta valores superiores, com uma diferença de 0,7% da direção radial.

A Figura 30 diz respeito à variação do teor de água (H) dos provetes da tarefa 3 e 4, ao longo de 24 horas.

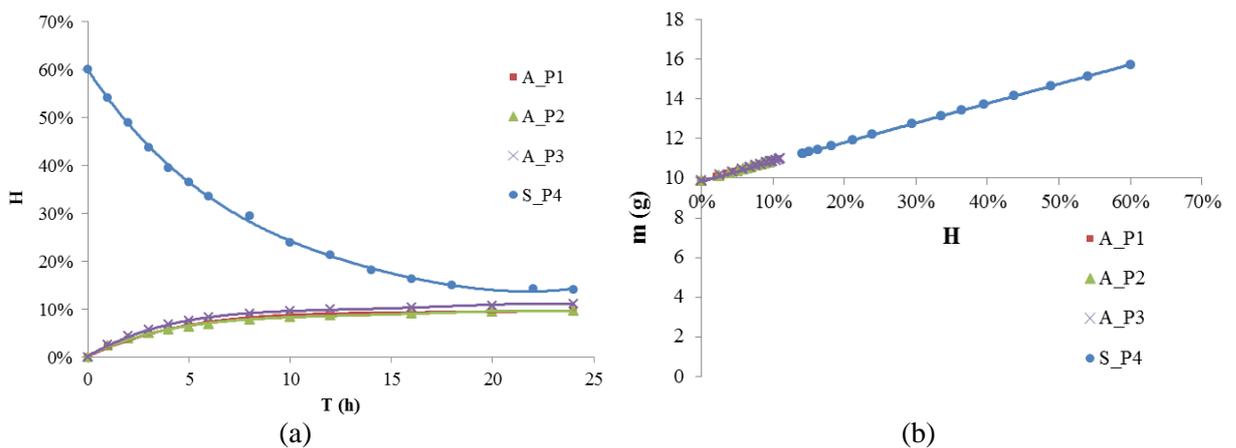


Figura 30 – Curvas teor de água – tempo (a); Curvas teor de água – massa (b) Pinho bravo.

A estabilização dos provetes anidros (A_P1, A_P2 e A_P3) é atingida nas primeiras 8 horas. Os provetes da última secagem apresentam um teor de água maior que os restantes, cerca de

1,5% maior, terminando com 11,1% de teor de água. Os provetes saturados (S_P4) apresentaram um H inicial de 60,1%, terminando estabilizados com 14,1%.

A tendência linear é visível no comportamento da massa, em função do teor de água, no processo de estabilização dos provetes das Tarefas 2 e 3.

A Figura 31 apresenta a variação dimensional do provete na direção radial e tangencial da tarefa 3 e 4.

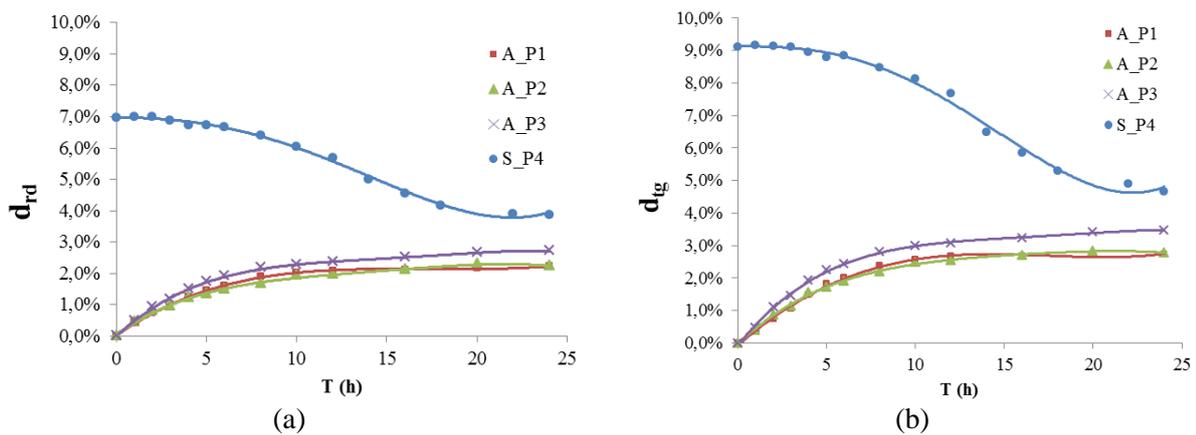


Figura 31 – Variação dimensional nas direções: (a) radial e (b) tangencial, em função do tempo (Pinho bravo).

Mais uma vez é visível a superioridade na variação direção tangencial. Os provetes da terceira secagem (A_P3) obtiveram uma variação radial e tangencial superior à das duas primeiras secagens, cerca de 0,5% e 0,7%, respectivamente. Os provetes saturados (S_P4) na primeira medição mostraram uma variação radial de 6,8% e uma variação tangencial de 9,1%.

A figura abaixo ilustra a variação do teor de água dos provetes saturados (a) e anidros (b) da segunda e terceira etapa do programa experimental.

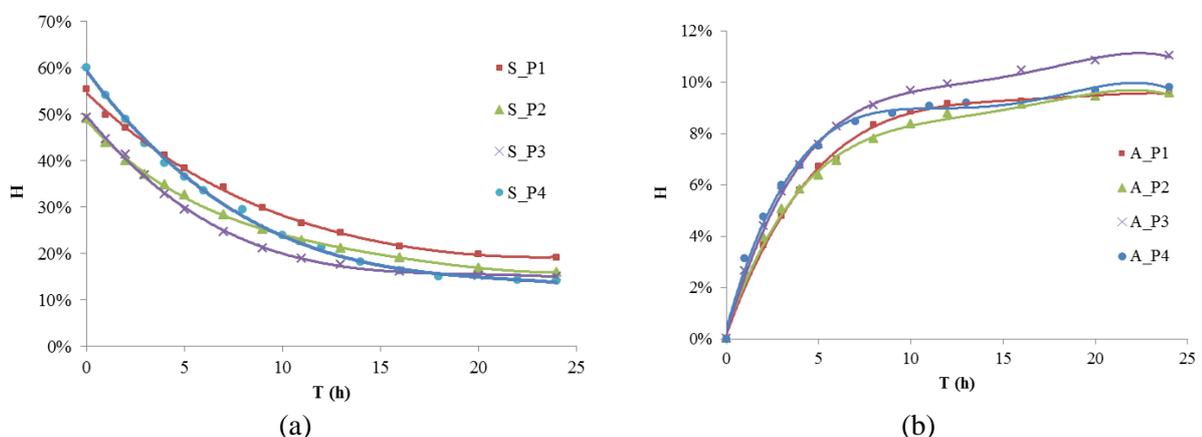


Figura 32 – Curvas teor de humidade – tempo: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros

A evolução das curvas da figura anterior mostra que os provetes demonstram a mesma tendência, não sendo tão perceptível o envelhecimento dos mesmos.

Na figura seguinte é apresentado a variação dimensional na direção radial e tangencial dos provetes saturados (1) e anidros (2) da segunda e terceira etapa do programa experimental.

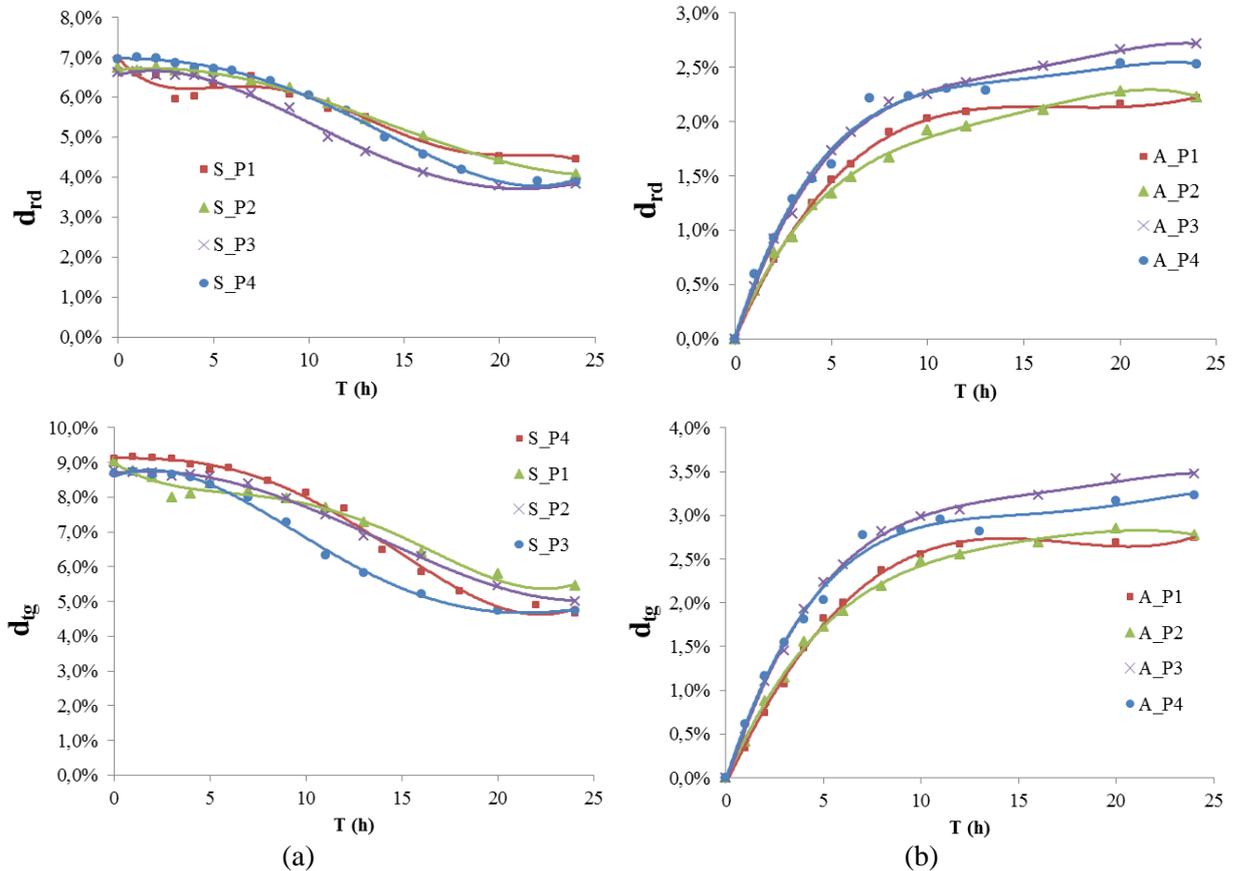


Figura 33 – Variação dimensional na direção radial: (a) provetes saturados; (b) provetes anidros

Ao contrário do que acontece com a madeira tratada termicamente, o Pinho demonstra uma evolução semelhante nas curvas que apresenta, tanto na direção radial como na tangencial.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

No capítulo seguinte faz-se a análise do comportamento de cada espécie, de forma a compreender as diferenças entre cada uma.

4.1 Teor de Água (H)

Na Figura 34 é apresentado a variação do teor de água (H) dos provetes das tarefas 1 e 2.

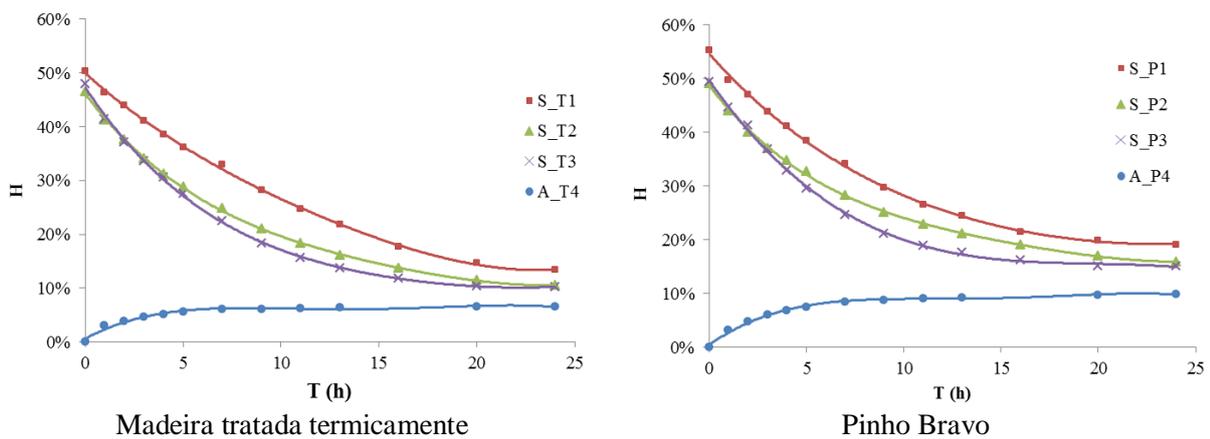


Figura 34 – Curvas teor de água – tempo.

Em termos de teor de água nos provetes saturados (1,2 e 3) é visível que a madeira tratada, tem uma diminuição do teor de água mais acentuada que o Pinho bravo, estabilizando por volta dos 14,2%, enquanto o Pinho bravo armazena mais quantidade de água, estabilizando por volta dos 16,7%. Os provetes anidros (4) da Madeira tratada e Pinho bravo estabilizam em 7 e 9 horas, respetivamente, o que prova que a Madeira tratada termicamente estabiliza mais rapidamente, com um valor final de teor de água de 6,5% e 9,8%, respetivamente.

Na Figura 35 é apresentado a variação do teor de água (H) dos provetes das tarefas 3 e 4.

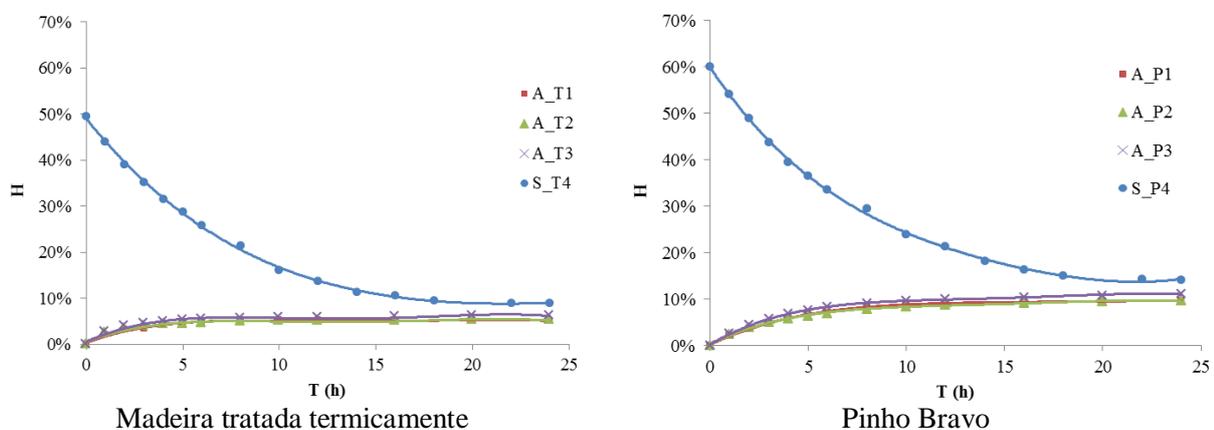


Figura 35 – Curvas teor de água – tempo.

Na figura anterior é claramente visível que os provetes da madeira tratada termicamente anidros (1, 2, 3) estabilizaram mais rápido e com um teor de água inferior que o Pinho bravo, 6% e 10% respectivamente. Os provetes saturados (4) da madeira tratada apresentaram um teor de água 10% inferior ao Pinho bravo, estabilizando nos 9% e 14%, respetivamente.

4.2 Variação Radial

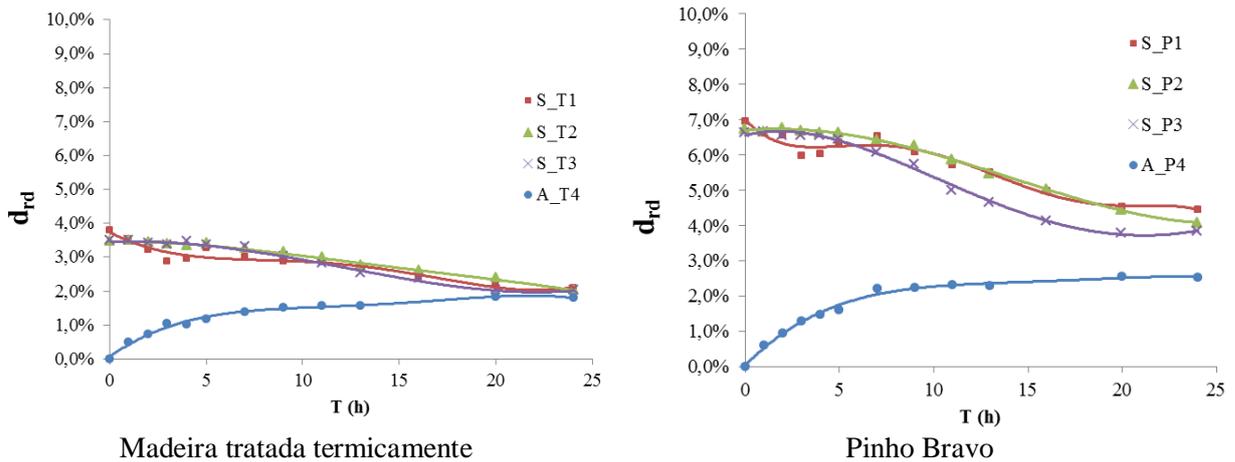


Figura 36 – Variação dimensional na direção radial em função do tempo.

Como previsto, a Madeira tratada termicamente apresenta uma variação radial menor comparada que o Pinho bravo, destacando-se na última leitura (24 horas) que quase obteve a mesma variação tanto nos provetes saturados (1, 2 e 3) como nos provetes anidros (4). O mesmo não aconteceu com o Pinho pois apresenta uma grande variação na direção radial quando os provetes estão saturados (1, 2 e 3). A diferença da primeira medição entre as duas espécies ronda os 3,2%, enquanto que a última medição (24 horas) a diferença foi de 2,2%.

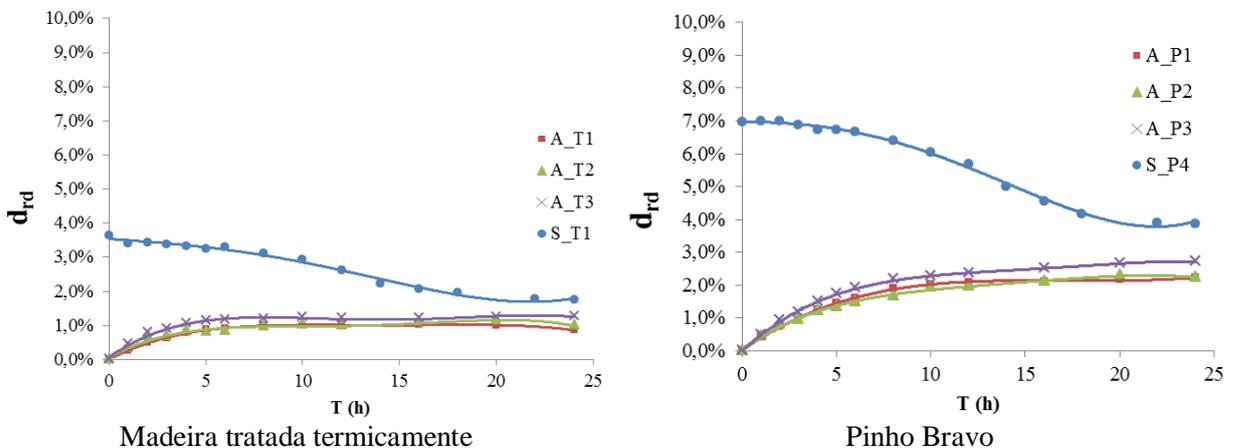


Figura 37 – Variação dimensional na direção radial em função do tempo.

No processo inverso ao anterior é visível o mesmo comportamento. Na primeira medição os provetes saturados (4) apresentam uma diferença de 3,3% enquanto que na última medição apresentam uma diferença de 2.1%, semelhante ao ocorrido no processo anterior.

Os valores dos coeficientes de retração radial são ilustrados no quadro seguinte.

Quadro 6 – Valores médios do coeficiente de retração radial

Coeficiente de retração				
	Direção radial (% / %)			
Madeira tratada termicamente	S_T1	S_T2	S_T3	S_T4
	0,057	0,070	0,073	0,071
Pinho bravo (<i>pinus pinaster</i> , ait)	S_P1	S_P2	S_P3	S_P4
	0,073	0,085	0,091	0,092

O coeficiente de retração radial aumenta com os sucessivos processos de saturação/estabilização. O Pinho bravo obteve um coeficiente de retração radial cerca de 0,018 superior ao da madeira tratada.

Os valores dos coeficientes de inchamento radial são ilustrados no quadro seguinte.

Quadro 7 – Valores médios do coeficiente de inchamento radial

Coeficiente de inchamento				
	Direcção radial (% / %)			
Madeira tratada termicamente	A_T1	A_T2	A_T3	A_T4
	0,017	0,017	0,017	0,019
Pinho bravo (<i>pinus pinaster</i> , ait)	A_P1	A_P2	A_P3	A_P4
	0,028	0,028	0,028	0,027

O coeficiente de inchamento radial mantém-se semelhante com os sucessivos processos de secagem/estabilização. O Pinho bravo obteve um coeficiente de inchamento radial cerca de 0,010 superior ao da madeira tratada.

4.3 Variação Tangencial

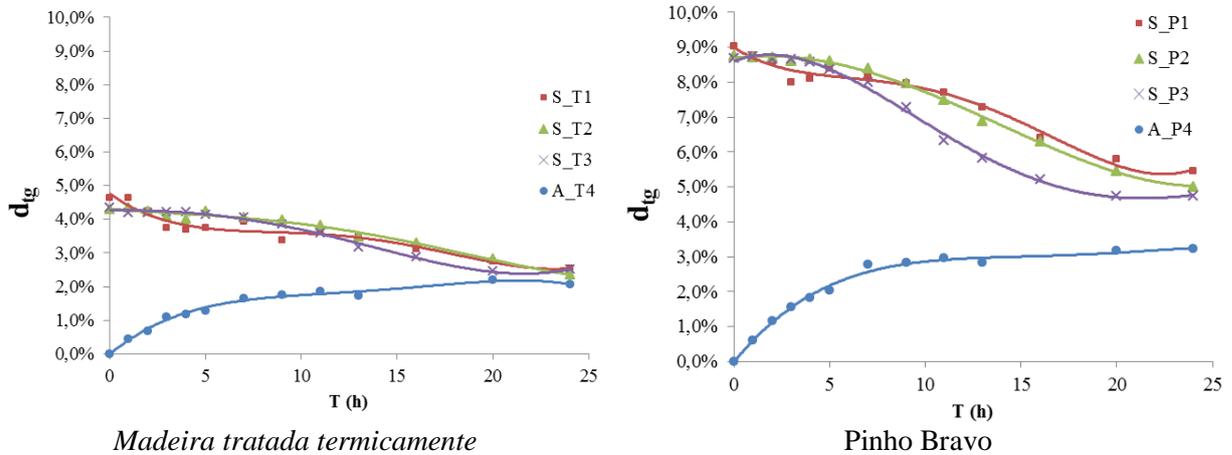


Figura 38 – Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo.

Relativamente à variação dimensional da direcção tangencial da madeira tratada termicamente apresenta, mais uma vez, uma variação muito menor comparado com o Pinho bravo. As medições realizadas nos ensaios revelam que a madeira tratada termicamente apresenta uma variação tangencial inicial a rondar os 3,5%, e o Pinho bravo cerca de 9%. Finalizando com medições da madeira tratada termicamente a 2,4% e do Pinho bravo de 5,1%.

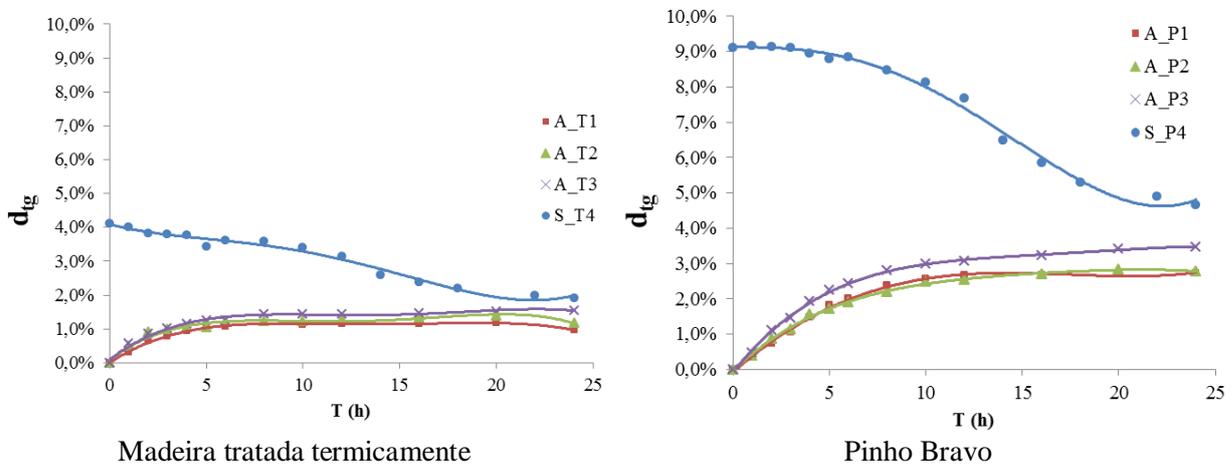


Figura 39 – Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo.

A mesma informação é adquirida no 3º processo deste trabalho experimental. Apresentando o Pinho bravo deformações excessivas. A primeira medição (T=0), os provetes saturados (4) da madeira tratada termicamente apresentam uma variação tangencial de 4% e o Pinho de 9%, estabilizando nos 1,9% e 4,7%.

Os valores médios dos coeficientes de retração tangencial são ilustrados no quadro seguinte.

Quadro 8 – Valores médios do coeficiente de retração tangencial.

Coeficiente de retração				
	Direção tangencial (% / %)			
Madeira tratada termicamente	S_T1	S_T2	S_T3	S_T4
	0,065	0,080	0,083	0,081
Pinho bravo (<i>pinus pinaster</i> , ait)	S_P1	S_P2	S_P3	S_P4
	0,093	0,011	0,012	0,013

O coeficiente de retração tangencial também aumenta com os sucessivos processos de saturação/estabilização e como esperado é superior ao coeficiente de retração radial. O Pinho bravo obteve um coeficiente de retração tangencial cerca de 0,032 superior ao da madeira tratada termicamente.

Os valores médios dos coeficientes de inchamento radial são ilustrados no quadro seguinte.

Quadro 9 – Valores médios do coeficiente de inchamento tangencial

Coeficiente de inchamento				
	Direção tangencial (% / %)			
Madeira tratada termicamente	A_T1	A_T2	A_T3	A_T4
	0,019	0,019	0,019	0,022
Pinho bravo (<i>pinus pinaster</i> , ait)	A_P1	A_P2	A_P3	A_P4
	0,038	0,038	0,038	0,035

O coeficiente de inchamento tangencial mantém-se semelhante com os sucessivos processos de secagem/estabilização, à exceção dos provetes A_T4 da madeira tratada termicamente que obtiveram um coeficiente cerca de 0,025 maior. O Pinho bravo obteve um coeficiente de inchamento tangencial cerca de 0,017 superior ao da madeira tratada termicamente.

5 CONCLUSÕES GERAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Este capítulo destina-se às considerações finais que se obtiveram ao logo deste trabalho como sugestões de forma a melhorar a execução dos próximos trabalhos a executar e como sugestão de estudos que poderão ser feitos relativos a este tema.

Com a pesquisa efetuada e com o trabalho experimental realizado chega-se às seguintes conclusões:

- A madeira tratada termicamente apresenta resultados vantajosos relativamente à relação entre teor de água e instabilidade dimensional na direcção radial e tangencial, quando comparado com o Pinho bravo. Para além dos provetes da madeira tratada termicamente serem de maior dimensão, absorvem a mesma percentagem de água que o Pinho e apresentam deformações até 3,3% inferiores;
- Tanto na madeira tratada termicamente como no Pinho bravo a massa dos provetes apresenta um comportamento linear em função do teor de água;
- A direcção radial apresenta uma variação mais baixa do que a direcção tangencial, tanto na madeira tratada termicamente como no Pinho bravo (cerca de 2%);
- O envelhecimento da madeira é perceptível tanto na madeira tratada termicamente como no Pinho bravo, sendo o Pinho bravo aquele que apresenta uma maior diferença relativamente à sua forma inicial;
- O coeficiente de retração radial e tangencial é superior nos provetes de Pinho bravo;
- O coeficiente de retração do Pinho bravo obteve um valor médio de 0,084 na direcção radial e 0,011% na direcção tangencial;
- O coeficiente de retração da madeira tratada termicamente obteve um valor médio de 0,067 na direcção radial e 0,076 na direcção tangencial;
- O coeficiente de inchamento radial e tangencial é superior nos provetes de Pinho bravo;
- O coeficiente de inchamento do Pinho bravo obteve um valor médio de 0,028 na direcção radial e 0,037 na direcção tangencial;
- O coeficiente de inchamento da madeira tratada termicamente obteve um valor médio de 0,018 na direcção radial e 0,020 na direcção tangencial;
- O Pinho bravo apresenta maior teor de água quando estabilizado, devido à sua excessiva deformação microscópica quando saturado;

- Este estudo direciona-se para o melhor conhecimento da variação dimensional das madeiras tratadas e resinosas, de forma obter uma seleção mais adequada para o fim a que está destinada.

5.1 Desenvolvimentos futuros

Sugestões de melhoramento:

- O método utilizado para medir a direção radial e a direção tangencial deveria ser mais preciso. Extensómetros ou até mesmo DIC (Digital Image Correlation) são opções mais seguras na obtenção da variação dimensional dos provetes;
- Os provetes das espécies deveriam ter a mesma dimensões de forma a entender com mais precisão os tempos de estabilização e a capacidade de perda/ganho de água;
- A câmara climática deveria ter uma variação de humidade menor do que 5%.

Para desenvolvimentos futuros:

- O estudo do comportamento da madeira relativamente à variação dos parâmetros estudados neste trabalho (variação da massa e variação dimensional) mas submetida a variações de humidade em espaços fechados (coberturas de ginásios, piscinas e habitações em madeira) e em espaços abertos (fachadas de madeira);
- O estudo do comportamento de espécies que são utilizadas em ambientes de grandes variações de humidade;
- O estudo do comportamento de outro tipo de madeira tratada quanto à instabilidade dimensional na direcção radial e tangencial, e massa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affonso, E. A., Barbosa, M. A., & Vilató, R. R. (1999). *Madeira: Princípios da ciência dos materiais aplicados aos materiais de construção civil*. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Almeida, P. A. (s.d.). *Madeira como material estrutural*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Anastácio, R. S. (2010). *Especificação de protecção fogo para estruturas de madeira*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Branco, J.M.G. (2003). *Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira -betão*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães.

Britez, C. A., & Nogueira, V. (2006). *Princípios da Ciência dos Materiais Aplicados aos Materiais de Construção Civil: Inter-relação entre as propriedades e a microestrutura das madeiras*. Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Carvalho, Albino (1996). *Madeiras Portuguesas*. Vol. I - Estrutura Anatómica, Propriedades, Utilizações. Instituto Florestal, Lisboa. Portugal

Correia, V. M. (2001). *A utilização da madeira na manufactura do mobiliário*. Instituto de Artes e Ofícios Universidade Autónoma de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Costa, A. (2001). *Coletâneas de anatomia da madeira*.

Costa, J. C. (2011). *Influência da água no comportamento de madeiras resinosas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

Esteves, B., & Pereira, H. (2009). *Novos métodos de protecção da madeira*. 6º Congresso florestal nacional. Ponta Delgada, Açores. Portugal.

Esteves, M. B., Machado, J.S., Nunes, L. (2011). *Utilização de madeira modificada na construção*. CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção, 7-9/06/2011, Coimbra, PORTUGAL

Ficha M2: Pinho bravo para estruturas. Série Madeira para Construção: LNEC, Lisboa

Finnish Thermowood Association. (2003). *Madeira tratada termicamente Handbook*. Helsinki, Finland.

Franco, S. I. (2008). *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in-situ*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Gominho, J., Knapic, S., & Pereira, H. (s.d.). *Cerne e Borne - Factores de variação da qualidade tecnológica das árvores*. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.

Jankowsky, I. P., & Galvão, A. P. (1979). *Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira*. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Brasil

Klitzke, R. J. (s.d.). *Curso de secagem da madeira*. Universidade Federal do Paraná. Brasil.

Machado, N. C. (2006). *Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal.

Mahapatra, K., & Gustavson, L. (2009). *General conditions for construction of multi-storey wooden buildings in Western Europe*. School of Technology and Design. Reports, No.59. Växjö University. Växjö, Sweden.

Martins, J. G., & Araújo, J. (2005). *Madeiras*. Monografia do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2º Edição. Porto, Portugal.

Martins, J. G., & Vieira, A. (2004). *Derivados de madeira*. Monografia do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1º Edição. Porto, Portugal.

Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho bravo e Madeira tratada termicamente

Montezuma, F. (2010). Exploração Ilegal de Madeira. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Energia e Bioenergia. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Silva, G. B. (2009). *Madeira*. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Maringá, Brasil.

Stamato, G. C., & Góes, J. L. (s.d.). *A madeira como material estrutural*.