

**CARATERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DA MADEIRA DE CARVALHO E DE
CASTANHO DO NORDESTE TRANSMONTANO**

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Construção

Paula Cristina Brasil Borges

Orientadora: Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Coorientadora: Elza Maria Morais Fonseca

IPB
Bragança, 2013

Orientador:

Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

IPB - Bragança

Coorientadora:

Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca

IPB - Bragança

*Tese apresentada na Escola Superior de
Tecnologia e Gestão de Bragança para
efeito de obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil (CARATERIZAÇÃO
DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DA MADEIRA DE
CARVALHO E DE CASTANHO DO
NORDESTE TRANSMONTANO).*

Dedico este trabalho à minha querida mãe e à memória do meu pai.

Agradecimentos

Aproveito este espaço para agradecer às várias pessoas que tiveram um papel fulcral na realização deste trabalho, porque sem elas o resultado certamente não seria o mesmo.

Em primeiro lugar, deixo o meu agradecimento sincero à minha orientadora Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira, por todo o tempo disponibilizado, pelo encorajamento e compreensão nos momentos em que mais necessitei e por todo o empenho e dedicação que mostrou ao longo de todo este trabalho, tendo sempre uma resposta e uma solução para todas as minhas dúvidas.

À minha coorientadora Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca que com o seu apoio e exigência, me permitiu aprofundar significativamente o meu conhecimento, ultrapassar obstáculos e levar a bom porto este trabalho.

À minha irmã, Mariana, pelo incentivo, cumplicidade e acompanhamento do desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, em particular a minha mãe, gostaria ainda de exprimir o mais profundo agradecimento, por todo o amor, motivação e apoio incondicional na minha formação.

Ao meu namorado, Adriano Soares, pelo carinho, compreensão, paciência, apoio e, acima de tudo, pelos incentivos constantes.

A todos os meus colegas e amigos, em especial a Cristiana Pinto que de alguma forma estiveram envolvidos neste projeto, pelo seu interesse, atenção e amizade.

À Universidade do Minho, pela disponibilização de meios e de infra-estruturas necessárias à realização deste trabalho, nomeadamente o acesso ao Laboratório de Ensaios de Engenharia Civil.

À Eng^a Luísa e Eng.º Meireles, dos laboratórios da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, pela ajuda prestada na elaboração dos provetes e execução dos ensaios a tração necessários à realização do programa experimental.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para tornar esta dissertação uma realidade, o meu bem-haja.

Sumário

O escasso conhecimento do comportamento da madeira dificulta a sua utilização em projeto. O conhecimento das suas características e propriedades e os fatores que influenciam o seu comportamento físico e mecânico ajudarão a inverter esta tendência.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de duas espécies de madeira: o castanho e o carvalho. Numa primeira fase foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre estas duas espécies de madeira, em função: da origem; formação; singularidades e características básicas, atendendo à maior importância para o desempenho estrutural, como o teor em água, variação dimensional e massa volúmica. Foi dada especial atenção à leitura das várias normas e procedimentos relativos à caracterização mecânica da madeira. Numa segunda fase do trabalho foram efetuados diferentes ensaios em laboratório para verificação e análise dessas propriedades. Os ensaios foram divididos em dois grupos: estudo da variação dimensional das duas espécies de madeira, na presença de água; e avaliação do comportamento mecânico, através de ensaios à tração, para melhor compreensão das características e comparação com outras madeiras. Foi estabelecido um programa de ensaios laboratoriais criterioso, com base em procedimentos normativos e estudos recentes da bibliografia, tendo sido ainda desenvolvidos procedimentos de ensaio adicionais.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira, variação dimensional, tração.

Abstract

The limited knowledge in wood behaviour prevents their use in design. The knowledge of its proprieties and characteristics but also the factors that influence its physic and mechanic behaviour will help to invert this tendency.

The main goal of this work was to evaluate the physic and mechanical properties in two species of wood: the chestnut and the oak. In a first step a bibliographical research was conducted about these two species of wood, depending on: the origin; formation; singularities and basic characteristics, according to major importance for the structural development, such as water content, dimension variation and density. It has been given special attention to the reading of multiple standards and procedures, respecting the mechanical characterization of wood. In a second phase of the work, different tests in laboratory for verification and analysis of those properties were performed. The tests were divided in two groups: dimensional variation study for two wood species, in the presence of water; and evaluation of the mechanical behaviour by traction tests, in order to better understand those characteristics and comparison with other wood species. It has been established a schedule of thorough laboratory examination based on normative procedures and recent studies of the literature, having been developed as well additional test procedures.

KEYWORDS: wood, dimensional variation, tensile.

Conteúdo

Agradecimentos.....	III
Sumário	IV
Abstract.....	V
Conteúdo.....	VI
Índice de figuras	X
Índice de tabelas	XIII
Nomenclatura	XIV
Simbologia	XIV
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Introdução	2
1.2 Objetivos do trabalho.....	3
1.3 Organização do trabalho	4
Capítulo 2	5
Estado da arte	5
2.1 O coberto vegetal português.....	6
2.2 Exploração florestal, extração do material lenhoso.....	7
2.3 A sub-região de Bragança.....	8
2.4 Classificação botânica.....	8
2.4.1 Fisiologia.....	9
2.5 Estrutura microscópica e composição química da madeira	11
2.6 Estrutura da parede celular.....	12
2.7 Composição Química da madeira.....	13
2.7.1 Substâncias macromoleculares	13
2.8 Construção sustentável.....	14

2.9	Reabilitação.....	15
2.10	Vantagem da aplicação da madeira	15
2.10.1	Vantagens de uma casa em madeira	16
2.10.2	Conforto térmico e acústico	17
2.10.3	Durabilidade	17
2.11	O material lamelado colado.....	18
2.11.1	Principais características mecânicas:	18
Capítulo 3	20
Variação dimensional e resistência à tração da madeira	20
3.1	Introdução	21
3.2	Classificação da madeira.....	22
3.2.1	Classificação de Qualidade da madeira	22
3.3	Propriedades mecânicas	23
3.4	Resistência mecânica à tração	25
3.4.1	Limite de proporcionalidade	26
3.4.2	Região de comportamento plástico.....	27
3.4.3	Transição elasto-plástica	28
3.4.4	Limite de Resistência à tração.....	28
3.4.5	Limite de Rotura.....	29
3.4.6	Modo de Rotura.....	29
3.5	Propriedades físicas da madeira	30
3.5.1	Teor em água e higroscopicidade	31
3.5.2	Massa volúmica	32
3.5.3	Retractilidade.....	33
3.5.4	Reação e resistência ao fogo	35
3.6	Temperatura	35

Capítulo 4	36
Programa experimental	36
4.1 Introdução	37
4.2 Principais características de madeiras em estudo.....	37
4.3 Estabilidade dimensional da madeira na presença de água.....	40
4.4 Obtenção das amostras.....	40
4.5 Início dos Ciclos	41
4.6 Resistência mecânica à tração	45
4.7 Obtenção das amostras.....	45
4.8 Preparação dos Provetes	46
4.9 Realização do ensaio de tração.....	48
4.10 Extensometria	49
Capítulo 5	51
Resultados do programa experimental	51
5.1 Variação dimensional	52
5.2 Variação da massa	61
5.3 Teor em água.....	64
5.4 Massa volúmica de referência	67
5.5 Resistência mecânica à tração	71
5.6 Ensaio destrutivo	72
5.6.1 Castanho na direção longitudinal ao fio.....	72
5.6.2 Carvalho na direção longitudinal ao fio	74
5.6.3 Castanho na direção perpendicular ao fio	76
5.6.4 Carvalho na direção perpendicular ao fio	78
5.7 Análise dos Ensaio Destrutivos	80
5.8 Resultados dos Ensaio com aplicação de extensómetros	83

Capítulo 6	85
Conclusões e futuros desenvolvimentos	85
6.1 Conclusões e Futuros Desenvolvimentos	86
6.2 Futuros desenvolvimentos.....	87
7 Bibliografia	88
Anexos	91

Índice de figuras

Figura 1- Mapa síntese do ordenamento florestal do Norte Transmontano, [3]	8
Figura 2- Corte transversal da árvore, [5].....	9
Figura 3- Direções principais de corte no tronco de uma árvore [6].....	10
Figura 4- Aspeto microscópico da madeira de resinosas, [7]	11
Figura 5- Aspeto macroscópico da madeira, [7]	12
Figura 6- Estrutura da parede celular, [7].....	12
Figura 7- Construção em madeira, [10].....	16
Figura 8- Coberturas em ambientes agressivos.....	19
Figura 9- Diagrama de valores de resistência global da madeira em função do esforço instalado [7].....	24
Figura 10- Curva tensão-deformação convencional.....	26
Figura 11- Limite de proporcionalidade A'	26
Figura 12- Transição elasto-plástica, [15]	28
Figura 13- Limite de resistência à tração, [15].	29
Figura 14- Limite de rotura, [15].	29
Figura 15- Tipos de rotura observados em ensaios destrutivos: (a) lascado; (b) combinação de tração e corte; (c) corte; (d) tração pura.....	30
Figura 16- Curva tensão-deformação de diferentes materiais, [15].	30
Figura 17- Curva de retração, [5].....	33
Figura 18- Alteração da forma da secção transversal por retração [5].....	34
Figura 19- Empenos das peças de madeira serrada, [7].....	34
Figura 20- (a) - Madeira serrada em parque exterior; (b) - Tabuas colocadas na horizontal, separadas entre si por um separador na vertical; (c) - Estufa.	41
Figura 21- Dimensões do provete.	42
Figura 22- Numeração dos provetes.....	42
Figura 23- (a) - Balança utilizada; (b) - Paquímetro utilizados.	43
Figura 24- (a) - Provetes saturados em água; (b) - Provetes no forno.....	43
Figura 25- (a) - Câmara climática; (b) - Provelte nas várias direções (longitudinal, radial e tangencial); (c) - Provetes na vertical separados entre sim.....	44
Figura 26 - Máquina utilizada para a obtenção dos provetes (DMC 63V).....	46
Figura 27- Provelte na direção longitudinal as fibras.....	47
Figura 28- Provelte na direção transversal as fibras.....	47

Figura 29- (a) – Maquinagem ; (b) - Modelo do provete; (c) - Fixação do provete.....	48
Figura 30- (a) - Câmara húmida; (b e c) - Aplicação de extensómetros nos provetes.	48
Figura 31- (a) - sistema de aquisição de dados portátil (P3); (b) - Máquina universal de ensaios; (c) - provete em rotura.....	49
Figura 32 – Extensómetros uniaxiais e instalação no provete	50
Figura 33- Variação dimensional na direção tangencial dos provetes secos nos dois ciclos ...	53
Figura 34- Variação dimensional tangencial dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos	53
Figura 35- Variação dimensional radial dos provetes secos nos dois primeiros ciclos.....	54
Figura 36- Variação dimensional radial dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos	55
Figura 37- Variação longitudinal dos provetes secos nos dois primeiros ciclos	56
Figura 38- Variação dimensional dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos	56
Figura 39- Variação dimensional tangencial dos provetes secos nos três ciclos	57
Figura 40- Variação dimensional tangencial dos provetes saturados nos três ciclos	58
Figura 41- Variação dimensional radial dos provetes secos nos três ciclos	58
Figura 42- Variação dimensional radial dos provetes saturados nos três ciclos	59
Figura 43- Variação dimensional longitudinal dos provetes secos nos três ciclos	60
Figura 44- Variação dimensional longitudinal dos provetes saturados nos três ciclos	60
Figura 45- Variação da massa dos provetes secos nos dois primeiros ciclos	61
Figura 46- Variação da massa dos provetes secos nos três ciclos.....	62
Figura 47- Variação da massa dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos	63
Figura 48- Variação da massa dos provetes saturados nos três ciclos	64
Figura 49- variação do teor em água dos provetes secos nos dois primeiros ciclos	65
Figura 50- variação do teor em água dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos	66
Figura 51- Variação do teor em água dos provetes secos nos três ciclos	67
Figura 52- Valores de teor em água dos provetes saturados nos três ciclos	67
Figura 53- Variação da massa volúmica dos provetes secos nos dois primeiros ciclos.....	69
Figura 54- Variação da massa volúmica dos provetes saturados nos primeiros ciclos	69
Figura 55- Variação da massa volúmica dos provetes secos nos três ciclos	70
Figura 56- Variação da massa volúmica dos provetes nos três ensaios	71
Figura 57- (a) - Direções no desenvolvimento das fibras; (b) - Direções nas fibras quando aplicada uma força.....	72
Figura 58 – Curvas tensão-deformação do castanho na direção longitudinal.	73

Figura 59 - Rotura nos provetes de castanho na direção longitudinal ao fio: (CTL2 e CTL3) corte; (CTL4, CTL5 e CTL6) combinação de corte com tração.....	73
Figura 60- Curvas tensão-deformação do carvalho na direção longitudinal	75
Figura 61- Rotura nos provetes de carvalho na direção longitudinal ao fio: (CVL2 e CVL3) combinação de corte com tração; (CTL4, CTL5) corte.....	75
Figura 62- Curvas tensão-deformação do castanho na direção transversal	77
Figura 63- Rotura nos provetes de castanho na direção perpendicular ao fio: Todos os provetes têm uma rotura por lascamento.	77
Figura 64- Tensão de formação do carvalho na direção transversal	79
Figura 65- Rotura nos provetes de carvalho na direção perpendicular ao fio: Todos os provetes têm uma rotura por lascamento.	79
Figura 66- Médias dos valores do módulo de elasticidade registadas em ensaio.	81
Figura 67- (a) - Zonas que não se deve retirar amostra; (b) - Amostras de madeiras resinosas, (c) - amostra de madeiras folhosas	82
Figura 68- Valores obtidos nos ensaios para a tensão de rotura	83

Índice de tabelas

Tabela 1-Principais características da madeira de castanho, [9]	38
Tabela 2-Principais características da madeira de carvalho, [9].....	39
Tabela 3 – Designação dos provetes 1º e 2º ciclo	44
Tabela 4 - Designação dos provetes 3º ciclo.....	44
Tabela 5 - Designação dos Proves à tração.....	46
Tabela 6- Dimensões dos provetes de castanho na direção longitudinal ao fio.....	72
Tabela 7- Resultados do ensaio	74
Tabela 8- Dimensões dos provetes de carvalho na direção longitudinal ao fio	74
Tabela 9- Resultados do ensaio	76
Tabela 10- Dimensões dos provetes de castanho na direção transversal ao fio	76
Tabela 11 – Resultados do ensaio	78
Tabela 12- Dimensões dos provetes de carvalho na direção perpendicular ao fio	78
Tabela 13- Resultados do ensaio	80
Tabela 14- Coeficiente de Poisson	83

Nomenclatura

Os símbolos apresentados neste relatório são definidos, sempre que possível, durante a escrita do relatório. No entanto, e de modo a facilitar a consulta posterior deste documento, foi elaborada uma lista com a síntese dos símbolos mais utilizados.

Simbologia

E - Módulo de elasticidade

σ - Tensão normal

ν - Coeficiente de Poisson

ε - Deformação normal

Δl - Variação do comprimento

L_0 - Comprimento inicial

TAE - Teor de água de equilíbrio

TA - Teor de água

PSF - Ponto de saturação das fibras

ΔT - Variação na direção tangencial

ΔL - Variação na direção longitudinal

ΔR - Variação na direção radial

m_1 - Massa da madeira húmida

m_2 - Massa da madeira seca

ρ - Massa volúmica

d_1 - Dimensão do provete seco ou saturado, ao longo do tempo

d_0 - Primeira dimensão radial, tangencial e longitudinal (no início dos ensaios experimentais)

H - Teor em água

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A madeira, proveniente de florestas bem geridas, é um recurso disponível e sustentável, sendo que adquiriu uma importância extrema devido à sua grande aplicação, nomeadamente no campo da engenharia civil.

A utilização deste material na construção tem uma longa história, desde as primeiras tribos de primatas até aos dias de hoje. A sua aplicabilidade foi evoluindo e os tratamentos para aumentar a sua resistência foram-se desenvolvendo com o avanço tecnológico e industrial. A constante evolução e a durabilidade apresentadas pela madeira podem ser observadas na maioria das construções antigas.

De facto, a madeira foi ao longo de diferentes períodos, o material com maior relevância na construção. Esta situação só teve uma significativa diminuição durante a Revolução Industrial, passando, então, e nesta época, a ser aplicada em construções de pequenas dimensões. Foi especialmente, e por este acontecimento, que surgiram novas técnicas de construção, tendo nessa altura surgido conjuntamente ferramentas metálicas que permitiram cortar e moldar eficazmente a madeira.

As construções antigas em madeira, que se mantêm até aos nossos dias, contrariam a ideia existente acerca da qualidade desta matéria-prima. A madeira é um material tradicional desde sempre usado pelo homem com um mínimo de modificação, amplamente conhecido e trabalhado, ainda que, sobretudo, como um conhecimento empírico. A sua durabilidade comprova a sua qualidade.

Em Portugal, a utilização da madeira como elemento estrutural foi sendo, progressivamente, substituída por outros materiais, cujas propriedades eram praticamente controladas pela mão humana. Na segunda metade do século XIX, a utilização do ferro e do vidro permitiram a construção em altura, bem como a cobertura de grandes espaços, sendo o ideal para o tipo de construções utilitárias, tais como fábricas, armazéns, estações ferroviárias, entre outras. A mudança acontece com o evento da Expo98, onde a construção do Pavilhão Atlântico foi concebida em madeira. O aumento da competitividade das construções em madeira foi devido à industrialização das empresas de transformação da madeira bem como ao aparecimento da indústria da pré-fabricação de estruturas. Existe uma crescente procura desta matéria-prima, quer em Portugal como no resto do mundo. Esta crescente procura conduz a uma consequência prejudicial - o desaparecimento de massas florestais.

A desflorestação é diretamente causada pela ação do homem sobre a natureza, especialmente devido à destruição de florestas, para a obtenção de solo para cultivos agrícolas ou para extração de madeira por parte da indústria. Esta destruição em massa provoca alterações ao nível ambiental. Os estudos realizados sobre estes efeitos referem como principais causas os fatores económicos. Quando a floresta se torna mais escassa, o valor dos produtos florestais aumentam.

Florestas escassas também fazem crescer a preocupação com a perda de valores florestais, tais como a proteção da água e do solo, a biodiversidade, a recreação e a regulação do clima, como resultado surgem políticas para apoiar a proteção florestal.

Uma consequência da desflorestação é o desaparecimento de absorventes de dióxido de carbono, reduzindo a capacidade do meio ambiente de absorver as enormes quantidades deste causador do efeito estufa, agravando o problema do aquecimento global.

Para tentar combater o avanço do aquecimento global, diversos organismos internacionais propõem o reflorestamento, porém estas medidas apenas são parcialmente aceites pelos ecologistas, pois estes acreditam que a recuperação da área abatida não pode apenas ter em conta a eliminação do gás carbónico, mas também a biodiversidade de toda a região.

1.2 Objetivos do trabalho

Os principais objetivos deste trabalho de investigação são a seguir apresentados:

- Recolha de informação sobre o estado da arte em relação às duas espécies de madeira em estudo, o **Castanheiro** (*Castanea sativa* Miller) e **Carvalho negral** (*Quercus pyrenaica*), ambas provenientes do Nordeste Transmontano;
- Elaborar provetes com base em normas europeias para o projeto, corte, maquinagem e acondicionamento. Atendendo à anisotropia do material e à garantia na precisão dos resultados, os provetes foram obtidos em diferentes direções das fibras.
- Determinar a resistência mecânica à tração do carvalho-negral e do castanheiro (módulo de elasticidade, tensão de rotura, força máxima, coeficiente poisson). Utilização de extensómetros elétricos para determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, respetivamente.
- Realizar ensaios experimentais para determinar a massa volúmica do carvalho-negral e do castanheiro (cálculo da massa volúmica e coeficiente de retração volumétrica).

- Analisar resultados experimentais obtidos com outros existentes na bibliografia, para as mesmas espécies.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação foi dividida em vários capítulos, tendo como preocupação a apresentação de um encadeamento lógico, para uma fácil interpretação das sucessivas fases do estudo desenvolvido. No sentido de facilitar ao leitor a sua consulta, apresenta-se uma descrição sumária do conteúdo de cada um dos capítulos:

No **Capítulo 1**, definem-se os objetivos do trabalho, a sua estrutura e organização.

No **Capítulo 2**, é feito o enquadramento da madeira numa construção sustentável/reabilitação. Descrevem-se as particularidades do **Castanheiro** (*Castanea sativa* Miller) e **Carvalho-negral** (*Quercus pyrenaica*), espécies florestais estudadas no âmbito do presente trabalho, fazendo-se referência à sua distribuição geográfica e a vários aspetos da sua história. Enquanto madeira serrada, evidenciam-se algumas das suas características anatómicas sob vários níveis de observação, salientando-se as suas potencialidades de aplicação.

No **Capítulo 3**, a madeira é tratada como um material estrutural, descrevendo-se os procedimentos que permitem avaliar as propriedades físicas e mecânicas. Detalha-se o processo de classificação de madeiras e a relação entre classes de qualidade e classes de resistência. Faz-se uma abordagem da madeira quando exposta a ação da temperatura e humidade (retração/secagem). Faz-se referência à aplicação da madeira em caixilharias.

No **Capítulo 4**, descreve-se a fase experimental, referenciando as técnicas que foram utilizadas nos ensaios.

No **Capítulo 5**, é feita a análise e tratamento de resultados dos ensaios realizados, fazendo uma comparação com outros dados experimentais.

No **Capítulo 6**, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido, dando algumas sugestões para futura continuação deste estudo.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 O coberto vegetal português

Todas as pesquisas efetuadas mostram que o coberto vegetal depois das últimas glaciações que dominavam as montanhas de Portugal, era constituído maioritariamente por árvores do género *Quercus* (carvalhos de folha caduca, no Norte) e já em menor escala do género *Pinus* (pinheiro bravo, manso e silvestre). E esta floresta foi-se reduzindo quer pelo abate das árvores, quer pelo fogo, mas é notório um esforço para inverter esta situação com várias iniciativas de reflorestação, replantando onde anteriormente foi abatido, ou plantando simplesmente em terreno virgem.

Da mesma forma, na Madeira e nos Açores esta devastação também foi sentida, mas num espaço de tempo mais condensado o que permitiu poupar os arquipélagos de uma degradação completa da floresta original.

Devido às sucessivas reduções de mancha florestal, no século XIX foram criadas estratégias e organismos de proteção florestal, à semelhança do que já tinha acontecido noutros países da Europa, como França, Dinamarca e Holanda. No início e meados do século XX, houve a tentativa de aumentar a área florestal portuguesa, sobretudo com o recurso ao pinheiro bravo e ao sobreiro.

Fazendo uma comparação com outros países da Europa, Portugal está abaixo de países como a Finlândia, Suécia e Eslovénia, possuindo estes mais de metade do seu território com floresta. Contudo, se tivermos em conta a média da Europa, apesar da degradação progressiva, temos um país tipicamente “florestal”. A paisagem florestal cobre mais de 1/3 do território nacional e, em conjunto com outras associações vegetais, onde está presente uma grande biodiversidade.

A atividade florestal na economia nacional representa 11% das exportações totais portuguesas e 3% para o Produto Interno Bruto (PIB), abaixo dos 5% da Finlândia ou Suécia, mas podemos dizer que tem peso significativo se tivermos em conta que está na mesma ordem de grandeza das atividades agrícolas e agroalimentares ou do sector dos têxteis e vestuário, [1]. Para estimativas económicas, foram consultadas cerca de 883 unidades relacionadas com a atividade da madeira, [2]. Destaca-se neste grupo a cortiça, um derivado da madeira que é um dos produtos característicos de Portugal no Mundo. Esta atividade tem sido preponderante nas últimas décadas, sendo o Portugal atualmente o maior produtor/exportador mundial de cortiça e de produtos derivados de cortiça, [2].

2.2 Exploração florestal, extração do material lenhoso

A exploração florestal destina-se a uma gestão do reconhecimento ao nível de extração e/ou abate, comercialização e transformação das matérias-primas florestais, com vista ao aumento de produtividade do sector, ao desenvolvimento de novos produtos, de novos mercados e ainda a um aumento da valorização acrescentada dos produtos florestais.

É necessário implementar soluções práticas, que deverão ser sempre apropriadas a uma boa gestão florestal. No caso da exploração e extração da madeira torna-se de extrema importância uma orientação por etapas da monitorização desde o corte, transporte, passando pelo combate a incêndios, etapas essas a seguir apresentadas, [3]:

- Extrair os produtos resultantes da exploração florestal por tipo de utilização e valor comercial;
- De forma a evitar o aumento do risco de incêndio, deve prever-se a gestão dos resíduos florestais;
- Adequar os equipamentos, ao corte e ao tipo de extração de material lenhoso, evitando a degradação do solo, principalmente nos locais com alguma sensibilidade ecológica;
- Minimizar, sempre que possível danos sobre as árvores que ficam na floresta por abater;
- Após a exploração, realizar operações que permitam um rápido preenchimento do solo, nomeadamente a instalação de uma cobertura vegetal com espécies adequadas ao local;
- Seguir as normas de prevenção e segurança relativas a incêndios florestais, nomeadamente, que os tratores, máquinas e veículos de transporte de pesados estejam equipados com extintores, de acordo com a sua capacidade máxima;
- Ter em consideração as medidas de condicionamento de acesso, circulação e de permanência previstas legalmente;
- Deverão ser respeitadas as normas e condições de segurança, higiene e saúde no trabalho florestal;
- As viaturas e os equipamentos utilizados devem ser adequados ao trabalho florestal e respeitar as indicações técnicas dos fabricantes relativamente à manutenção e conservação das máquina, [3].

2.3 A sub-região de Bragança

Bragança situa-se na parte Norte da Região, PROF (Plano Regional de Ordenamento Florestal) do Nordeste, adjacente à região Coroa–Montesinho, a qual abrange a maior fatia de área dentro da região (20,6%), distribuída pelos concelhos de Bragança, Macedo de Cavaleiros, Vimioso e Vinhais, conforme se observa na Figura 1.

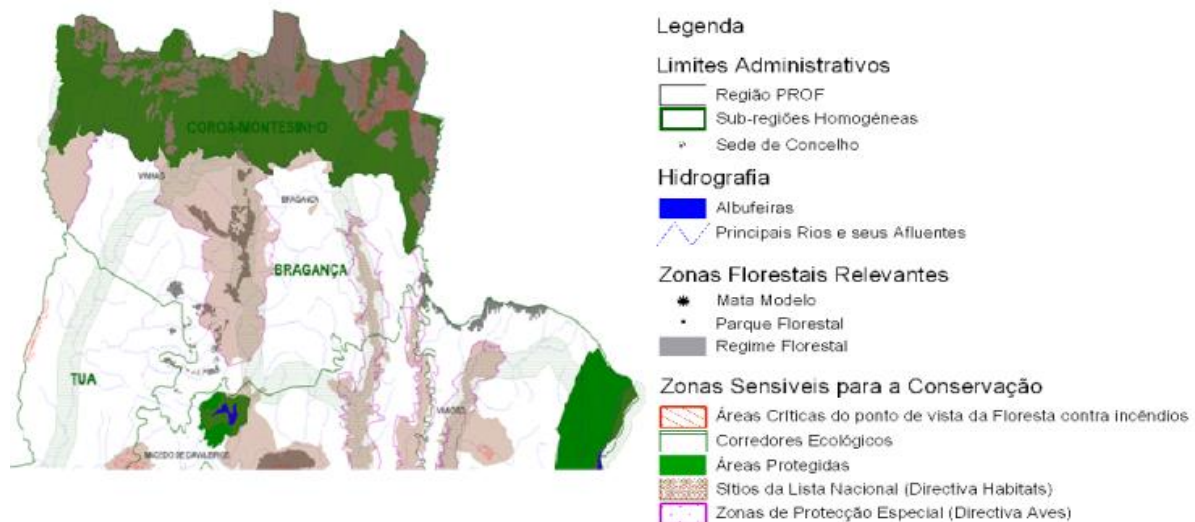


Figura 1- Mapa síntese do ordenamento florestal do Norte Transmontano, [3]

Relativamente às classes de ocupação do solo nesta sub-região, estas encontram-se distribuídas da seguinte forma: Agrícola – 42%; Espaços florestais não arborizados – 31%; Espaços florestais arborizados – 25%. O espaço florestal desta sub-região aparece maioritariamente arborizado por: castanheiro (26%), pinheiro bravo (16%) e carvalhos (42%) (Figura 1). Quanto à disponibilidade para alargamento dos espaços florestais arborizados pode considerar-se que há 33700 ha com aptidão para tal, resultante de uma elevada área agrícola e incultos que podem ser convertidos em áreas florestais arborizadas, [3].

2.4 Classificação botânica

As árvores têm uma diversidade estrutural ao nível anatómico e botanicamente as madeiras podem dividir-se em dois grandes grupos: as **Gimnospérmicas** (vulgarmente denominadas de **Resinosas, Coníferas ou madeiras brandas**) e as **Angiospérmicas** (vulgarmente denominadas de **Folhosas ou madeiras duras**).

O grupo botânico das Gimnospérmicas é subdividido em quatro, mas apenas dois destes podem ser empregues como material estrutural, sendo eles o subgrupo das coniferopsidos e

das coníferas, as mais empregues na construção. Este grupo possui grande resistência à tração e à compressão, [4].

O grupo botânico das Angiospérmicas pode ser dividido em dois grandes grupos: as dicotiledóneas e as monocotiledóneas. As dicotiledóneas, sendo mais conhecidas por folhosas, são de elevada resistência estrutural. Já as monocotiledóneas, de que são exemplo as palmeiras e os bambus, contêm madeiras bastante fibrosas e de baixa resistência estrutural, [4].

2.4.1 Fisiologia

A transformação da árvore em matéria-prima, para aplicar na construção, é feita através da extração do tronco da árvore. A Figura seguinte ilustra a constituição de um tronco. O caule é constituído por casca, líber, câmbio vascular, borne, cerne e medula,[5].

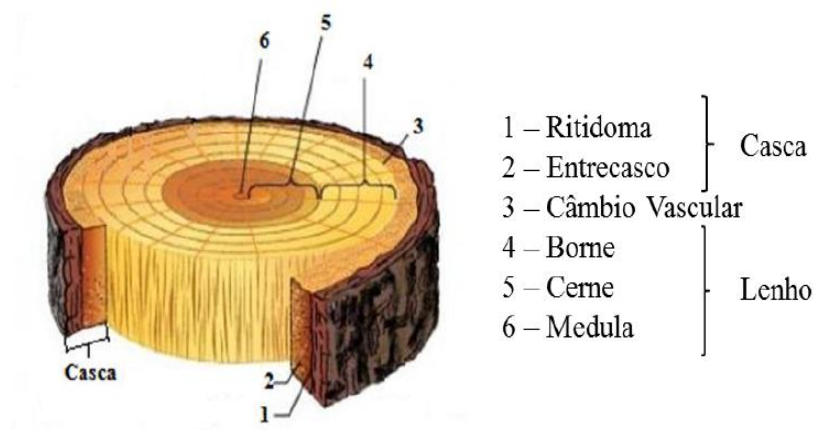


Figura 2- Corte transversal da árvore, [5]

Casca - É a parte mais exterior do tronco, possui uma cor escura e características irregulares, que são ganhas ao longo dos anos.

Entre a casca e o lenho existe o câmbio, apenas visível microscopicamente, possuindo como objetivo dar volume ao tronco, desenvolvendo casca para o exterior e lenho para a parte interior.

Lenho - É o suporte fundamental da árvore, divide-se em dois, a parte mais clara é o borne e a mais escura o cerne.

O borne é constituído por células vivas que asseguram a ligação dos sais minerais e água desde a raiz até às folhas, e ainda tem como função armazenar os produtos elaborados. A

camada mais externa, tem uma cor mais clara que o cerne, correspondendo à madeira mais jovem.

O cerne é a camada interna formada por células mortas sem qualquer tipo de função circulatória. É de verificar que esta camada vai progressivamente diminuindo desde a base até ao topo, ou seja, forma um cone interior no tronco das árvores, e as alterações do borne vão-se transformando e amplificando o cerne, [5].

No decorrer da face transversal do lenho, é de destacar o crescimento dos anéis, cujo processo de formação não é linear ao longo de ano, durante o inverno o crescimento é mais lento e na primavera mais acelerado.

Os anéis de crescimento registam a idade da árvore e são uma referência para o estudo das propriedades anisotrópicas da madeira. No estudo das propriedades físicas e mecânicas do material, podem ser efetuados ensaios em três direções (Figura (3)).

- Direção tangencial ou direção transversal tangencial aos anéis de crescimento;
- Direção radial ou direção transversal radial dos anéis de crescimento;
- Direção axial ou no sentido das fibras, longitudinais em relação ao caule, [5].

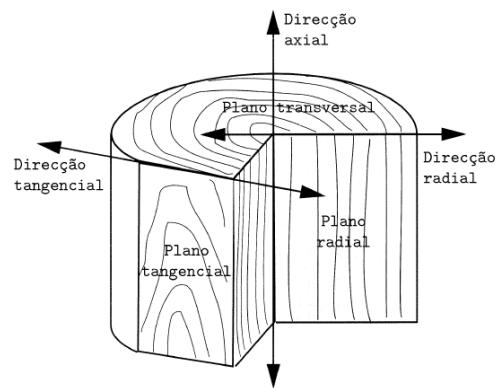


Figura 3- Direções principais de corte no tronco de uma árvore [6]

Medula - É a zona mais interna do tronco, sendo aqui que se dá o crescimento das novas camadas concêntricas e periféricas. Este elemento celular é ligado à periferia do tronco por raios medulares, estes são constituídos por células dispostas na direção radial que servem de contraventamento às fibras longitudinais, que transportam transversalmente substâncias nutritivas. A medula é constituída por um tecido mole e esponjoso, a maioria das vezes já apodrecido, sem qualquer resistência mecânica e durabilidade, [5].

Raios medulares - Desenvolvem-se radialmente e perpendicular ao eixo do tronco, têm como função o transporte transversal e armazenamento das substâncias nutritivas. Por outro lado, destacam-se na classificação da madeira.

2.5 Estrutura microscópica e composição química da madeira

As **Resinosas** possuem duas épocas de crescimento: a primeira designada como madeira de Primavera, sendo a sua função dominante, a condução; enquanto no final da estação a madeira é designada de Verão, em que a principal função é a sustentação das paredes celulares, que no final de ciclo de crescimento são mais grossas e densas do que a madeira de primavera (Figura 4). Estas diferenças moleculares podem ser observadas macroscopicamente através dos anéis de crescimento. Os traqueídeos de uma resinosa têm a dupla função de condução de seiva e suporte mecânico. O armazenamento e condução de produtos ou substâncias alimentares e metabólicas são realizados pelas células denominadas de parênquima (ou mais vulgarmente, parênquima lenhoso), que é um tecido formado de traqueídeos (células alongadas e de diâmetro constante). Nas Resinosas estas células dispõem-se longitudinalmente e na direção radial, [4].

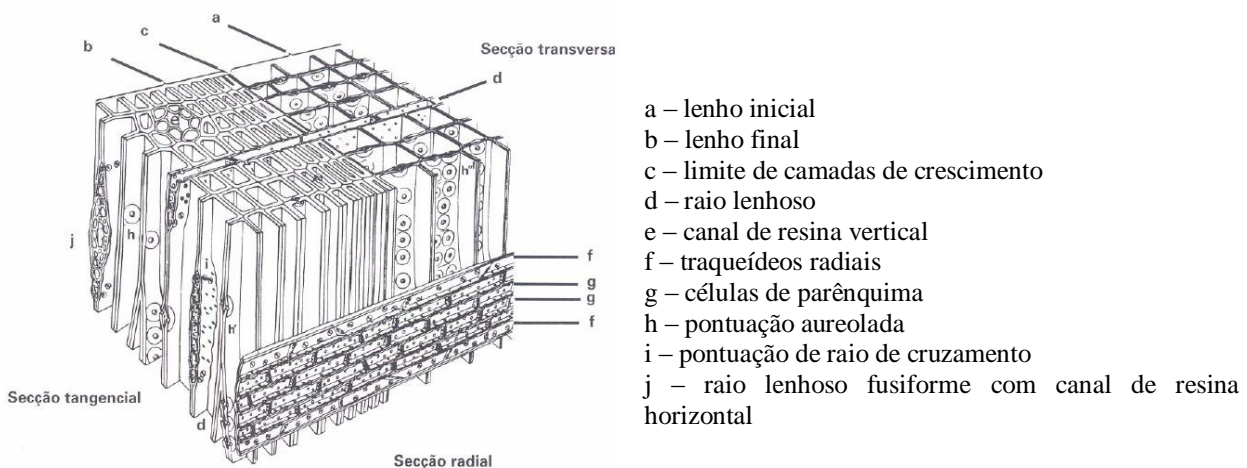


Figura 4- Aspeto microscópico da madeira de resinosas, [7]

As **Folhosas** têm um arranjo fibro-anatómico mais complexo do que o das Resinosas, sendo constituídas através de: parênquima, fibras, vasos, poros e raios lenhosos (Figura (5)). O parênquima é um tecido que tem como principal função a distribuição da seiva. Quanto às fibras, estas são células com diâmetro variável e reduzido, posicionadas longitudinalmente no caule, e junto com os traqueídeos formam o tecido básico da madeira das folhosas, existindo canais dispostos de forma concentrada (formando anéis), semi-difusa e difusa; denominados

por vasos. Por fim, os raios lenhosos são faixas de células do parênquima dispostas em fiadas radiais, [6].

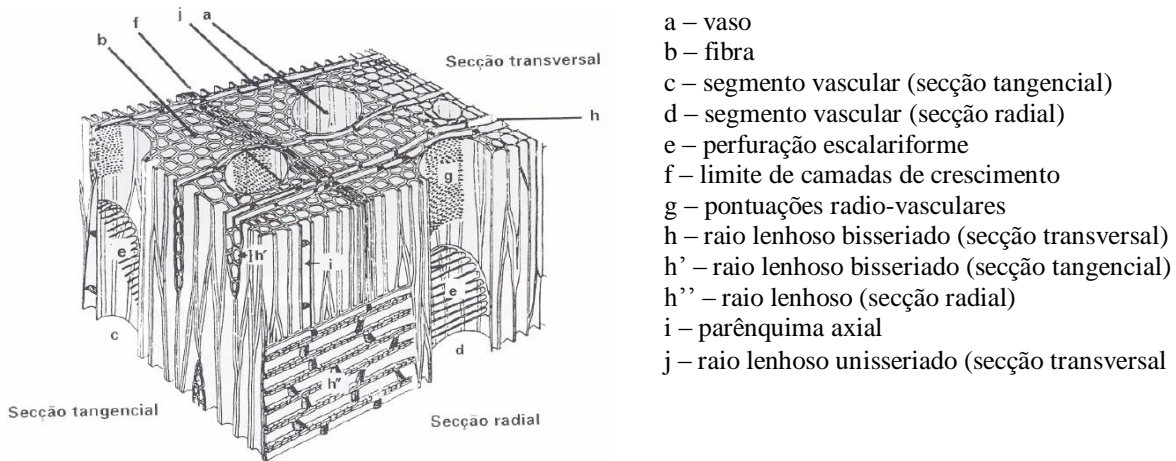


Figura 5- Aspeto macroscópico da madeira, [7]

2.6 Estrutura da parede celular

É composta por três membranas distintas: a parede primária (mais exterior, composta por fibras dispostas de forma aleatória), a parede secundária (que se divide numa sub membrana interior, numa intermédia e por fim numa exterior) e a parede intercelular (ou lamela média), que consiste numa lâmina que confina e une as células, sendo composta por uma matriz de alto conteúdo em lenhina e hemicelulose (Figura (6)), garantindo à madeira as características de resistência à tração e compressão, elasticidade e durabilidade, [4].

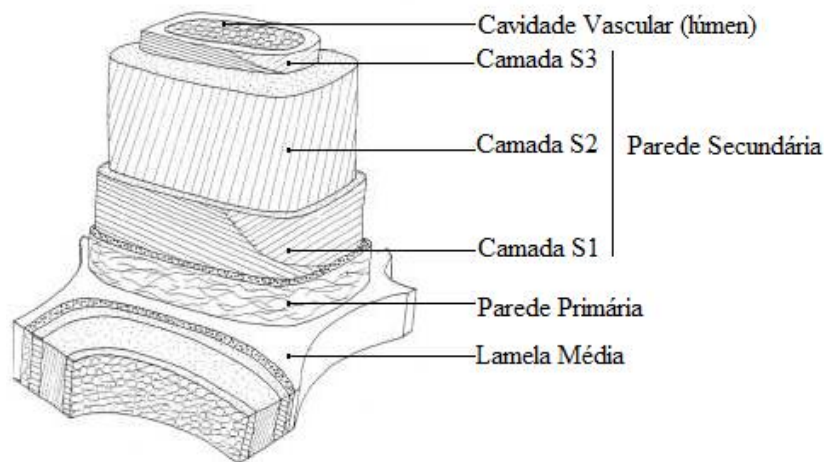


Figura 6- Estrutura da parede celular, [7]

2.7 Composição Química da madeira

Tendo em conta a composição química da madeira é de notar que as diferenças são pouco relevantes entre as diferentes espécies. Os constituintes principais são Carbono (C) (50%), Oxigénio (O) (43%) Hidrogénio (H) (6%), e o Azoto (N) (1%), este último já em quantidades muito reduzidas. Podendo ainda encontrar-se ainda Cálcio, Potássio, Magnésio, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira, mas estes já em muito pequenas quantidades, [8].

2.7.1 Substâncias macromoleculares

Do ponto de vista da análise dos componentes da madeira, é necessário fazer uma distinção entre os principais componentes macromoleculares constituintes da parede celular:

- Celulose;
- Polioses (hemiceluloses);
- Lignina.

Existe proporções e composições químicas que diferem nas resinosas e folhosas, no caso da celulose é um componente presente nos diversos tipos de madeira. Já a lignina e polioses diferem nas resinosas e folhosas.

- **Celulose** – constitui cerca de 40-45% da composição química da madeira. Sendo um polímero tridimensional, na forma de largas cadeias unidas por pontes de hidrogénio e ligações químicas, possui uma boa resistência á tração e elevada resistência mecânica. Possui valências abertas e atrai quimicamente a água, sendo assim designado como um material higroscópico, [8].

- **Hemicelulose** – constitui cerca de 15 a 35% da composição química da madeira. É um polímero tridimensional amorfo, ramificado por diferentes açúcares, dimensão variável. Sendo parte de uma matriz que aglutina a celulose, assegura a função de união entre as fibras, sem influenciar as suas características mecânicas. As cadeias moleculares são muito mais curtas que a de celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos. As folhosas, de maneira geral, contém maior teor de polioses que as resinosas, e na composição são diferenciadas, [8].

- **Lenhina** – constitui, cerca de 17 a 25% da composição química da madeira. É um polímero tridimensional amorfo composto por unidades de fenilpropano, constituindo uma matriz que,

tal como a hemicelulose, aglutina e a celulose contribui para a integridade estrutural das fibras. O maior teor de lenhina, está presente nas resinosas e existem algumas diferenças estruturais entre a lenhina encontrada nas duas espécies, [8].

Do ponto de vista morfológico, a lenhina é uma substância que durante o desenvolvimento das células é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim dá resistência às paredes celulares.

Além dos componentes principais, atrás mencionados, a madeira apresenta na sua constituição outras substâncias que podem atingir ou mesmo até ultrapassar os 10 % da sua composição química. Essas substâncias depositam-se essencialmente no cerne e são designadas por extrativos, ou seja, material que pode ser extraído pela água ou por dissolventes, tais como o álcool.

Contudo, mesmo tendo quantidades reduzidas, podem influenciar algumas propriedades da madeira, tais como a dureza, a cor e até o próprio cheiro.

2.8 Construção sustentável

A madeira, proveniente de diversos tipos de árvores, é considerada um material com muitas vantagens. Ambientalmente considera-se que, a madeira é um recurso natural renovável e sob ponto de vista energético possui um baixo consumo de energia. No caso de construções de madeira, o consumo energético por metro quadrado é duas vezes menor comparando com o da alvenaria. Outra vantagem ambiental seria a economia em recursos hídricos (considerada insignificante), pois a água não é utilizada em nenhuma fase de seu processo industrial, [1].

Esta utilização tem vindo, também, a ser sustentada pelo crescente aumento de consciência para a preservação do nosso planeta. O impacto ambiental dos materiais de construção tem-se tornado cada vez mais um critério de escolha, recebendo níveis de importância quase tão elevados como a qualidade e o preço. Sendo a madeira o único material de construção oriundo de uma fonte de regeneração contínua, é importante sublinhar que esta fonte renovável não se renova à mesma velocidade com que é requisitada, e que por isso, apesar das suas grandes vantagens ao nível da construção, a sua utilização desmedida leva ao desaparecimento de árvores produtoras de oxigénio e captadoras de dióxido de carbono, [9].

2.9 Reabilitação

Em Portugal, como noutros países da Europa, assiste-se a um retorno da utilização de madeira, tanto em construções novas, como na reabilitação. Sendo grande a aposta para o futuro da reconstrução, devido ao saturamento de edificações já existentes, valorizando, sempre, o nosso património cultural como fator de identidade e competitividade urbana. Não é só pelo estado de degradação e/ou a falta de salubridade nos edifícios que estes devem sofrer uma intervenção, mas, sim, porque as suas características já não se adequam às exigências do nosso mercado de hoje, nomeadamente ao conforto térmico, acústico e instalações específicas, o que se traduz num elevado custo energético e desconforto. Sendo também neste momento mais económico, algumas remodelações que construir de raiz.

Devido à saturação das edificações optar-se-á futuramente pela reconstrução, esta aposta fará certamente crescer a procura pela madeira, pela sua fácil modelação e aplicação em espaços já existentes. Muitas destas construções antigas tem as paredes exteriores em alvenaria de pedra ou provavelmente estuque, e todo o resto, como a cobertura e divisões interiores, são madeira. O objetivo de qualquer intervenção é respeitar o mais possível a conceção e as técnicas já existentes na construção.

2.10 Vantagem da aplicação da madeira

A madeira é um material que oferece propriedades térmicas, acústicas, além de algumas vantagens em relação à resistência mecânica.

Este material oferece-nos um melhor comportamento em termos de conforto térmico dadas as suas características isolantes, comparativamente com o aço ou o betão. Contudo, na resistência ao fogo, a madeira torna-se um material muito inflamável, porém no decorrer de um incêndio garante elevada resistência mecânica e segurança estrutural. Devido a isso são executadas seções transversais de peças estruturais de madeira com maior espessura. Em relação à resistência mecânica, como exemplo, nos lamelados colados destaca-se a sua alta resistência mecânica, que pode ser comparada à resistência do betão.

A estrutura final em madeira apresenta características tais com uma grande elegância, simplicidade e versatilidade, tornando-a atrativa.

2.10.1 Vantagens de uma casa em madeira

As casas de madeira são atualmente a grande aposta de construção e estão espalhadas por todo o mundo (Figura (7)). Este material pode voltar a afirmar-se na construção, com todas as vantagens que possui como a sua boa ductilidade e baixo peso, adaptando-se a diferentes climas, altitudes, solos incoerente, mesmo quando são impróprios para a construção em betão, devido a sua leveza, como já foi referido.



Figura 7- Construção em madeira, [10].

Uma casa de madeira pode ser construída em poucas semanas, em primeiro lugar porque os elementos construtivos são elaborados em fábrica chegando posteriormente ao local da construção e procedendo-se a uma montagem como um “puzzle”. Em segundo lugar como não se tem de passar pelo processo de cura como acontecia no caso do betão, leva a um ganho significativo em termos de tempo, consequentemente reduz-se na mão-de-obra, na hospedagem dos trabalhadores e na alimentação.

Uma das propriedades da madeira é a qualidade isolante, o que leva a uma economia no emprego de climatização numa habitação, sendo reduzido aproximadamente em 30% a energia gasta comparada com uma habitação em alvenaria, [11].

A construção em madeira dá uma grande contribuição no combate ao efeito de estufa. Não esquecendo que, um dos recursos mais escassos do nosso planeta é a água (H₂O) sendo praticamente inutilizado neste tipo de construção, no entanto é necessário que exista um plano de reflorestação para não prejudicar o ecossistema. E no fim de vida de uma construção deste tipo, é de fácil desmontagem, não produzindo poluição e podendo ainda dar-se a reutilização

da madeira. Contudo não deve ser esquecido que toda a quantidade abatida deve ser plantada, devido ao plano de reflorestação por parte dos governos, como já foi referido anteriormente.

Devido à sua inércia térmica, a madeira consegue de uma forma natural fazer um controlo da temperatura no interior de uma habitação. É por este facto que as casas de madeira são saudáveis, não existindo pontes térmicas, conseqüentemente não há a existência de bolores o que é o caso da construção em alvenaria.

Por todas estas razões, pode-se dizer, que a madeira é neste momento, e, cada vez mais, um material com futuro.

2.10.2 Conforto térmico e acústico

A baixa condutividade térmica da madeira permite-lhe um bom desempenho em termos de isolamento, fator a ser tido em conta quando se pensa nos requisitos que uma habitação deve ter.

Nas construções mais convencionais, com paredes de elevada inércia térmica, o calor é absorvido primeiro pelas paredes, para depois ser repartido em toda a construção. Numa construção em madeira, essa absorção é muito mais lenta, mantendo a temperatura. Isto significa que, em épocas de baixas temperaturas, o interior da casa se mantém aquecido e, em época de temperaturas elevadas, o interior mantém uma temperatura agradável.

Por outro lado, o seu isolamento acústico permite que as paredes absorvam os ruídos e criem um ambiente tranquilo. Estas características fazem da madeira o material ideal para a construção de hotéis, pousadas ou mesmo condomínios onde o ruído é uma agravante.

2.10.3 Durabilidade

O tempo de vida útil da madeira sempre foi questionado por parte de arquitetos, engenheiros e projetistas, felizmente com o avançar das tecnologias e da investigação surgiram substâncias químicas capazes de fazer aumentar o tempo de vida útil desta matéria-prima, fazendo, desta forma, aumentar a segurança, a qualidade, diminuir custos com reconstruções bem como aumento da versatilidade.

Algumas das qualidades da madeira tratada são:

- Resistência a ataque de fungos e insetos, como brocas e cupins;
- Resistência à lavagem; não altera a condutibilidade elétrica;

- O tratamento não contribui para a corrosão dos metais;
- Aceitação de qualquer acabamento exterior, além de aumentar a vida útil destes;
- Pode ser colada ou revestida com adesivos e resinas;
- Baixo índice de emissividade radioativa.

2.11 O material lamelado colado

Para que fosse possível aproveitar as vantagens da madeira e eliminar todas as desvantagens foi desenvolvida a técnica dos lamelados colados. Esta técnica consiste na sobreposição de lamelas coladas tornando-se um material de alta resistência e durabilidade. Com a utilização destas lamelas sobrepostas previne-se a fendilhação, uma vez que as forças de tração estão homoganeamente distribuídas, sobressaindo deste modo um material mais resistente. É assim possível obter elementos com características superiores às que se obteriam com uma peça maciça de madeira de igual secção. É também possível, com esta técnica dos lamelados colados, alcançar peças de grandes dimensões e harmonia de formas que, com a madeira maciça seriam impensáveis. Estes fatores podem ser confirmados na cobertura do Pavilhão Atlântico com vãos correntes até 7 metros. Em relação à durabilidade da madeira, serão necessários cuidados no seu corte, secagem e manutenção dos elementos, para que seja tirado o máximo partido das características dos lamelados colados.

2.11.1 Principais características mecânicas:

É admirável a relação entre o peso e a resistência mecânica, a boa homogeneidade e a grande estabilidade dimensional em elementos construtivos de madeira.

Os tipos de agressões a que resiste a madeira são:

- Ação do fogo;
- Ambientes quimicamente agressivos;
- Variações higrótérmicas, tanto de exterior como de interior;
- Solicitações mecânicas ligadas ao transporte, montagem e manutenção;
- Cloro das piscinas;
- Ambientes marítimos.

A Figura 8 representa uma solução construtiva para um pavilhão desportivo aplicado a coberturas de piscinas, atendendo à libertação do cloro. A madeira, atendendo à sua característica de resistência a este tipo de agressão, funciona como um material de utilização em serviço mais durável.



Figura 8- Coberturas em ambientes agressivos.

Capítulo 3

Variação dimensional e resistência à tração da madeira

3.1 Introdução

As deformações dos materiais e dos elementos de construção podem ser devidas a múltiplas causas, no caso da madeira deve ter-se em conta as seguintes situações críticas:

- Aplicação de cargas, resultando deformações elásticas e não elásticas;
- Variações de temperatura, resultando dilatações e contrações;
- Variações do teor de humidade, resultando expansões e retrações;
- Ações químicas resultando variação de volume, geralmente expansão.

No que respeita por exemplo à existência de janelas na construção, deve ser dada especial atenção ao tipo de vidro e caixilharia. A utilização de vidros duplos, preferencialmente, com caixilhariias com corte térmico, podendo reduzir até 50% das perdas térmicas pelas janelas, assim como o ruído do exterior, [12].

Importa frisar que cerca de 15% da energia que se utiliza no aquecimento e arrefecimento de uma casa perde-se através de frinchas presentes em caixilhariias, por exemplo, mal vedadas ou empenadas, se for o caso da madeira mal curada, [12].

As anomalias mais frequentemente assinaladas como estando associadas à caixilharia correspondem, normalmente, a indícios relacionados com a infiltração de água, seja a sua visualização direta, seja o desenvolvimento de fungos ou bolores devido a humedificação da madeira relacionada com a perda de estanqueidade dos caixilhos ou das respetivas juntas aro/vão. Todavia, as deficiências do funcionamento da caixilharia podem corresponder a todos os aspetos já referidos, por exemplo: permeabilidade excessiva ao ar, deficiente resistência mecânica, deficiente isolamento térmico, atenuação acústica insuficiente, etc. Note-se que uma deficiência na aplicação do caixilho pode originar diferentes anomalias constatadas diferenciadamente pelo utilizador da caixilharia. Por exemplo, o deficiente calçamento de um elemento de preenchimento pode ocasionar a interferência da folha móvel com o aro, causando a degradação mecânica do caixilho e pode aumentar pontualmente a folga da junta móvel, incrementando a permeabilidade ao ar e originando a perda de estanqueidade à água, [12]. As suas desvantagens são: o elevado custo para a sua manutenção com tintas ou vernizes em intervalos de tempo, sendo que, se esta proteção não for tida em conta a madeira fica em contato direto com a humidade podendo chegar a apodrecer devido a presença de insetos e a criação de fungos.

Cada uma das causas de variação dimensional apresentadas é de grande importância, mas apenas as deformações devidas à temperatura e à humidade serão tratadas com maior profundidade no presente trabalho.

3.2 Classificação da madeira

Apesar de a madeira ser apontada como um material estrutural com elevada resistência, existe a necessidade de se conhecer com certeza as suas propriedades. Este procedimento é designado por classificação e pode ser executado visualmente ou mecanicamente, resultando numa determinada classe de qualidade que está interligada a uma classe de resistência, à qual correspondem propriedades físicas e mecânicas, [13]. Todo este processo está devidamente normalizado, aplicando-se apenas a madeira nova, sendo a avaliação da capacidade resistente de peças *in situ* bastante complexa e, em alguns casos, ultrapassada com recurso a técnicas não destrutivas.

3.2.1 Classificação de Qualidade da madeira

A madeira é proveniente de um organismo vivo, a árvore, é um material heterogéneo e anisotrópico. A árvore pode ser subdividida pela sua raiz, caule e copa. A madeira aplicada na construção é retirada da zona do tronco, podendo a extração ser feita em diferentes direções.

As características do lenho (cerne mais borne) são condicionadas pela informação genética, pelo clima nas fases de diferenciação celular e de desenvolvimento da árvore e por fatores ligados às características da própria árvore, como seja a maior ou menor proximidade da copa. A conjugação de todos estes fatores, induz uma elevada variabilidade na madeira no que diz respeito à sua organização interna e às suas propriedades físicas e mecânicas.

Para além de todas as variabilidades apontadas anteriormente é de extrema importância analisar a presença de defeitos na madeira, a fim de evitar alterações das propriedades mecânicas.

Algumas características que reduzem a resistência da madeira:

- O número e a localização dos nós;
- O desvio do fio de madeira em relação ao eixo da peça;
- O descaio (“cantos truncados nas peças”);

- Os empenos;
- As fendas.

Existem dois tipos de sistemas de classificação de madeira para estruturas, a classificação visual e a classificação mecânica. Ambos os sistemas têm por objetivo de efetuar uma separação em classes de qualidade, [8].

A **classificação visual** requer a apreciação dos defeitos da madeira, das imperfeições geométricas de secção e das alterações que sejam visíveis a olho nu. A medição dos defeitos deverá ser de acordo com a norma EN 1310:1997, sendo os resultados obtidos confrontados com as normas de classificação visual correspondentes à espécie da madeira em análise.

A **classificação mecânica** é um processo no qual a madeira é classificada por ensaios mecânicos da peça até à rotura, onde são determinados vários valores, nomeadamente o valor da resistência à flexão, não sendo necessário recorrer à inspeção visual. Em ambos os casos é atribuída uma determinada classe à madeira em causa, à qual podem ser ligados valores característicos de resistência, rigidez e massa volúmica, [14].

As regras gerais de classificação de madeiras, visual ou mecânica, baseiam-se em quatro normas da série EN 14081, designadamente:

- EN 14081-1:2005 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements;
- EN 14081-2:2010 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing;
- EN 14081-3:2005 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control;
- EN 14081-4:2009 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular; cross section – Part 4: Machine grading – Grading machine settings for machine controlled systems.

3.3 Propriedades mecânicas

A análise do comportamento mecânico da madeira requer o conhecimento da sua estrutura anatómica, dada a sua natureza orgânica, higroscópica, anisotrópica e heterogénea que define a madeira.

A concentração e arranjo dos diferentes constituintes do tecido celular são os elementos que definem as características mecânicas da madeira, com contributos diferentes para a sua resistência. Desta forma, torna-se indispensável o seu conhecimento para uma correta avaliação da sua capacidade resistente e dimensionamento estrutural.

A estrutura anisotrópica da madeira caracteriza-se por um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente e implantadas numa matriz amorfa de hemicelulose e lenhina, sendo que cada um destes elementos contribui de forma própria para a resistência mecânica.

Deste modo, percebe-se que não é correto falar de resistência mecânica global de um elemento estrutural de madeira, mas sim, do seu comportamento perante determinado tipo de solicitação, nomeadamente, da sua grandeza, duração e direção. Esta última característica é mesmo um fator preponderante, pois verificam-se grandes diferenças de valores de resistência para solicitações no sentido paralelo e perpendicular às fibras.

De facto, as árvores desenvolvem o tronco de forma a resistir às solicitações a que estão sujeitas durante o seu crescimento, como a ação do vento (esforço de flexão) e as ações gravíticas (esforço de compressão), orientando a sua estrutura fibro-anatómica nesse sentido (Figura 9), [4].

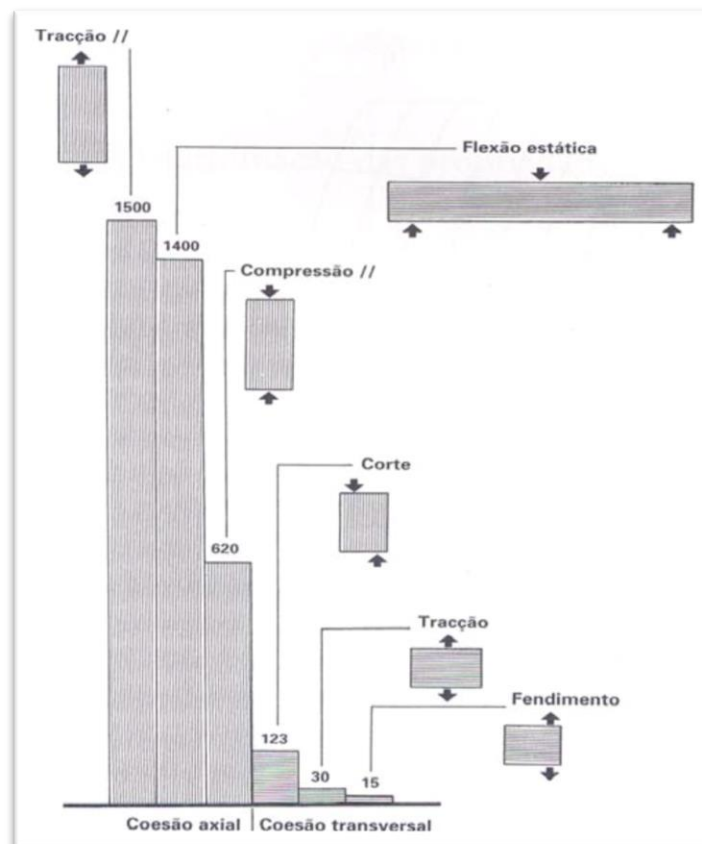


Figura 9- Diagrama de valores de resistência global da madeira em função do esforço instalado [7].

Os valores característicos da Figura (9) são expressos em Kg.cm^{-2} , exceto para o fendimento, em Kg.cm^{-1} .

A caracterização mecânica da madeira implica o seu estudo em duas direções principais, traduzidas em termos de **coesão axial** (que se reporta a tensões dispostas no sentido paralelo às fibras, como a compressão paralela, tração paralela, flexão estática e dinâmica) e **coesão transversal** (que se reporta a tensões dispostas no sentido perpendicular às fibras, como a compressão perpendicular, tração perpendicular, torção, e corte).

Seguidamente apresenta-se uma análise resumida das principais características mecânicas da madeira, ou seja:

- Resistência à tração paralela às fibras ou axial;
- Resistência à compressão paralela às fibras ou axial;
- Resistência à flexão estática;
- Resistência à tração perpendicular às fibras;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras;
- Resistência ao corte ou escorregamento, [4].

3.4 Resistência mecânica à tração

A tensão corresponde à força interna aplicada sobre a área da seção, conforme a equação seguinte, [15]:

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

em que:

F - Força (Newton);

A - Área (m^2).

σ – Tensão (N/m^2)

Com base na equação descrita e no campo de deformações associado ao carregamento de tração, é possível efetuar o registo gráfico através da curva conhecida tensão-deformação, podendo apresentar vários desenvolvimentos, dependendo do material, como pode ser observado na Figura (10).

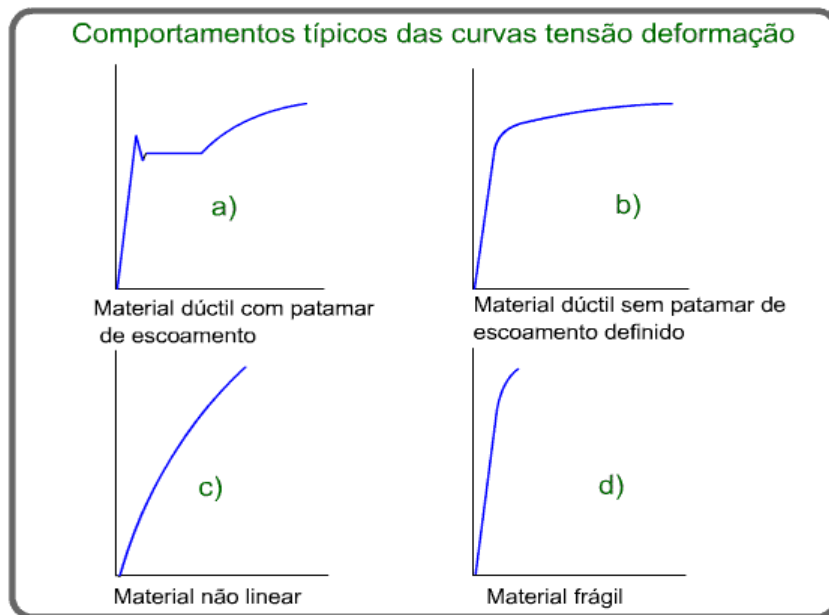


Figura 10- Curva tensão-deformação convencional.

3.4.1 Limite de proporcionalidade

Na curva apresentada na Figura (11), o ponto A representa o limite elástico no estado de tensão-deformação normal. Até este ponto, assume-se que após a remoção da carga, a deformação é totalmente recuperada, ou seja, a deformação retorna para o valor zero.

A Lei de Hooke só é válida até um determinado valor de tensão, representado no gráfico pelo ponto A', a partir da qual a deformação deixa de ser proporcional à carga aplicada (Figura (11)), [15].

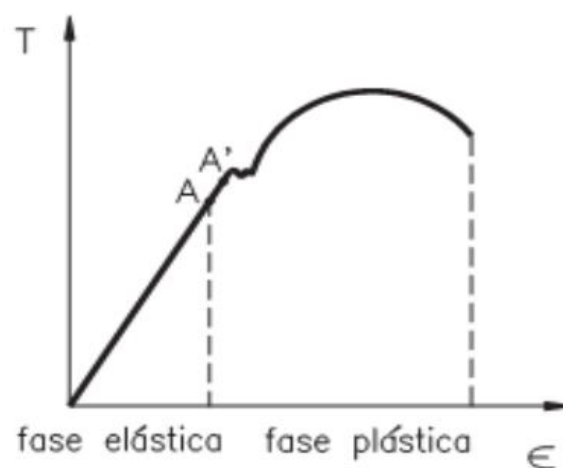


Figura 11- Limite de proporcionalidade A`

Na fase elástica os metais obedecem à Lei de Hooke, em que as deformações são diretamente proporcionais às tensões aplicadas (equação 2).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2)$$

em que:

E - Módulo de elasticidade (MPa);

σ - Tensão aplicada (N/mm²);

ε - Deformação elástica.

A constante de proporcionalidade “ E ”, módulo de elasticidade, ou módulo de Young, fornece a indicação da rigidez do material. Quanto maior for o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão. A deformação normal convencional ou nominal é dada através da equação seguinte:

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (3)$$

em que:

Δl - Variação do comprimento, (mm);

L_0 - Comprimento de referência (mm).

3.4.2 Região de comportamento plástico

Acima de um certo valor de tensão, alguns materiais começam a deformar-se plasticamente, ou seja, ocorrem deformações permanentes. O ponto para o qual estas deformações permanentes começam a tornar-se significativas é chamado de limite de escoamento. Durante a deformação plástica, a tensão necessária para continuar a deformar a madeira aumenta até um ponto máximo, chamado de limite de resistência à tração, no qual a tensão é máxima na curva tensão-deformação. Isto corresponde à maior tensão que o material pode resistir, se esta tensão for aplicada e mantida, o resultado será a fratura. Toda a deformação até este ponto é uniforme na seção. No entanto, após este ponto, começa-se a formar uma estrição, notável em

materiais dúcteis, na qual toda a deformação subsequente está confinada e, é nesta região que ocorrerá rutura, [15].

3.4.3 Transição elasto-plástica

Esta transição da zona elástica para a zona plástica é caracterizada por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhada por uma pequena variação na tensão. Isto acontece geralmente no início da fase plástica. Durante esta transição a carga oscila entre valores muito próximos (Figura (12)), [15].

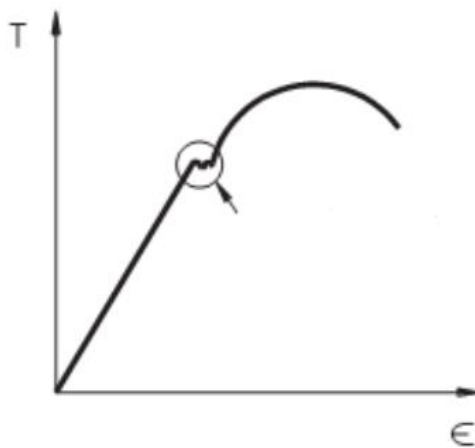


Figura 12- Transição elasto-plástica, [15]

3.4.4 Limite de Resistência à tração

É a tensão correspondente ao ponto de carga máxima atingida durante o ensaio. Após a transição elasto-plástica ocorre o encruamento que é explicado ao nível microscópico pela interação de deslocações que se movem simultaneamente em planos de escorregamento diferentes e, ao interagirem-se, criam barreiras que limitam a sua livre movimentação. Outras barreiras, como as juntas de grão, inclusões e segundas fases são locais preferenciais de acumulação de deslocações. É nessa fase que a tensão começa a subir até atingir um valor máximo, chamado Limite de Resistência (Figura (13)), [15].

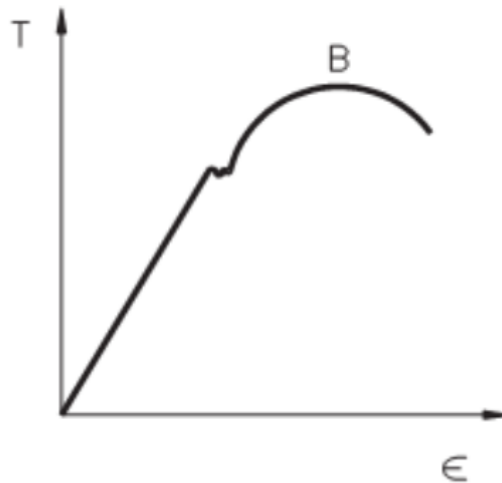


Figura 13- Limite de resistência à tração, [15].

3.4.5 Limite de Ruptura

Continuando a tração, chega-se à ruptura do material, ou Limite de Ruptura (Figura (14)), [15].

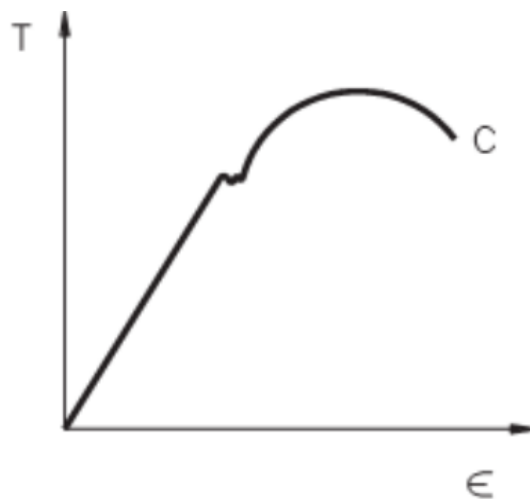


Figura 14- Limite de ruptura, [15].

De notar que a tensão no limite de ruptura é menor do que no limite de resistência, devido à diminuição de área do corpo de prova depois de ser atingida a carga máxima.

3.4.6 Modo de Ruptura

De uma forma genérica pode afirmar-se que a ruptura em elementos de madeira sujeitos à tração uniaxial, apresenta diferentes padrões, Figura 15.

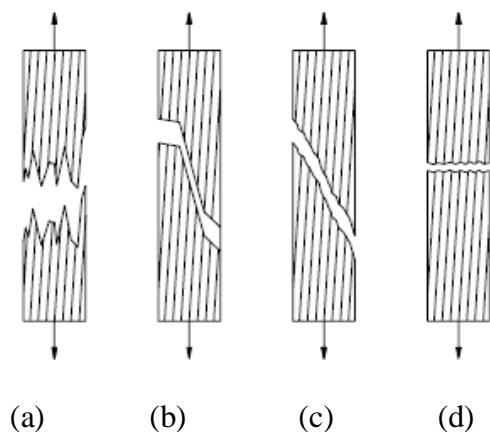


Figura 15- Tipos de rotura observados em ensaios destrutivos: (a) lascado; (b) combinação de tração e corte; (c) corte; (d) tração pura.

Uma boa maneira de se observar a diferença no comportamento entre os materiais é submetendo-os a um ensaio de tração. A madeira é considerada um material do tipo frágil. Neste tipo de materiais o alongamento tipicamente registado é menor que 5%.

Contudo a classificação dúctil ou frágil é muito relativa porque, de facto, a maior parte das roturas apresentam características intermédias. Além disso, as temperaturas baixas, as velocidades de ensaio elevadas ou a presença de nós como é o caso da madeira influencia os resultados (Figura (16)), [15].

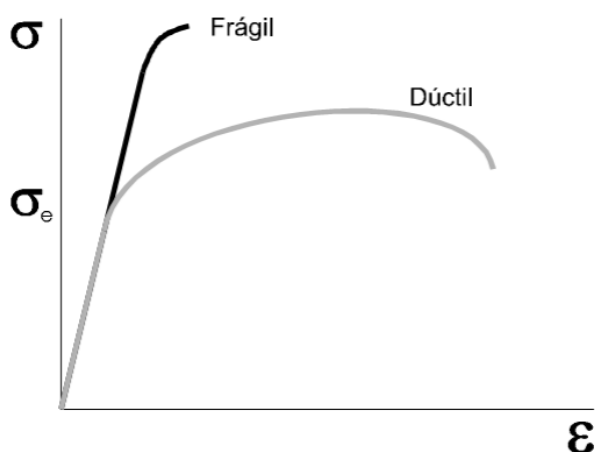


Figura 16- Curva tensão-deformação de diferentes materiais, [15].

3.5 Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas de maior relevância na análise da madeira como material estrutural de construção são as seguintes:

- Conteúdo de humidade e higroscopicidade;
- Densidade (massa específica aparente);

- Retratilidade;
- Reação e resistência ao fogo.

3.5.1 Teor em água e higroscopicidade

A madeira realiza continuamente diversas trocas de água com o meio ambiente até atingir o ponto de equilíbrio, por esse motivo é considerada um material higroscópico. A variação do teor de água na madeira influencia o comportamento e as suas propriedades, portanto é importante um conhecimento pormenorizado nesta matéria, [5].

A água existe na madeira sob três formas diferentes:

- Água de constituição;
- Água de impregnação;
- Água livre.

Antes do seu abate, as árvores transportam os alimentos pelos vasos e traqueídeos através da água livre, que preenche os vazios intercelulares. Após o abate esta água é libertada, diminuindo drasticamente o teor em água da madeira, até atingir o seu PSF (Ponto de saturação da fibra), cerca de 20 a 30% para a maioria das espécies.

Depois da libertação da água livre, a madeira pode variar em função da higrometria do ambiente envolvente de acordo com o vapor de água e da temperatura do ar com que está em contato. Foi estabelecido por consenso o valor de referência para o teor de água de 12%, como medida internacional para a realização de ensaios de determinação das propriedades da madeira. De referir que, apenas a partir de valores menores a 20% se considera que a madeira está protegida de possíveis ataques por parte de fungos e bactérias, por ser o valor mínimo no qual normalmente ocorre a propagação e o ataque.

As madeiras podem ser classificadas de acordo com o seu teor de água da seguinte forma, [5], [6] e [13]:

- Madeira saturada: com humidade relativa superior a 70%;
- Madeira verde: com humidade relativa a 30%, acima do PSF;
- Madeira semi-seca: com humidade relativa inferior ao PSF, mas superior a 23%;
- Madeira comercialmente seca: com teor de humidade for inferior a 20%;
- Madeira seca: com um teor de humidade com valor entre 18 e 23%;
- Madeira seca: ao ar com um teor de humidade compreendido entre 13 e 18%

- Madeira dessecada: valor que ronda entre 0 e 13% (normalmente é conseguida por secagem artificial);
- Madeira completamente seca: com 0% de humidade, [4].

O teor em água da madeira, ou teor de humidade e pode ser obtido através da equação 4.

$$H = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) * 100(\%) \quad (4)$$

em que:

m_1 – massa inicial do provete, expressa em (g);

m_2 – massa do provete após secagem, expressa em (g).

O resultado final é razão entre diferença da massa da amostra de madeira húmida e a massa dessa mesma amostra depois de seca em estufa e a massa da amostra seca, expresso geralmente em percentagem, mas algumas referências também o indicam em quilogramas de água por quilogramas de material seco (kg), [14].

3.5.2 Massa volúmica

É da massa volúmica que dependem a maior parte das outras propriedades físicas, servindo como referência para a classificação das peças de madeira, segundo a NP 616. A massa volúmica é dada pela seguinte equação:

$$\rho = \left(\frac{M}{V} \right) \quad (5)$$

em que:

M - massa do provete, expressa em (kg);

V - Volume, expresso em (m³).

3.5.3 Retractilidade

As variações no grau de humidade da madeira com as condições atmosféricas resultam em variações dimensionais tais como a retração e expansão da madeira.

A retração da madeira ocorre nas três direções principais (Figura (3)): radial, axial e tangencial. Estes valores são designados de retração linear na direção respetiva.

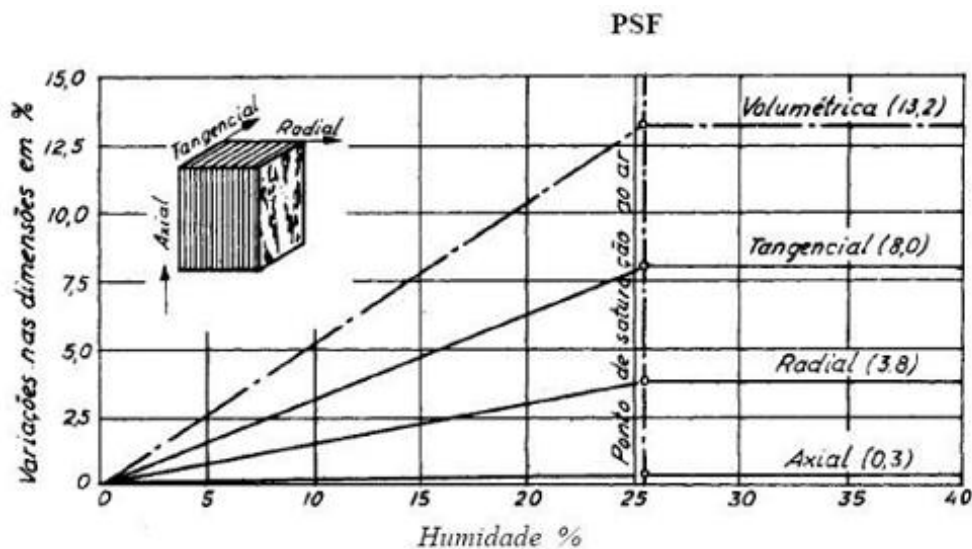


Figura 17- Curva de retração, [5].

De forma geral, observando a Figura 17 conclui-se que retração axial é muito baixa, já a retração radial apresenta cerca de metade da tangencial. Sendo que a retração volumétrica é aproximadamente igual a soma das três retrações lineares (axial, radial e tangencial).

É de salientar, que estes valores são apenas indicativos, visto que cada espécie tem características diferentes, mas sempre dentro da mesma ordem de grandeza.

Quando uma peça de madeira, que se encontra no estado de PSF, passa ao estado completamente seco, diminui de volume. Este fenómeno designado de retração volumétrica total (expresso em percentagem) é obtido pela divisão entre a diminuição de volume referido pelo volume da peça de madeira no estado seco, [7].

Tal como já foi referido, a retração linear tangencial é pelo menos duas vezes a radial. Consequentemente, os elementos de madeira na direção tangencial serão mais ou menos afetados consoante a zona do tronco que são retiradas as secções transversais (Figura (18)), [7].

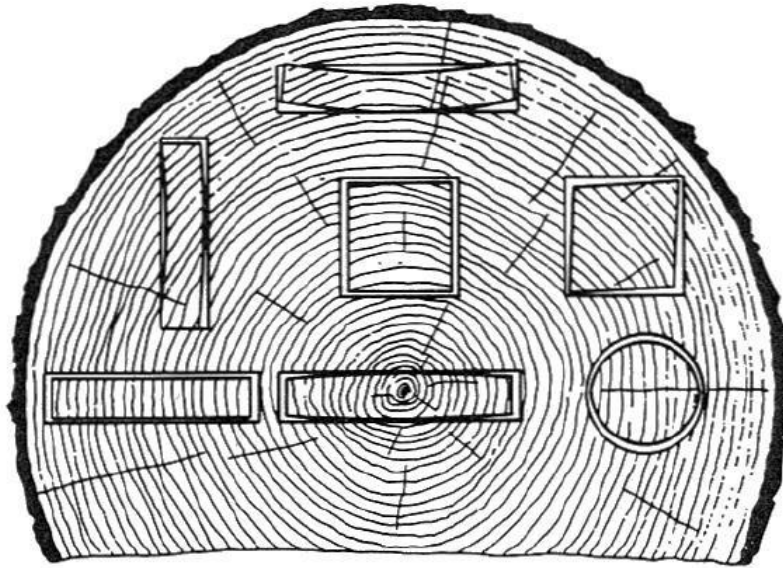


Figura 18- Alteração da forma da secção transversal por retração [5].

Na mesma linha surgem os empenos e deformações das peças de madeira serrada e surgem ao longo do elemento em função desses mesmos efeitos repercutidos longitudinalmente. Estes comportamentos podem ser classificados como mostra a Figura 19, [7].

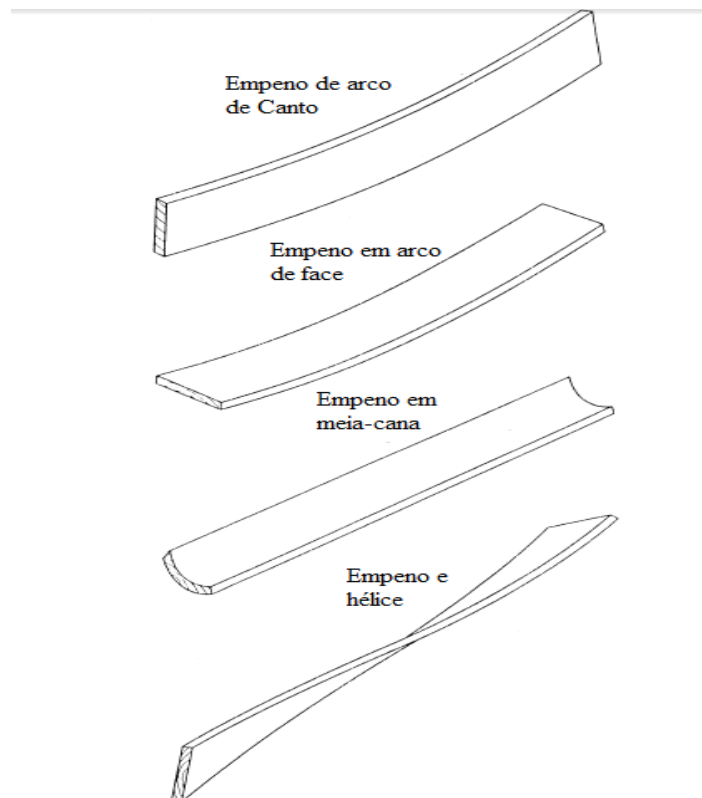


Figura 19- Empenos das peças de madeira serrada, [7].

3.5.4 Reação e resistência ao fogo

A madeira é um material combustível, diferente do que acontece com o aço e o betão. Tal como os outros combustíveis sólidos, a madeira decompõe-se em gases que alimentam as chamas. Estas por sua vez aquecem a madeira e promovem a libertação de mais gases inflamáveis.

A madeira, no que respeita à reação ao fogo, é normalmente classificada segundo as especificações da (EN 133501-1, 2001). Mesmo em incêndios a altas temperaturas (1000°C), a madeira possui boa resistência mecânica, devido ao isolamento que as camadas externas carbonizadas lhe conferem, embora este facto não seja do conhecimento geral no setor da construção. O aço começa a perder a sua resistência e a deformar-se a partir de 200°-300°. Em construções importantes feitas em madeira, onde existe uma grande probabilidade de incêndio, as peças devem possuir uma espessura superior a 2,5 cm, a menos que as peças inferiores a essas dimensões recebam o tratamento antifogo, [14].

3.6 Temperatura

Muitos materiais dilatam quando aquecidos e contraem quando arrefecidos. Para os materiais sólidos, o aumento de comprimento por grau de temperatura é definido pelo coeficiente de dilatação térmica linear α , [6].

A temperatura tem uma influência bastante mais discreta sobre os parâmetros mecânicos da madeira, não sendo, regra geral, um fator condicionante, uma vez que só para valores extremos de temperatura é que se verifica a sua interferência nos valores de resistência.

- Para temperaturas inferiores a 0°C, os valores característicos de resistência à flexão, compressão e impacto são ligeiramente superiores aos verificados para temperaturas normais, relativamente às que vulgarmente estão em contato com as estruturas de madeira em edifícios;
- Para temperaturas muito elevadas existe uma perda de resistência dos elementos de madeira. No entanto, verificou-se que a resistência não é afetada até aos 37°C, atuando de forma contínua, podendo, em função da espécie de madeira, alcançar ocasionalmente os 50°C, [6]

Capítulo 4

Programa experimental

4.1 Introdução

O desenvolvimento do programa experimental do presente estudo incidiu na análise de duas espécies, o castanho Tabela (1) e o carvalho Tabela (2). Estas duas espécies são as mais representativas no Nordeste Transmontano, são folhosas e ambas com elevado potencial para utilizações estruturais.

Os ensaios foram realizados seguindo o critério da sua importância para o conhecimento, caracterização e previsão do comportamento da madeira, quando aplicada exteriormente. Sendo a madeira um material natural com grande variabilidade das suas propriedades, ao que acresce a sua completa anisotropia e estrutura orientada, o programa experimental abrangeu o maior número na análise de diferentes propriedades.

Os ensaios incidiram sobre propriedades físicas e mecânicas segundo normas e procedimentos conhecidos. A amostragem e caracterização das madeiras são feitas em duas fases, a primeira consistiu em avaliar o teor de água de equilíbrio de cada madeira, acompanhando a sua variação através de medições com um paquímetro e por pesagem segundo a [16], [17] e [18] do LNEC. Enquanto na segunda fase, com o objetivo de determinar a resistência mecânica à tração das duas espécies, através da obtenção do módulo de elasticidade, tensão de rotura, deformação e coeficiente Poisson, segundo a [19]. No final serão apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.2 Principais características de madeiras em estudo

As tabelas 1 e 2 representam de forma esquemática as principais características das madeiras em estudo.

Tabela 1-Principais características da madeira de castanho, [9]



Castanho	
Ilustração	 <p>Dureza: Moderadamente dura/média Durabilidade: Durável Cor: Castanho-claro, oxidando para castanho-escuro. Propriedades físicas: Densidade – 600 Kg/m³ - leve Retração – 0,42% - Nervosa</p>
Nomes Científicos	<i>Castanea sativa Miller</i> é uma angiospérmica dicotiledónea, da família das Fagáceas.
Características Gerias e Morfológicas	É uma árvore com grandes dimensões, atingindo entre 20 a 30 metros de altura, algumas vezes até alturas superiores e são de folha caduca. Possui um tronco espesso e com uma copa semi-esférica e um pouco alongada. O tronco nos primeiros anos é liso, mas posteriormente a casca vai se fendilhando. As suas folhas são de um verde brilhante, com uma forma bicuda e dentadas. Possuindo uma largura de mais de 5 cm de largura e 20 cm de comprimento. Nos meses de Maio a Julho nasce do pé das folhas um cacho de flores amarelas, chamado de amentilhos, dando um aspeto luminoso a árvore, onde em algumas localidades são conhecidas como as cadeias. O pólen é transportado de umas árvores para as outras, através do vento, abelhas e outros insetos, dado origem a castanha que se desenvolve dentro de um invólucro espinhoso (ouriço). Onde cada ouriço pode ter até três castanhas com uma forma meia achatada. É normalmente durante os meses de Outubro que se dá a colheita da castanha.
Localização	Esta árvore pode ser encontrada a Norte da Europa, como Inglaterra, País de Gales, Alemanha e norte de França, a Sul pode ser encontrada em Portugal, Espanha e Grécia.
Adaptação	É uma árvore que facilmente se desenvolve tanto em cotas reduzidas como em altitude das montanhas, podendo variar as suas atitudes entre os 400 a 1000 metros. Crescem em solos ligeiramente ácidos e se adaptando a climas variados.
Utilização da Madeira	Esta árvore além de fornecer boa madeira, pode-se extrair os seus frutos que a nível económico se tornam um sustento para a população. Este fruto pode ser transformado para uso culinário. A madeira pode ser aplicada em mobiliário, soalhos, caixilharias e revestimentos.
Outros Tipos de Castanho	Dos Estados Unidos da América é originário a <i>Castanea dentata</i> Borkh que se assemelha ao <i>C. Sativa</i> , mas com um porte inferior. Do Japão e Coreia é originário a <i>Castanea Crenata</i> . Tem folhas iguais as dentadas, mas mais pequenas e o seu tamanho também é reduzido. Em algumas Regiões montanhosas da China é originário a <i>Castanea molíssima</i> .

Tabela 2-Principais características da madeira de carvalho, [9].

Carvalho	
Ilustração	 <p>Dureza: Moderadamente dura/ muito alta Durabilidade: Durável Cor: Castanho-claro, por vezes com tons rosa. Propriedades físicas: Densidade – 890 Kg/m³ – Pesada. Retração – 0,5 Muito nervosa</p>
Nomes Científicos	<p><i>Quercus faginea</i> é uma angiospérmica dicotiledónea, da família das Fagáceas. Quercus era a designação latina usada pelos romanos para carvalhos. O termo “carvalho” tem origem luso-céltica, a partir de carbálion.</p>
Características Gerias e Morfológicas	<p>É uma árvore com grandes dimensões, atingindo cerca de 25 a 30 metros de altura, sendo a sua folha um meio entre a folha caduca a marcescente. A sua copa é de forma arredondada e um pouco alongada. O tronco tem uma cor acinzentada-escuro. Possui uma grande capacidade regenerativa formando grandes manchas de árvores. As folhas inicialmente possuem um tom acinzentado, onde posteriormente ficam com uma cor verde acinzentadas. O fruto que nela regenera é uma bolota com uma forma arredondada e dá-se agrupado ou de forma isolada.</p>
Localização	<p>É uma árvore espontânea na Península Ibérica, na parte Ocidental de França e em Marrocos e Norte de Africa. Em Portugal desenvolve em regiões distintas, como Trás-os-Montes Beira Alta, Beira Baixa, Alto Alentejo, Alto Minho, Beira Litoral, Estremadura e Ribatejo, mas é nas regiões do interior que se encontra a maior mancha florestal de Carvalho-Negral, sobre tudo nos Distritos de Bragança, Vila real, Guarda, Castelo Branco e Portalegre.</p>
Adaptação	<p>É uma árvore que facilmente se desenvolve nas encostas das montanhas, podendo variar as suas atitudes entre os 400 a 1500 metros, onde estas suportam bem as intemperes do inverno, desde o frio ate a neve. Crescem em solos de variados tipos desde os solos graníticos, xistosos ate aos argilosos.</p>
Utilização da Madeira	<p>Este tipo de madeira destina-se essencialmente a extração para lenha bem como a obtenção de carvão vegetal, pelo seu grande poder calorífico das propriedades da madeira. Como utilizações de maior valor acrescentado, em construção, carpintaria, marcenaria e tanoaria. Com grande qualidade na parte de decoração e mobiliário, possui também boas características, em caixilharias e pavimentos. Devido a sua grande durabilidade é rentável o seu emprego no exterior como esplanadas e jardins.</p>
Outros Tipos de Castanho	<p>Da Península Ibérica e norte de Africa continental é originário o Carvalho - português (<i>Quercus faginea</i>), também conhecido por cerquinho. Da Eurásia é originário o Carvalho-roble (<i>Quercus robur</i>), também conhecido por carvalho-alvarino</p>

4.3 Estabilidade dimensional da madeira na presença de água

Um dos objetivos desta dissertação foi o de compreender a relação da água em duas espécies diferentes de madeira, o Carvalho e o Castanho. Para se observar o comportamento das espécies foram realizados vários ensaios para o estudo da estabilidade dimensional, visto que um dos principais problemas da madeira está relacionado com o fenómeno de inchamento e retração. A determinação do teor em água e da massa volúmica foi efetuada segundo as normas [16] e [18] do LNEC.

4.4 Obtenção das amostras

Os troncos foram cortados em toros, ficando nos 2 meses seguintes em estaleiro. Posteriormente os toros foram serrados e deixados em parque exterior durante 5 meses, passado esse tempo a madeira foi serrada no sentido longitudinal dos toros em tábuas (Figura 20 (a)). De forma a facilitar a circulação do ar e no sentido da obtenção de uma boa cura da madeira, as pranchas (tábuas) foram colocadas na horizontal separada entre si. Na Figura 20 (b) pode ser observado o resultado do processo. Por fim segue-se a secagem da madeira em estufa (Figura 20 (c)), que é feita essencialmente por 3 etapas durante um período de 1 mês:

- Na primeira semana foi feita uma pré-secagem, através de um aquecimento gradual da temperatura até atingir uma temperatura entre os $45\pm 5^{\circ}\text{C}$ e com condições elevadas de humidade relativa do ar;
- Nas duas semanas seguintes dá-se a secagem propriamente dita, onde ocorre uma elevação lenta da temperatura até $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ e conseqüentemente uma diminuição da humidade dentro da estufa. Ao longo destas duas semanas fizeram-se várias intervenções de humedecimento da madeira;
- Na última semana a madeira fica em estabilização.

Todo este processo foi monitorizado através de sensores, que controlam a humidade relativa do ar e a temperatura dentro da estufa.

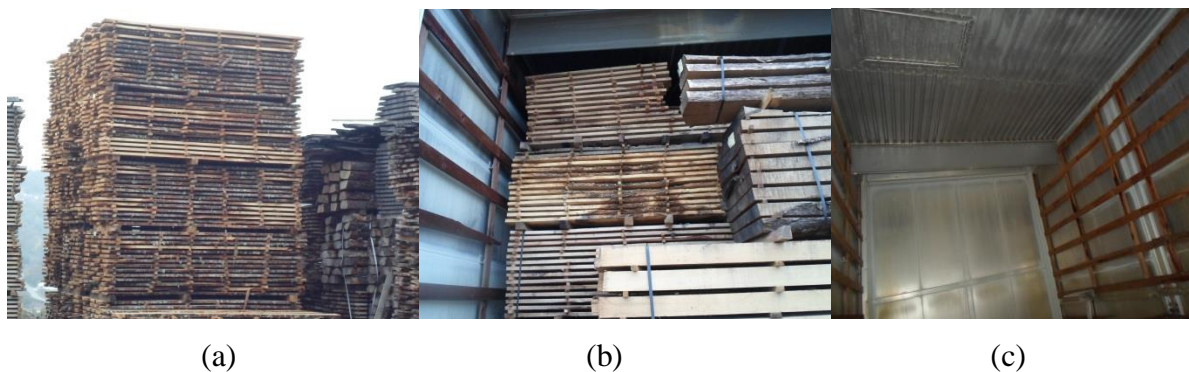


Figura 20- (a) - Madeira serrada em parque exterior; (b) - Tabuas colocadas na horizontal, separadas entre si por um separador na vertical; (c) - Estufa.

Equipamento utilizado:

- Uma balança com menos de 5 mg de erro;
- Um paquímetro eletrónico com uma precisão de 0.02 mm;
- Uma câmara climática, com uma temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa $60\pm 5\%$;
- Uma estufa, com uma temperatura de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Processo dos ciclos:

- Medir e pesar os provetes de cada espécie;
- Mergulhar 15 provetes de cada espécie de madeira em água durante 24 horas;
- Secar em estufa os outros 15 provetes de cada espécie a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas;
- Passadas 24 horas os provetes são retirados da estufa e da água, sendo colocados numa câmara climática onde são pesados e medidos nas suas dimensões,
- Durante as 24 horas seguintes foram feitas medições de 2 em 2 horas nas primeiras 12 horas e de 3 em 3 horas nas restantes 12 horas

4.5 Início dos Ciclos

Com base em todo o processo de tratamento (cura da madeira) seguiu-se a maquinagem dos provetes, para tal foi utilizada uma esquadricadora e uma lixadora calibradora. Os provetes finais foram obtidos a partir de madeira sã e isenta de nós, ficando com forma prismática e com uma geometria de $40\times 40\times 10$ mm como se observa na Figura 21.

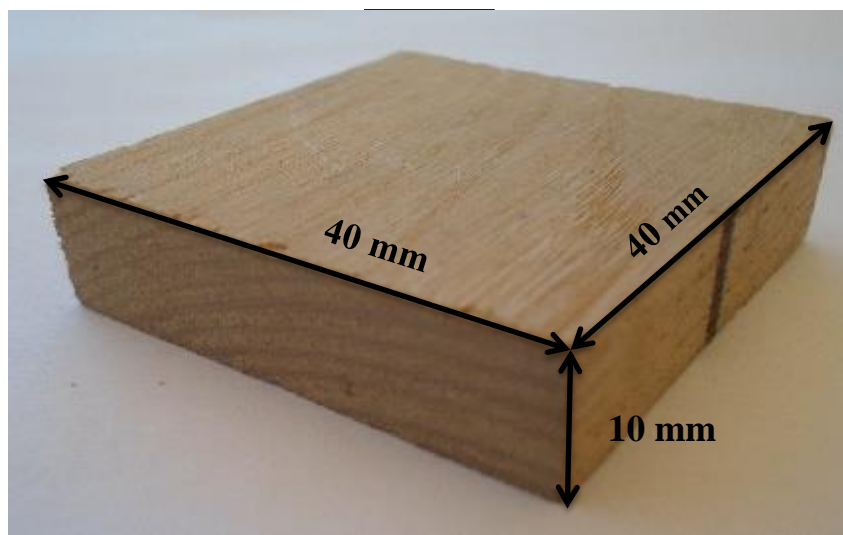


Figura 21- Dimensões do provete.

Preparação dos Provetes

Foram ensaiados um total de 60 provetes (30 de cada espécie de madeira), numerados de 1 a 30, como pode ser analisado na Figura 22.



Figura 22- Numeração dos provetes.

Após a conclusão deste processo, deu-se início à pesagem de cada provete, para a obtenção da sua massa (Figura 23 (a)). Por fim foi realizada a medição geométrica de cada provete, para a obtenção do volume, como ilustrado na Figura 23 (b).



(a)

(b)

Figura 23- (a) - Balança utilizada; (b) - Paquímetro utilizados.

Os provetes foram divididos, metade dos provetes de cada espécie foram saturados (do 1 ao 15), num recipiente com água (Figura 24 (a)), enquanto a outra metade dos provetes (16 ao 30) foram colocados num forno a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 24 (b)). Este processo teve a duração de pelo menos 24 horas, até se atingir uma massa constante, ou seja, até que a diferença entre as massas nas pesagens fosse inferior a 0,5% da massa do provete (como indica a norma [16]).



(a)

(b)

Figura 24- (a) - Provetes saturados em água; (b) - Provetes no forno.

O processo experimental foi dividido em três ciclos, sendo que os dois primeiros são executados como descrito anteriormente (Tabela (3)). No terceiro ciclo inverte-se o

procedimento de ensaio, ou seja os provetes inicialmente saturados são agora colocados na estufa e os provetes inicialmente secos são saturados (Tabela (4)).

Tabela 3 – Designação dos provetes 1º e 2º ciclo

Espécie de madeira	N.º de provetes Total	N.º de provetes Saturação	Designação	N.º de provetes Secagem	Designação
Castanho	30	1-15	CTsat	16-30	CTsec
Carvalho	30	1-15	CVsat	16-30	CVsec

Nota: CTsat – Castanho Saturado; CTsec – Castanho Seco; CVsat – Carvalho saturado; CVsec – Carvalho Seco.

Tabela 4 - Designação dos provetes 3º ciclo

Espécie de madeira	N.º de provetes Total	N.º de provetes Saturação	Designação	N.º de provetes Secagem	Designação
Castanho	30	1-15	CTsec	16-30	CTsat
Carvalho	30	1-15	CRsec	16-30	CRsat

Nota: CTsat – Castanho Saturado; CTsec – Castanho Seco; CVsat – Carvalho saturado; CVsec – Carvalho Seco

Após as 24 horas, os provetes são retirados da água e do forno, sendo depois conduzidos para a câmara climática (Figura 25 (a)), onde é feita uma pesagem e a medição nas várias direções (longitudinal, radial e tangencial) (Figura 25 (b)). De seguida, os provetes foram colocados na vertical e separados entre si (Figura 25 (c)), para permitir a correta absorção da humidade.

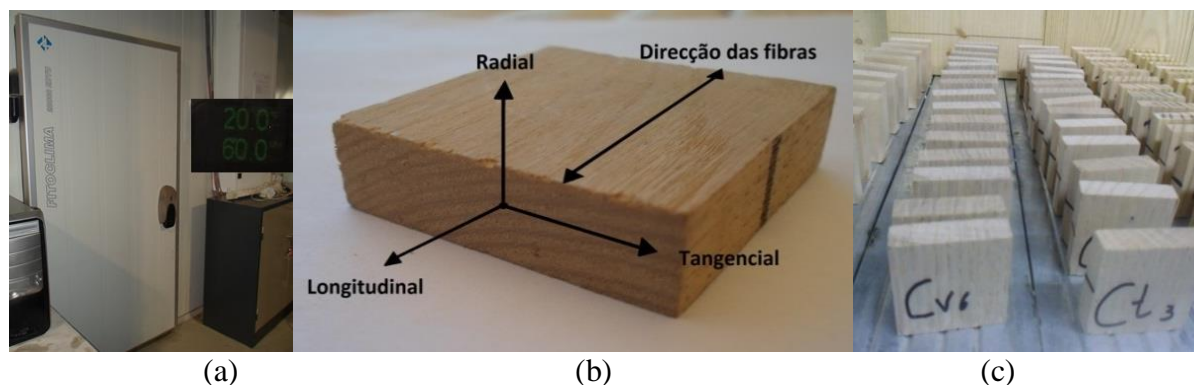


Figura 25- (a) - Câmara climática; (b) - Provede nas várias direções (longitudinal, radial e tangencial); (c) - Provedes na vertical separados entre sim.

Durante as 24 horas seguintes foram feitas medições de 2 em 2 horas nas primeiras 12 horas e de 3 em 3 horas nas restantes 12 horas. A norma [16] refere que a estabilização dimensional dos provetes normalmente não é superior a 24 horas (Tabela (4)).

4.6 Resistência mecânica à tração

Outro objetivo da presente dissertação foi determinar a resistência mecânica à tração do carvalho-negral e do castanho, através da obtenção das suas propriedades mecânicas, nomeadamente através do módulo de elasticidade, tensão de rotura, deformação e coeficiente de Poisson.

A caracterização mecânica foi efetuada numa máquina de ensaios universal, marca Instron e modelo 4485. A realização deste ensaio é efetuada através da colocação de um provete normalizado nas maxilas da máquina, imposta uma solitação à tração através de uma célula de carga, com velocidade de atuação controlável, sendo finalmente o provete ensaiado até à rotura do material. Os resultados são obtidos em forma de registo gráfico através da utilização de um programa específico (Series IX) ligado à máquina universal. Para a obtenção do módulo de elasticidade é colocado um extensómetro mecânico no provete, de forma a efetuar um controlo eficiente da variação do seu comprimento durante a atuação da carga. Adicionalmente, e em alguns dos provetes, são instalados extensómetros elétricos (HBM) para a medição da variação da deformação na direção longitudinal e transversal, de forma a ser medido o coeficiente de Poisson. Neste processo é utilizado um equipamento adicional (P3 da Vishay) que permite a aquisição de dados durante a realização em simultâneo do ensaio de tração.

4.7 Obtenção das amostras

A madeira utilizada foi a mesma dos ensaios de estabilidade dimensional, onde foi utilizado o mesmo processo de seleção, corte, secagem e maquinagem (Figura (26)). No processo de obtenção das amostras, efetuou-se a sua preparação seguindo documentos normativos e posteriormente procedeu-se à sua maquinagem. Esta preparação é necessária atendendo à tipologia do ensaio e às variáveis dimensionais da máquina universal.



Figura 26 - Máquina utilizada para a obtenção dos provetes (DMC 63V).

4.8 Preparação dos Provetes

Para os ensaios de tração foram maquinados um total de 24 provetes da madeira de castanho e de carvalho, 12 de cada espécie (Tabela (5)), sendo que 6 foram cortados no sentido transversal às fibras, com as dimensões de 190x50x9 mm (Figura (28)), os restantes 6 foram cortados no sentido longitudinal às fibras, com as dimensões iguais a 210x40x9 mm (Figura (27)). Os provetes foram dimensionados atendendo a diferentes publicações de autores e documentos normativos específicos, [19] e [20].

Tabela 5 - Designação dos Proves à tração.

Espécie de madeira	N.º de provetes Total	N.º de provetes de Saturação	Designação	N.º de provetes de Secagem	Designação
Castanho	12	1-6	CTt	1-6	CTl
Carvalho	12	1-6	CVt	1-6	CVl

Nota: CTt – Castanho Sentido transversal; CTl – Castanho Sentido longitudinal; CVt – Carvalho sentido transversal; CVl – Carvalho Sentido longitudinal.

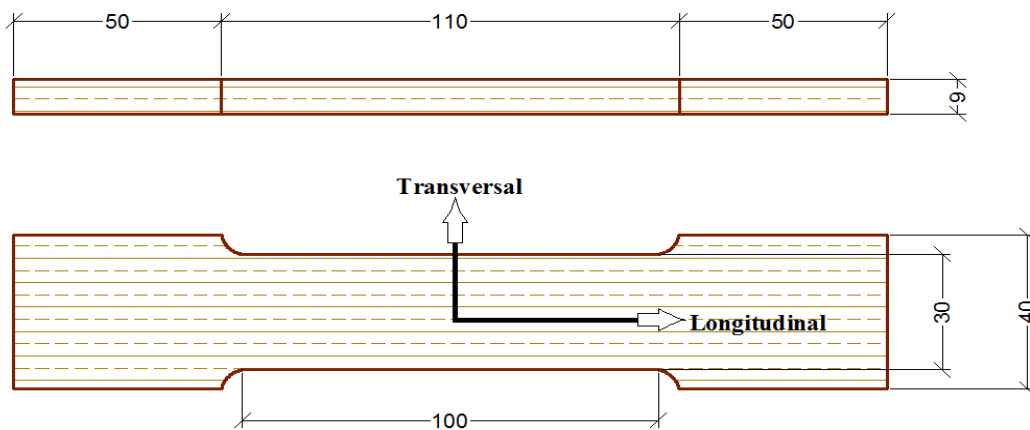


Figura 27- Provete na direção longitudinal as fibras.

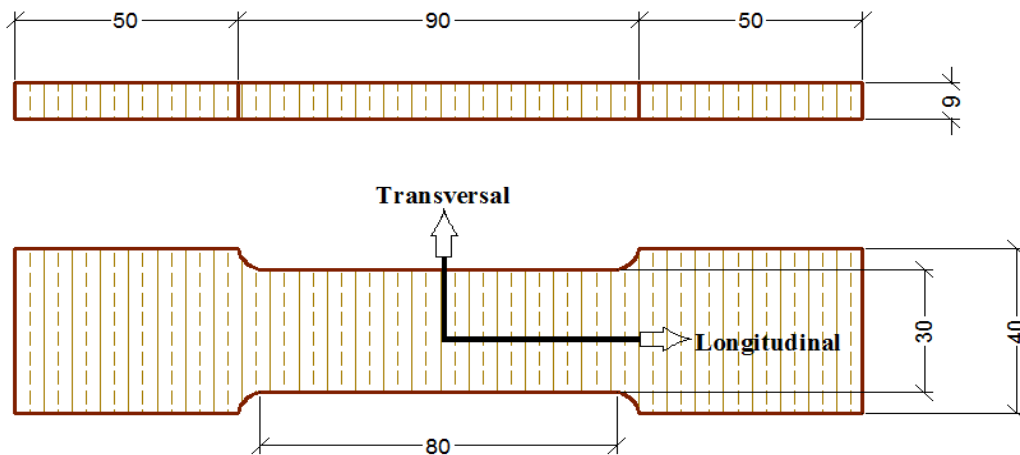
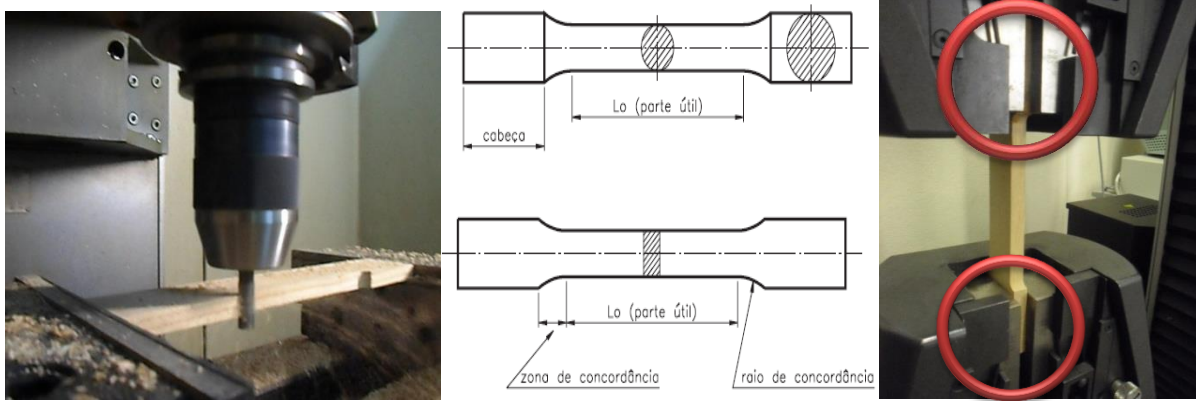


Figura 28- Provete na direção transversal as fibras.

Após a elaboração dos desenhos técnicos respetivos para cada tipologia de provete, procedeu-se à sua maquinagem (Figura 29 (a)). O provete é formado por uma zona útil, a cabeça ou zona de amarração e um raio de concordância (Figura 29 (b)). A cabeça tem como objetivo manter seguro o provete nas amarras da máquina universal, quando a força de tração axial for aplicada (Figura 29 (C)). No meio do provete existe a zona útil, onde é desejável que ocorra a rotura. Por fim, o raio de concordância imposto serve para evitar que a rutura ocorra fora da zona útil.



(a)

(b)

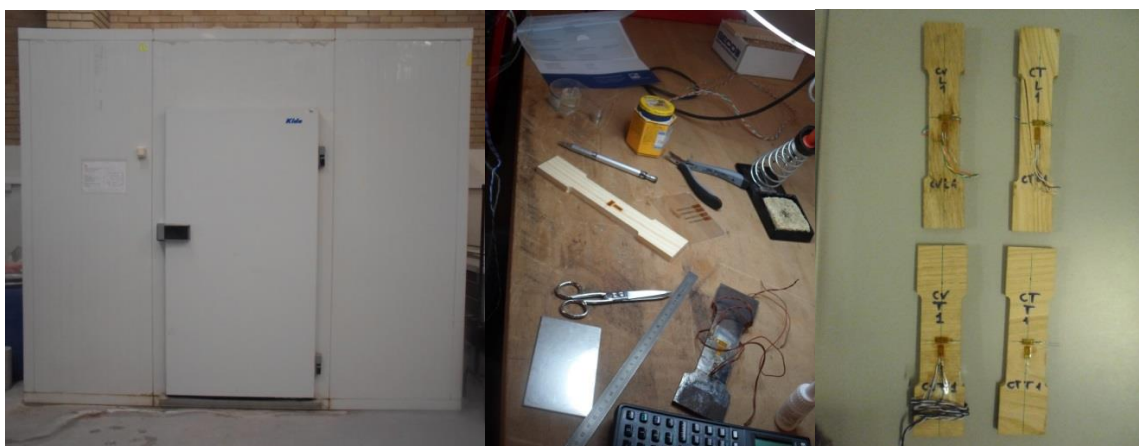
(c)

Figura 29- (a) – Maquinagem ; (b) - Modelo do provete; (c) - Fixação do provete.

4.9 Realização do ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração será utilizado o seguinte equipamento:

- Uma câmara húmida (Figura 30 (a));
- Máquina de ensaios universal (Instron – 4485);
- Extensómetros elétricos HBM (Figura 30 (b e c));
- Cola HBM;
- Verniz HBM;
- Sistema portátil de aquisição de dados (P3, VISHAY).



(a)

(b)

(c)

Figura 30- (a) - Câmara húmida; (b e c) - Aplicação de extensómetros nos provetes.

Após realização de todos os provetes, o procedimento de ensaio resume-se às seguintes tarefas:

- Os provetes foram colocados numa câmara húmida com o objetivo da obtenção de um teor de umidade próximo de 12%, de acordo com a norma, [19], conforme a Figura 31 (a);
- Foi colocado um par de extensómetros em 2 provetes de cada espécie, no sentido longitudinal e no sentido transversal das fibras. O objetivo é registar a deformação obtida no decurso do ensaio à tração através da ligação ao sistema de aquisição de dados (Figura 31 (b));

Os provetes são fixos à máquina universal de ensaios à tração (Figura 31 (b)) através das suas amarras (Figura 31 (c)).

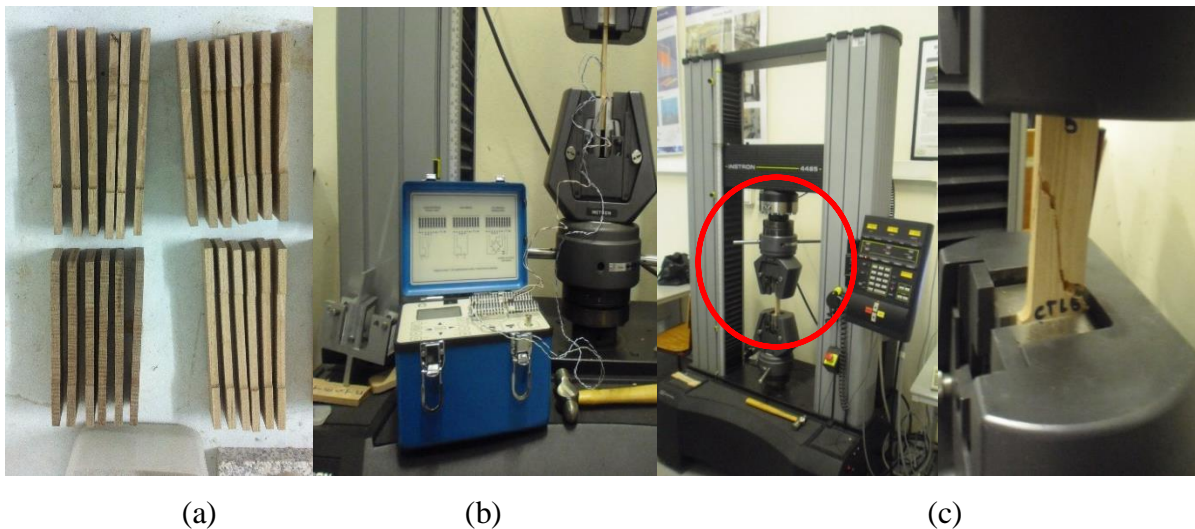


Figura 31- (a) - sistema de aquisição de dados portátil (P3); (b) - Máquina universal de ensaios; (c) - provete em rotura.

4.10 Extensometria

A extensometria é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e de deformações em estruturas. A extensometria é de versátil aplicação. O extensómetro elétrico ou *strain gauge* é uma resistência elétrica composta de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante devendo ser colado sobre a estrutura a ensaiar. Como o extensómetro é sensível às deformações provocadas pelas cargas presentes, é então possível medir o comportamento de deformação nesse corpo. Desta forma é possível verificar campos de deformação em diversos tipos de estruturas submetidas a diversos tipos de carregamento. A escolha do tipo e da geometria de um extensómetro está condicionada pela forma como vai ser colado na peça, a precisão necessária nas medições, bem como o grau de proteção com o ambiente. Assim dever-se-ão utilizar todos os procedimentos inerentes à técnica de instalação de um extensómetro.

A fidelidade das leituras efetuadas com extensómetros está intimamente relacionada com a perfeita aderência deste sobre a superfície em estudo. Toda e quaisquer imperfeições ocorridas durante a fixação dos extensómetros irão posteriormente gerar interpretações erróneas quanto às reais deformações ocorridas numa determinada região. Dever-se-á seguir cuidadosamente as instruções de manuseio e fixação do extensómetro. Também a técnica de soldadura exige requisitos mínimos. Antes de iniciar o processo de soldadura dos cabos do extensómetro e do terminal, deve ser feita uma proteção dos mesmos, deixando em exposição apenas a parte a ser utilizada durante a soldadura. Nos casos de utilização das peças em estudos em laboratórios, torna-se necessária ainda a aplicação de um verniz para a proteção da área de instalação do extensómetro, evitando o aparecimento de oxidações e a ocorrência de humidade no circuito elétrico.

O princípio de funcionamento de uma resistência elétrica de um condutor é definido pela seguinte equação:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (6)$$

R é a resistência elétrica do condutor; ρ o coeficiente de resistividade elétrica do material do condutor; L o comprimento do condutor e A a área da secção transversal do condutor.

Ao deformar-se mecanicamente, esse condutor tem uma modificação na resistência total, devido às variações dimensionais ocorridas e à modificação da resistividade elétrica, variável com a solicitação mecânica imposta ao material, fenómeno descoberto por Lord Kelvin em 1856. O princípio enunciado permite a obtenção do registo de deformações na direção da aplicação do extensómetro, Figura 32. Nos ensaios realizados optou-se pela colocação de dois extensómetros uniaxiais, colocados à superfície do provete e perpendicularmente, de forma a obter-se o registo das deformações para cálculo posterior do coeficiente de Poisson.

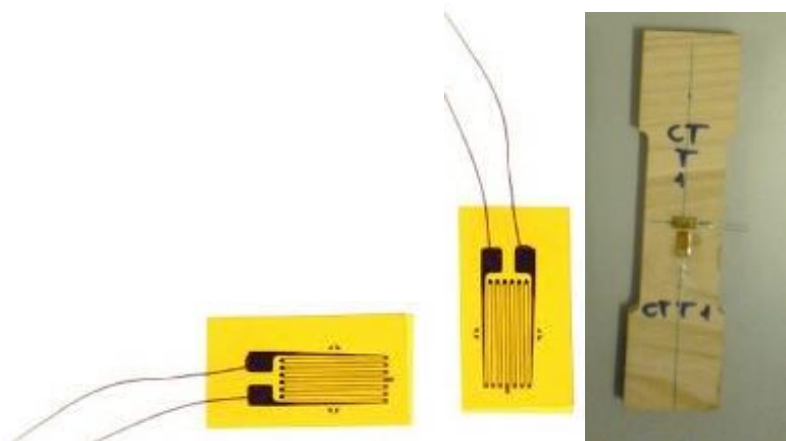


Figura 32 – Extensómetros uniaxiais e instalação no provete

Capítulo 5

Resultados do programa experimental

5.1 Variação dimensional

Com base na bibliografia [7], todo o estudo da arquitetura anatômica requer a consideração de planos principais de observação, que correspondem às orientações privilegiadas das células, com diferentes eixos principais, segundo os quais se estudam, definem e medem as propriedades reconhecidas unanimemente como específicas do material, sendo eles: o plano transversal, o plano radial e o plano longitudinal.

Nos gráficos da Figura 33 e 34 são apresentadas as médias dos valores obtidos para a dimensão tangencial nos provetes secos e nos provetes saturados, nos dois primeiros ciclos. As variações dimensionais segundo a direção radial, tangencial e longitudinal foram designadas por Δ_r , Δ_t e Δ_l , respetivamente (equação 7). A variação dimensional foi calculada a partir da equação 7, em que d_1 é a dimensão do provete seco ou saturado, ao longo do tempo e d_0 é a primeira dimensão radial, tangencial e longitudinal (no início dos ensaios experimentais), [21].

$$\Delta = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad (7)$$

A dimensão tangencial aumenta para os dois tipos de madeira, observando-se para cada uma o mesmo comportamento nos dois ciclos, que pode ser considerado aproximadamente linear. Para o castanho regista-se uma variação total de 1,65% no 1.º ciclo e 1,47% no 2.º ciclo. As variações finais obtidas para o carvalho são inferiores às do castanho, registando-se valores entre 1% e 1,06%. Assim, pode afirmar-se que o carvalho varia menos em termos de dimensão tangencial. Em ambas as madeiras a variação de dimensão foi mais significativa no primeiro ciclo.

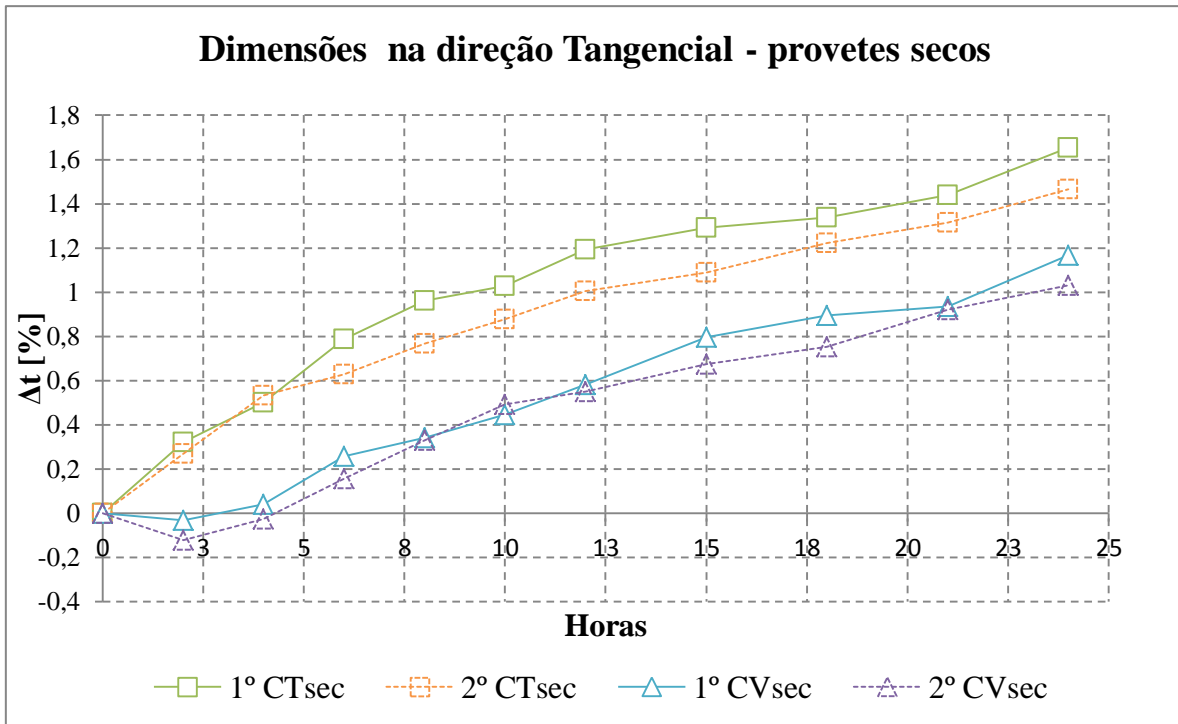


Figura 33- Variação dimensional na direção tangencial dos provetes secos nos dois ciclos

Quanto à variação da dimensão na direção tangencial dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos, Figura 34, partindo de uma variação inicial nula, ao fim de duas horas os provetes de carvalho perderam mais do que os de castanho e, esta tendência manteve-se ao longo das 22 horas seguintes. Note-se que as curvas dos dois ciclos em cada tipo de madeira são similares, isto é, têm o mesmo comportamento. No global, os provetes de castanho sofrem uma redução dimensional de cerca de 1% e os de carvalho cerca de 2%.

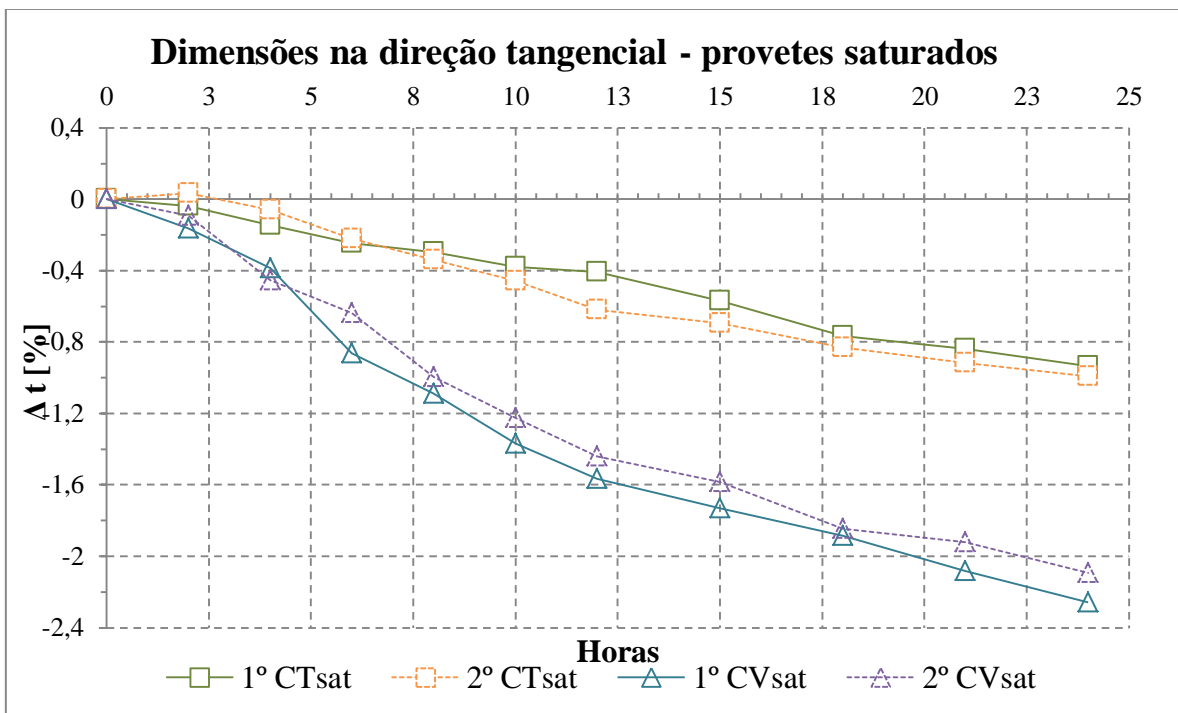


Figura 34- Variação dimensional tangencial dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos

A evolução ao longo do tempo das curvas relativas à variação tangencial, para os provetes secos e saturados, é em tudo similar ao observado para as madeiras estudadas, [22], [20] e [23]. O castanho, quando comparado com o carvalho, aumenta mais no caso dos provetes secos na direção tangencial e perde menos nos provetes saturados na mesma direção, estes são os pontos de equilíbrio atingidos diferem quer se trate de provetes secos os saturados.

Na Figura 35 apresentam-se as variações obtidas nos dois ciclos para a dimensão radial. Observa-se que os provetes de castanho apresentam uma maior variação radial desde o primeiro instante, e essa tendência manteve-se ao longo das 24 horas. O comportamento registado para os dois tipos de madeira nos dois primeiros ciclos é muito semelhante. Globalmente, regista-se um aumento maior no castanho (cerca de 1%) em relação ao carvalho (cerca de 0,7% e de 0,5 para o 1.º e 2.º ciclo, respetivamente).

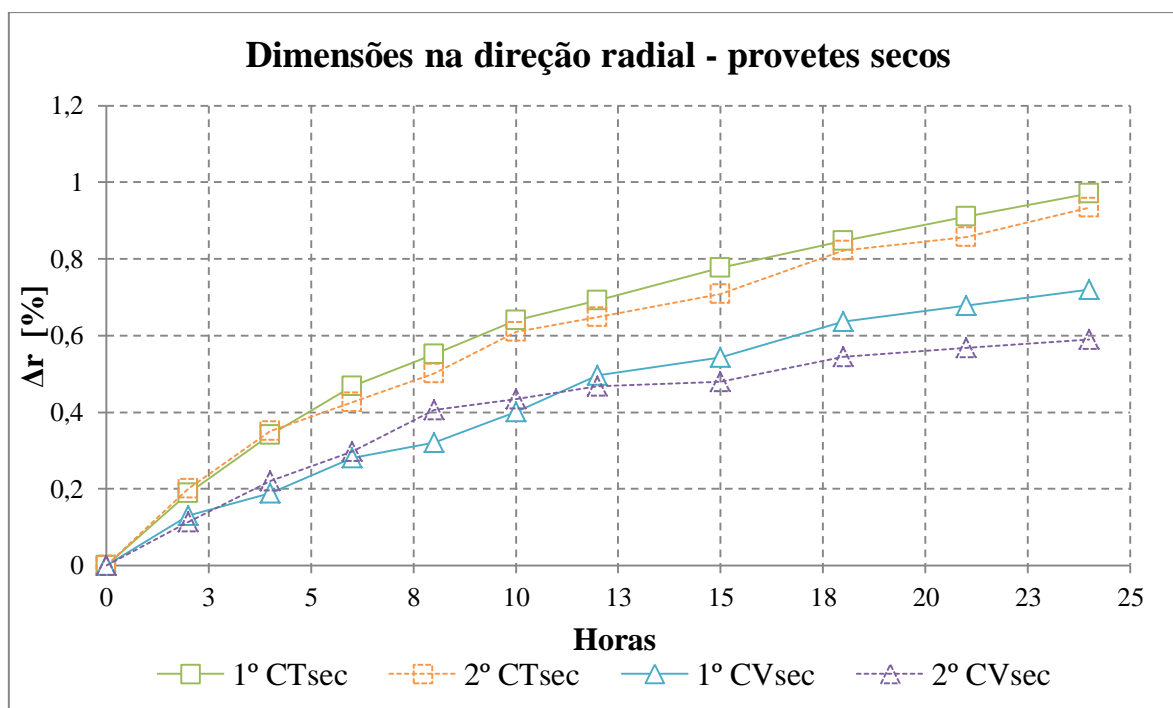


Figura 35- Variação dimensional radial dos provetes secos nos dois primeiros ciclos

Nos provetes saturados, tal como esperado, há uma diminuição radial nos dois tipos de madeira (Figura 36), registando-se ao longo do tempo menores perdas na direção radial de dimensão para o castanho, que ao fim de 24 horas apresenta uma diminuição global que ronda os 0,7% nos dois ciclos. Os provetes de carvalho registam ao fim de 24 horas perdas de dimensão na direção radial que rondam 1,1%, mais acentuadas que a madeira de castanho.

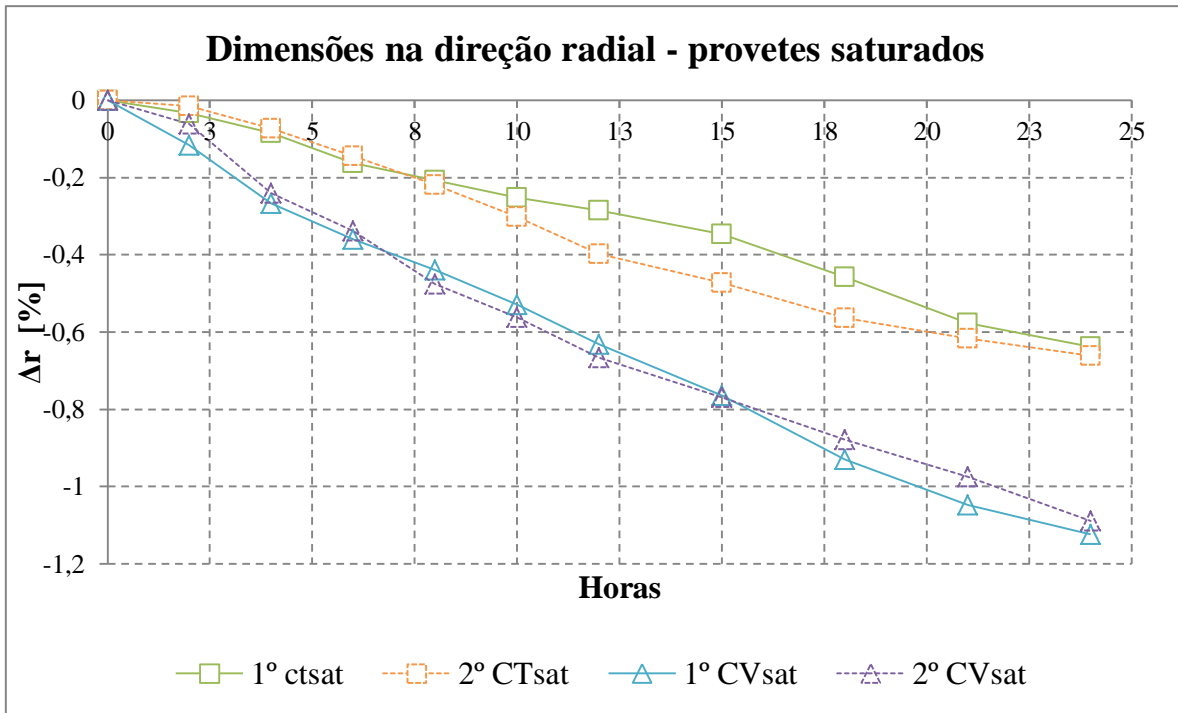


Figura 36- Variação dimensional radial dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos

Quando se comparam as curvas obtidas neste estudo com o realizado para as resinosas, [22], [20] e [23], mais uma vez se observa o mesmo tipo de comportamento, registrando-se pontos de equilíbrio distintos, consoante se trate de ganhos ou perdas na direção radial (secos ou saturados, respetivamente).

As variações de dimensão na direção longitudinal dos provetes secos são apresentadas na Figura 37. Através da sua observação e análise constata-se que as quatro curvas têm o mesmo comportamento, registrando-se maiores ganhos no carvalho e menores no castanho. Os ganhos do castanho rondam os 0,55% e os do carvalho são ligeiramente inferiores rondando os 0,45%.

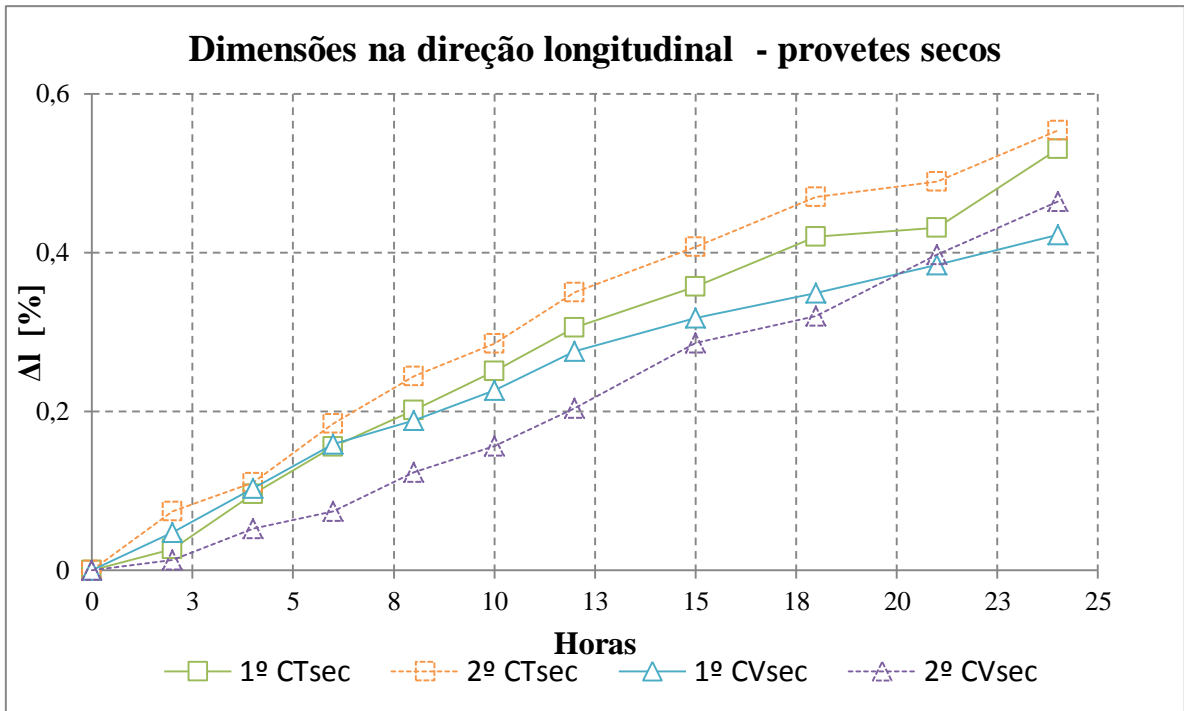


Figura 37- Variação longitudinal dos provetes secos nos dois primeiros ciclos

Quanto à variação longitudinal dos provetes saturados, Figura 38, observa-se alguma sobreposição das curvas das duas madeiras e dos dois ciclos, pelo que as perdas registadas são muito similares na direção longitudinal. As perdas globais variam entre 0,45% e 0,55%, valores muito próximos.

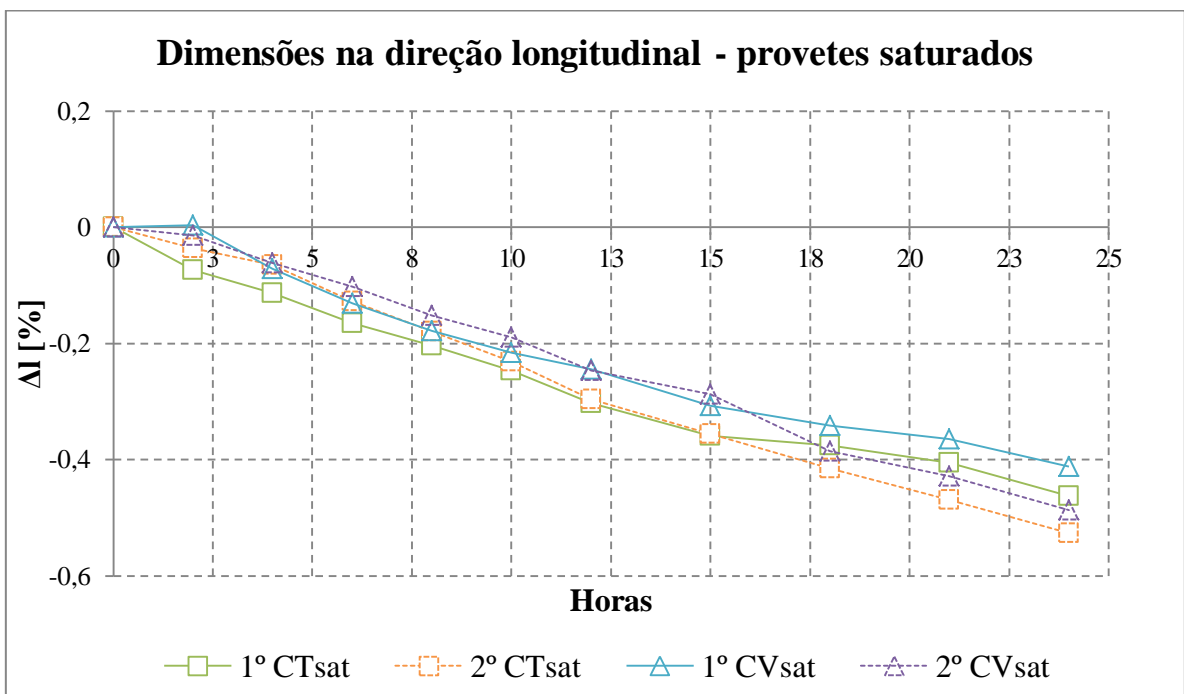


Figura 38- Variação dimensional dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos

Resultados similares foram obtidos por [23], [22] e [20] registrando-se pontos de equilíbrio distintos, consoante se trate de ganhos ou perdas (secos ou saturados, respetivamente).

Da análise comparativa para a variação dimensional, nos provetes secos, nas três direções verifica-se que a madeira de castanho é a que apresenta maior variação dimensional e essa variação é mais acentuada na direção tangencial. No caso dos provetes previamente saturados quando introduzidos na câmara húmida há uma tendência natural para os provetes diminuírem de dimensão. A redução de dimensão mais acentuada foi registada na madeira de carvalho segundo a direção tangencial.

Seguidamente será feita uma comparação com o terceiro ciclo. No terceiro ciclo os provetes foram trocados, os que anteriormente foram secos passaram agora a ser os provetes saturados e os provetes saturados passaram a estar secos. Das Figuras 39 a 40 são apresentadas as variações dimensionais nos três ciclos. Quanto à variação tangencial dos provetes secos, Figura 39, as curvas relativas ao 3.º ciclo têm um comportamento similar às obtidas nos dois primeiros ciclos, sendo os ganhos do castanho ligeiramente superiores aos do carvalho, mas inferiores aos dois primeiros ciclos para ambas as espécies de madeira.

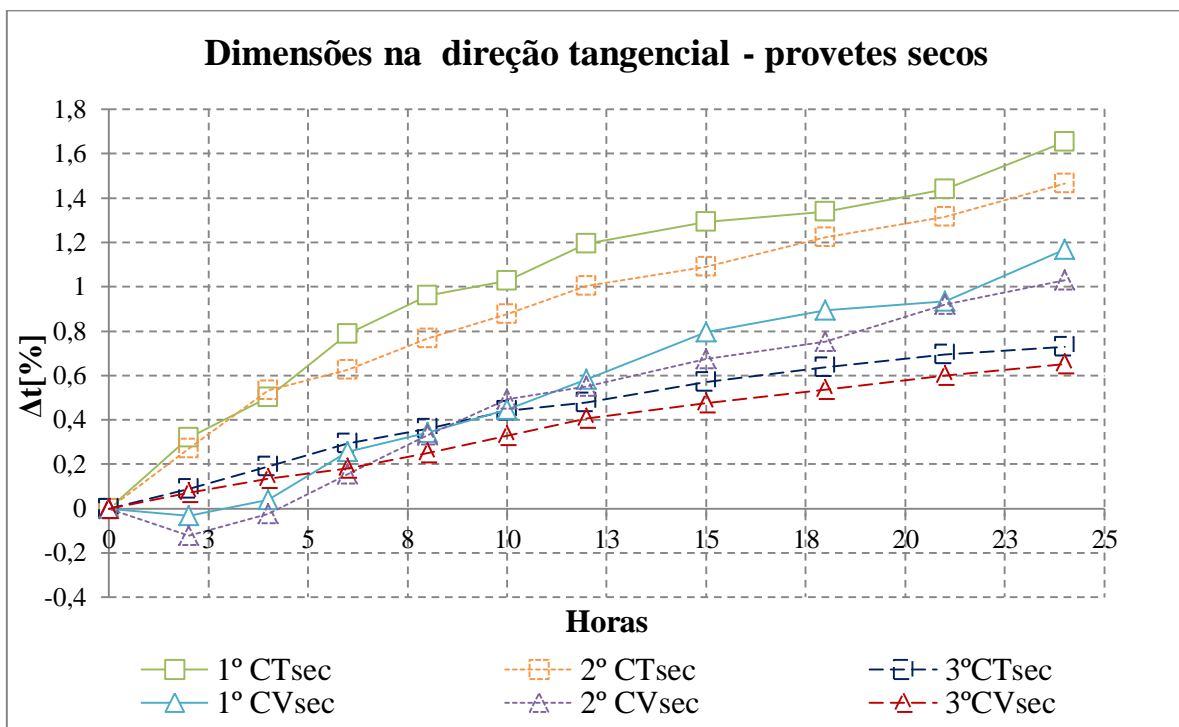


Figura 39- Variação dimensional tangencial dos provetes secos nos três ciclos

A variação tangencial dos provetes saturados no 3.º ciclo é muito semelhante nos dois tipos de madeira, registrando-se maiores perdas para o castanho, cerca de 1,4%, face a 1,25% para o carvalho. De notar ainda que as curvas relativas ao 3.º ciclo situam-se entre as curvas obtidas nos dois primeiros ciclos (Figura (40)).

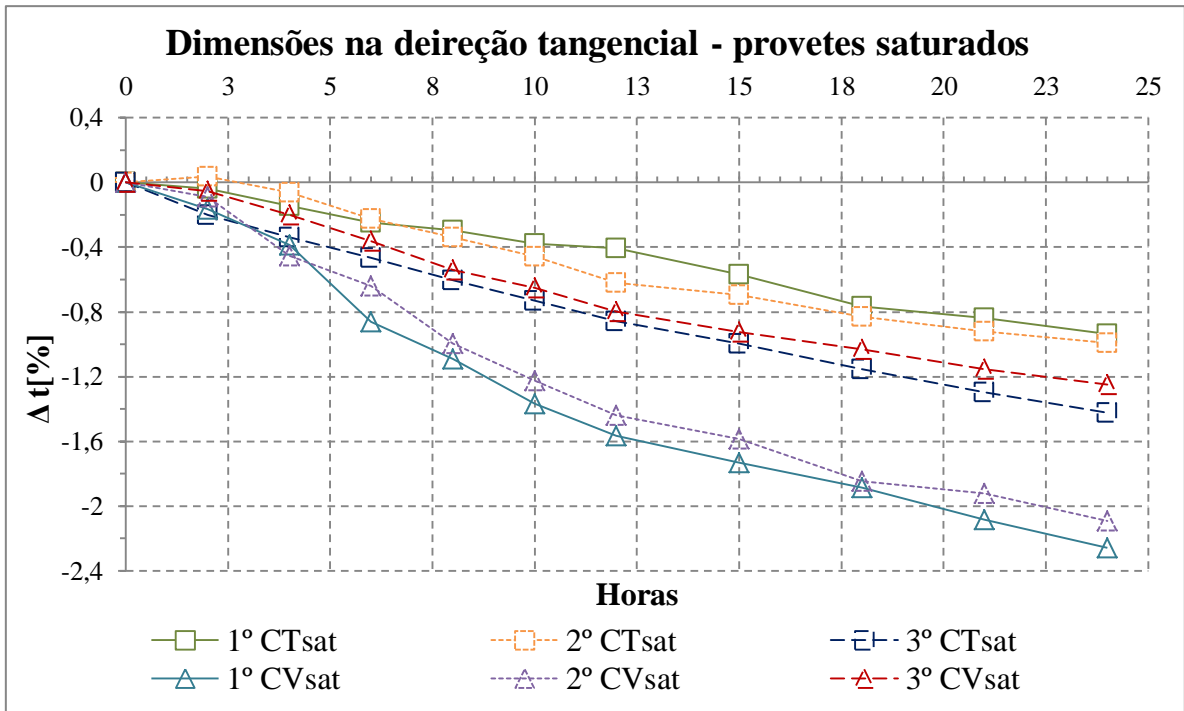


Figura 40- Variação dimensional tangencial dos provetes saturados nos três ciclos

A variação radial dos provetes secos nos três ciclos apresenta incrementos muito similares nos dois tipos de madeira, sendo que no castanho os ganhos finais são ligeiramente inferiores (0,8%), e, no carvalho os ganhos ao fim das 24 horas ficam compreendidos entre os dos dois primeiros ciclos (cerca de 0,6%) (Figura (41)).

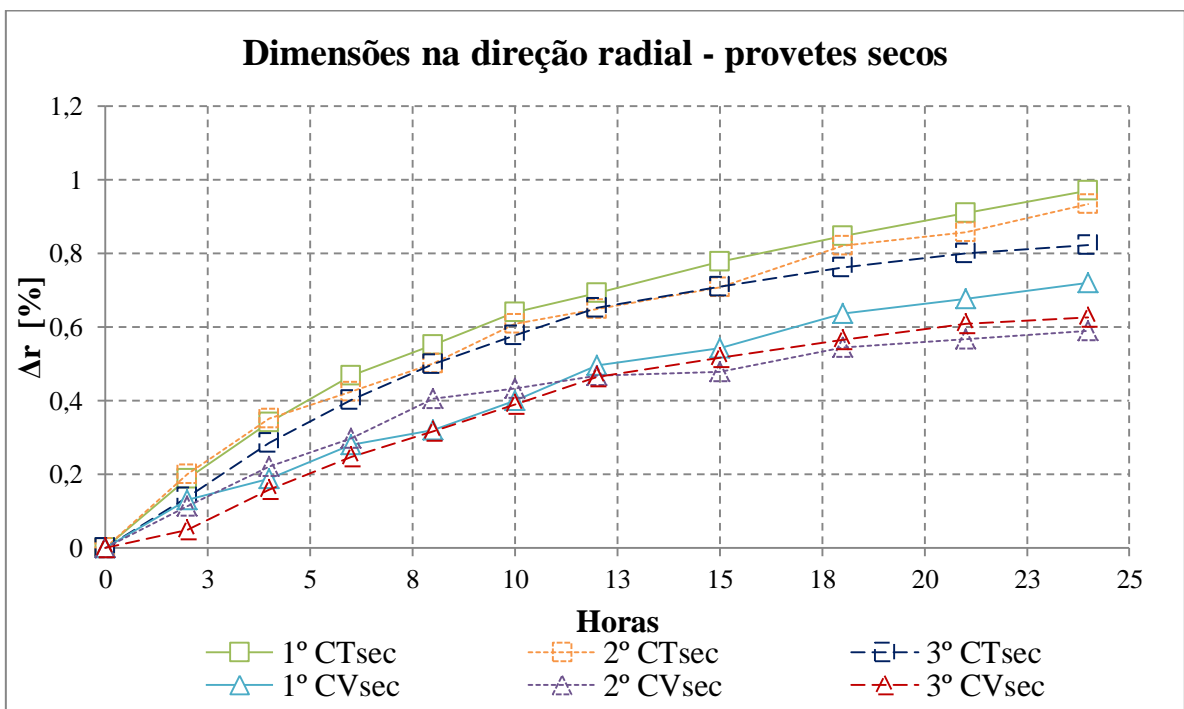


Figura 41- Variação dimensional radial dos provetes secos nos três ciclos

Quanto à dimensão radial dos provetes saturados (Figura (42)) o carvalho apresenta perdas aproximadamente lineares nos três ciclos, sendo que ao longo do tempo as perdas do 3.º ciclo são ligeiramente inferiores do que as dos outros dois ciclos, mas no final os valores são muito semelhantes. As perdas associadas aos provetes de castanho são inferiores às do carvalho nos três ciclos e muito próximas das obtidas nos dois ciclos anteriores.

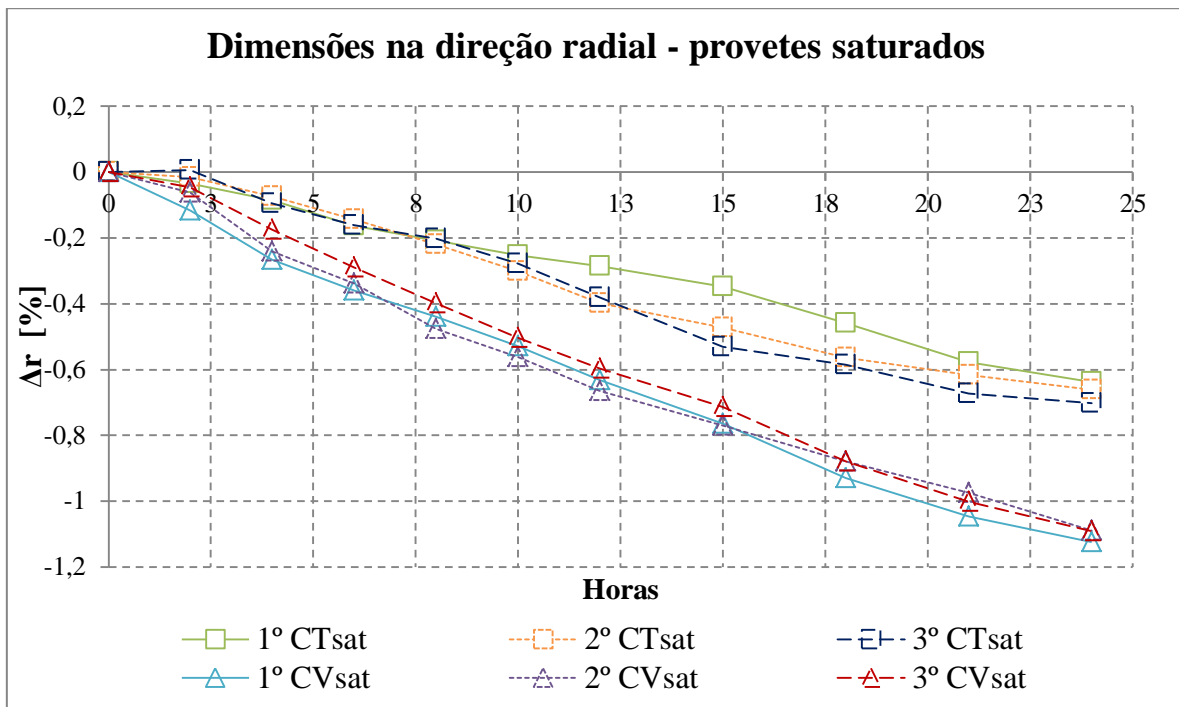


Figura 42- Variação dimensional radial dos provetes saturados nos três ciclos

As variações longitudinais dos provetes secos nos três ciclos são apresentadas na Figura 43. Constata-se que não há uma distinção clara entre os dois tipos de madeira pois as curvas estão sobrepostas para alguns valores horários. Globalmente, o castanho apresenta maior variação dimensional longitudinal que a madeira de carvalho. De notar que os provetes do terceiro ciclo do castanho, apresentam maiores ganhos dimensionais nas primeiras 15 horas, e depois estabilizam mais em relação aos provetes dos dois primeiros ciclos. Este comportamento observa-se também nos provetes de carvalho.

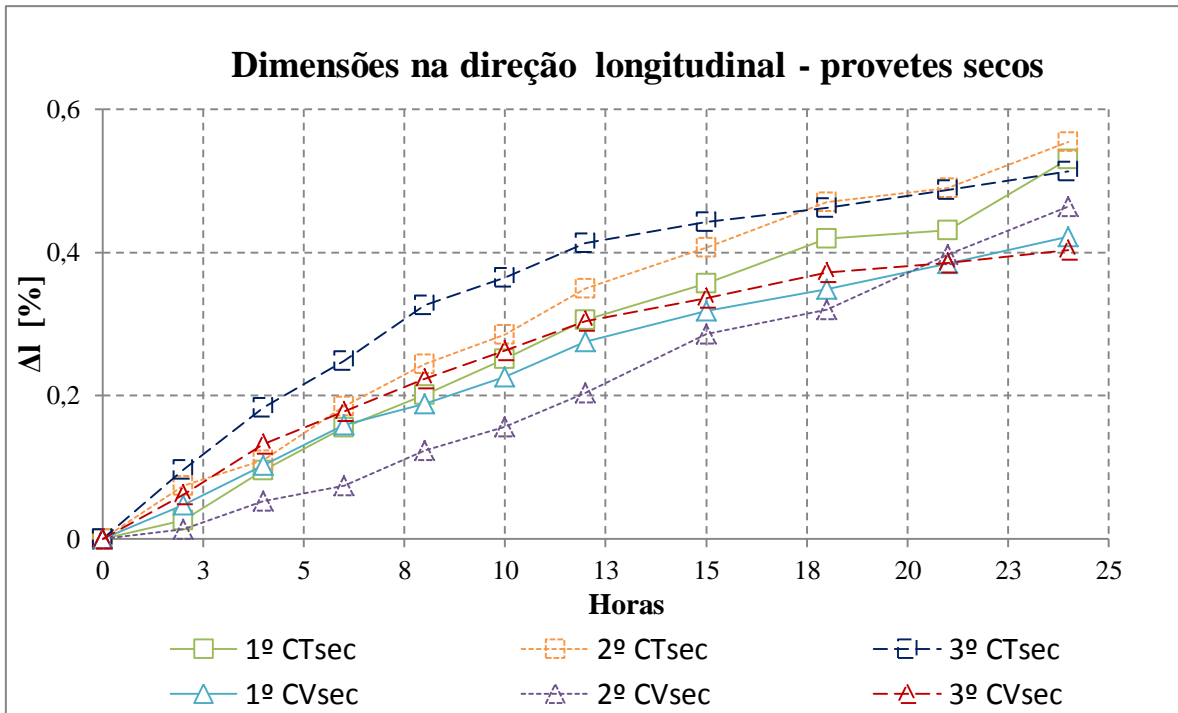


Figura 43- Variação dimensional longitudinal dos provetes secos nos três ciclos

Na dimensão longitudinal dos provetes saturados, constata-se também que não há uma clara distinção entre os dois tipos de madeira, reportando-se no entanto maiores perdas no castanho. No entanto, destaca-se que globalmente todos os provetes apresentam perdas que variam entre 0,4 e os 0,6% havendo sobreposição nos dois tipos de madeira. Estes dados são apresentados na Figura 44.

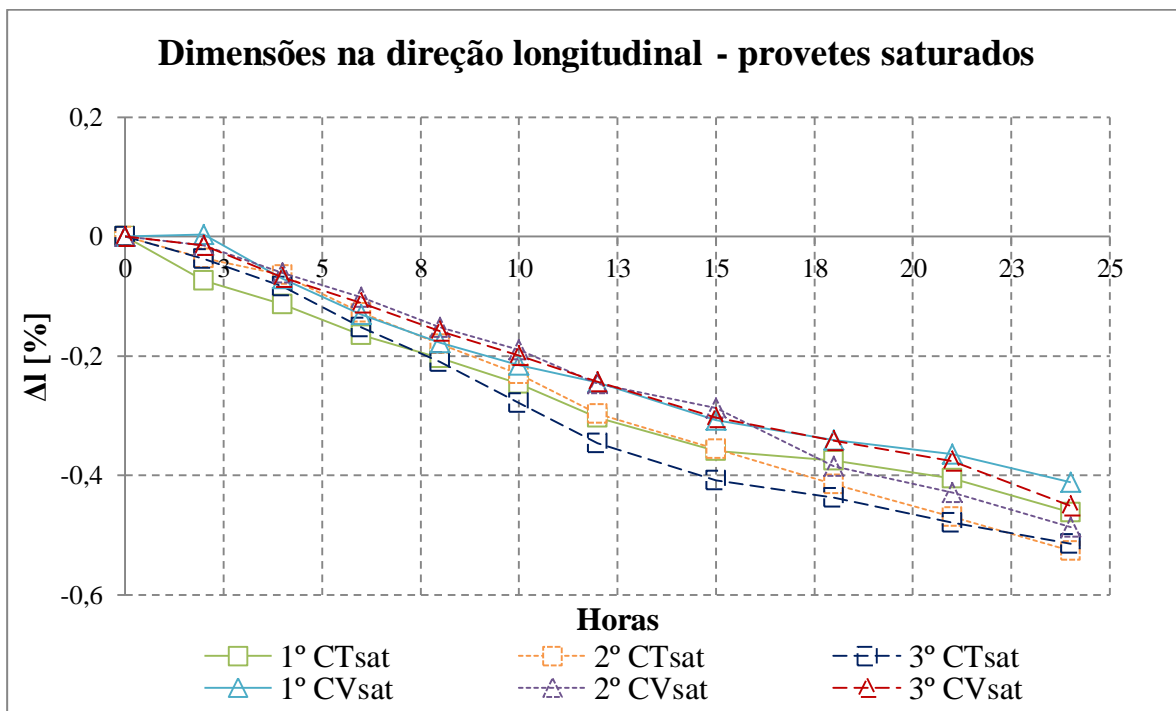


Figura 44- Variação dimensional longitudinal dos provetes saturados nos três ciclos

A evolução ao longo do tempo, com as curvas relativas às variações dimensionais nas direções tangencial, radial e longitudinal para os provetes saturados, pode ser feita uma análise, Figura 17, mostrando que é em tudo similar ao observado nestes ensaios. Constatase que a retração longitudinal (axial) possui o menor valor das três, de seguida vem a direção radial e por fim a tangencial que se apresenta com valores maiores em relação aos outros dois. Para os provetes secos sucede-se o mesmo, a direção tangencial é a que apresenta maior variação de dimensão, [24] e [5].

5.2 Variação da massa

As figuras seguintes mostram a variação média da massa (Δ_m) para os provetes saturados e para os provetes secos obtidos durante os ensaios experimentais. É possível avaliar a perda de massa em cada amostra para as duas espécies de madeira. Os valores da variação foram calculados a partir da equação 8, em que m_1 é a massa da amostra seca ou saturada, lida a cada 2h, e m_0 é a massa inicial do provete, [21].

$$\Delta_m = m_0 - m_1 \quad (8)$$

Quanto à variação da massa dos provetes secos nos dois primeiros ciclos (Figura (45)), tanto o castanho como o carvalho apresenta um aumento de massa ao fim das 24 horas de cerca de 0,45g.

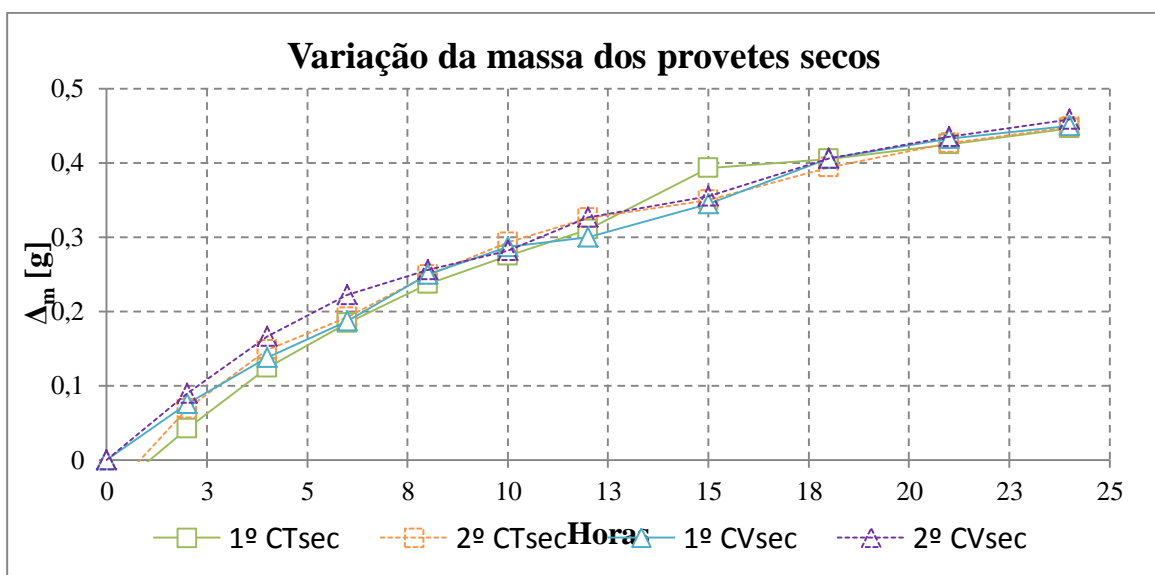


Figura 45- Variação da massa dos provetes secos nos dois primeiros ciclos

A variação da massa ao longo do tempo dá-se de uma forma semelhante à das resinosas, [22], [23] e [20] como seria de esperar, os provetes secos sofrem um aumento de massa.

Na Figura 46 apresenta-se a variação da massa dos provetes secos nos três ciclos. Os provetes do terceiro ciclo nos dois tipos de madeira são os que apresentam maior incremento de massa, destacando-se os provetes de carvalho. Em termos globais os provetes do 3º ciclo tem um incremento 0,65g no Carvalho e 0,52g de massa para o castanho, respetivamente.

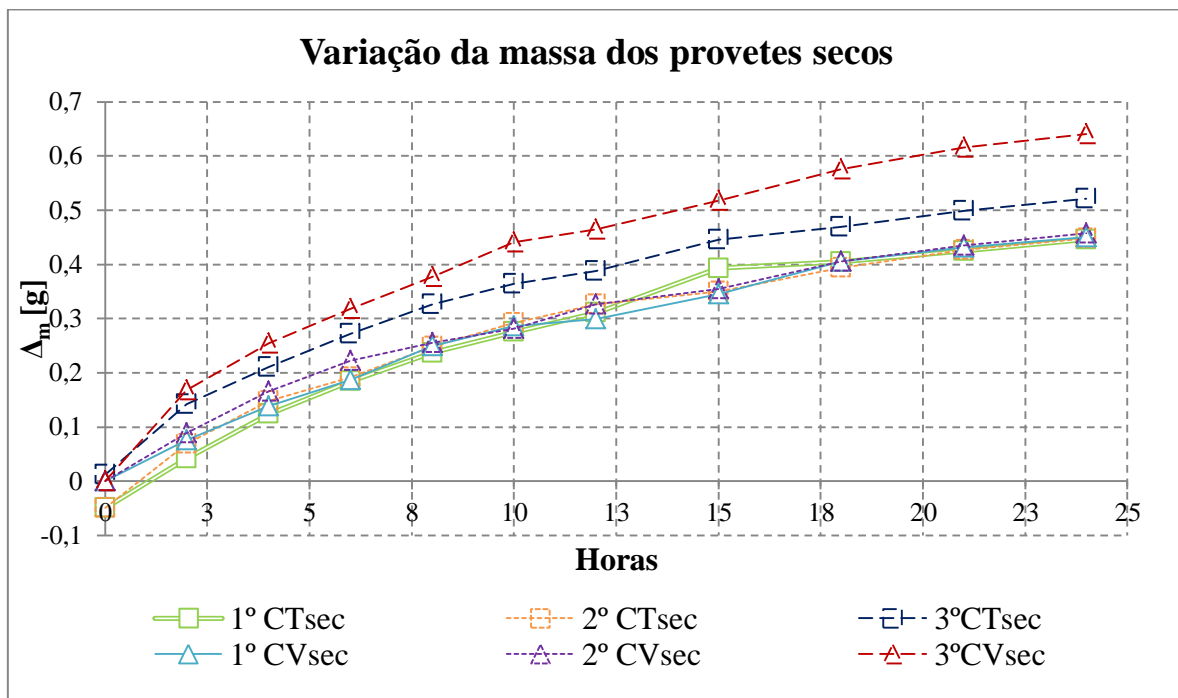


Figura 46- Variação da massa dos provetes secos nos três ciclos

Na Figura 47 está representada a variação da massa dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos. As maiores perdas de massa são registadas na madeira de castanho, com variações entre as 2,7 e os 3,1g. No carvalho, as variações são entre 2,2 a 2,7g.

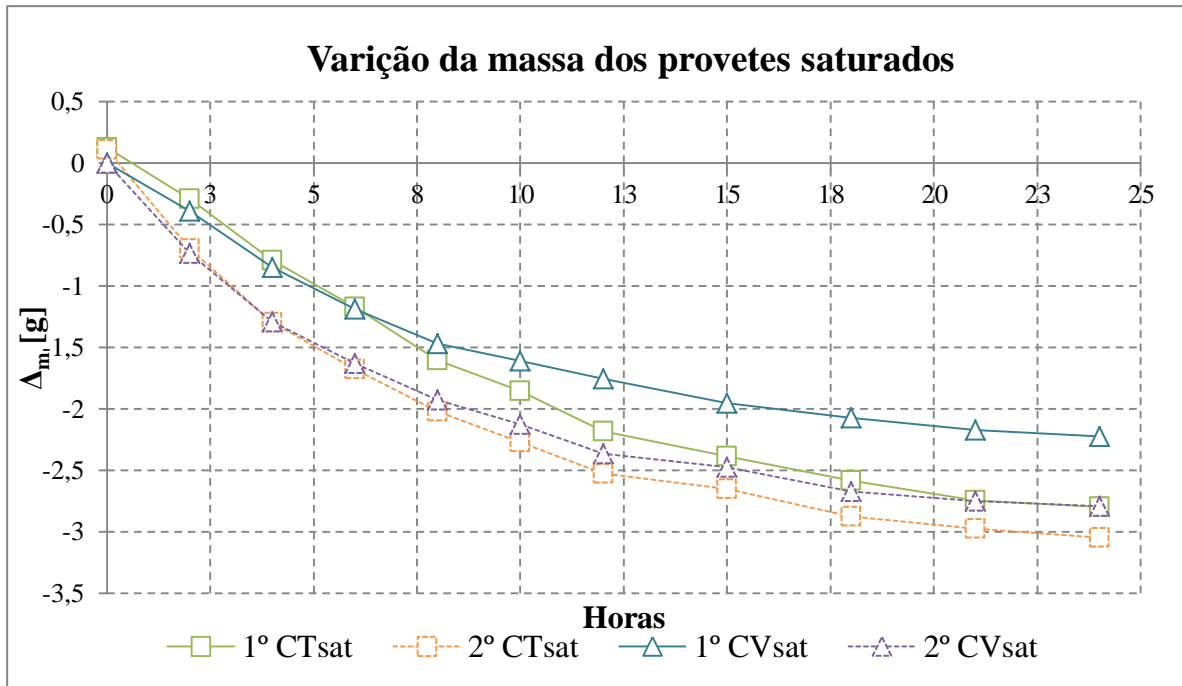


Figura 47- Variação da massa dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos

Os provetes de castanho saturado apresentam curvas muito similares às obtidas pelas madeiras, [22], [23] e [20] cujas perdas são mais acentuadas na fase inicial, no entanto, ao fim de 24 horas apresentam uma maior estabilização do que as resinosas.

A variação de massa dos provetes saturados nos três ciclos é apresentada na Figura 48. Observa-se que os provetes de carvalho apresentam perdas de massa menos acentuadas, comparando com o castanho. Também é notório no carvalho que como aumento de ciclos de variação da massa vai diminuindo. Na madeira de castanho o comportamento dos provetes usados no 3.º ciclo é em tudo similar aos dos dois primeiros ciclos, registrando-se perdas que rondam as 3g.

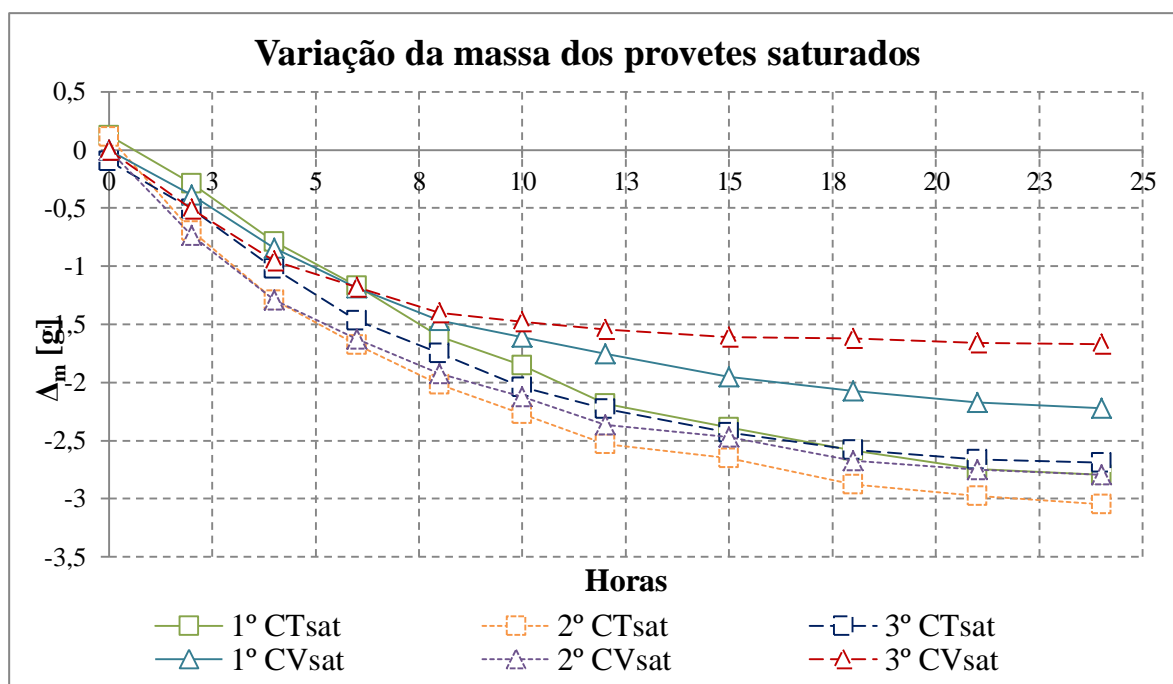


Figura 48- Variação da massa dos provetes saturados nos três ciclos

Comparando os resultados da variação da massa com os resultados da variação dimensional, com base na Figura 17, pode-se verificar que a variação da massa é muito superior à variação dimensional em qualquer uma das 3 direções para os provetes saturados [5], sucedendo o mesmo com os provetes secos, conclusões similares foram obtidas em outros trabalhos, [24].

5.3 Teor em água

O teor em água tem grande influência na densidade da madeira. Durante o processo de secagem de uma determinada espécie de madeira, quando o valor da humidade se situar acima do teor de saturação das fibras (TSF), apenas se verifica uma pequena alteração da massa da madeira, mantendo-se praticamente inalteradas as suas dimensões. O teor de saturação das fibras, para estas espécies de madeira, está compreendido entre 25% e 30%. Da análise dos resultados verifica-se que o teor em água foi inferior ao ponto de saturação o que conduziu a alterações da massa e das dimensões dos provetes de madeira.

O teor em água de um provete de madeira é determinado segundo a [16], obtido pelo quociente, entre a massa da água que se evapora por secagem a 103°C, e a massa do provete seco. O teor em água de referência de um provete de madeira é de 12%. O provete é pesado e seco em estufa durante 24h, findo esse período, o provete é retirado da estufa, deixando-se arrefecer no exsicador e é novamente pesado. O teor em água, H , expresso em percentagem, é determinado de acordo com a equação 9 [21].

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (9)$$

Sendo m_1 a massa do provete húmido e m_2 a massa do provete seco.

Quanto ao teor de água, apresentamos na Figura 49, a variação obtida nos dois primeiros ciclos dos provetes secos. A madeira de castanho apresenta incrementos que rondam os 6%, e o carvalho apresenta valores aproximados a 3%.

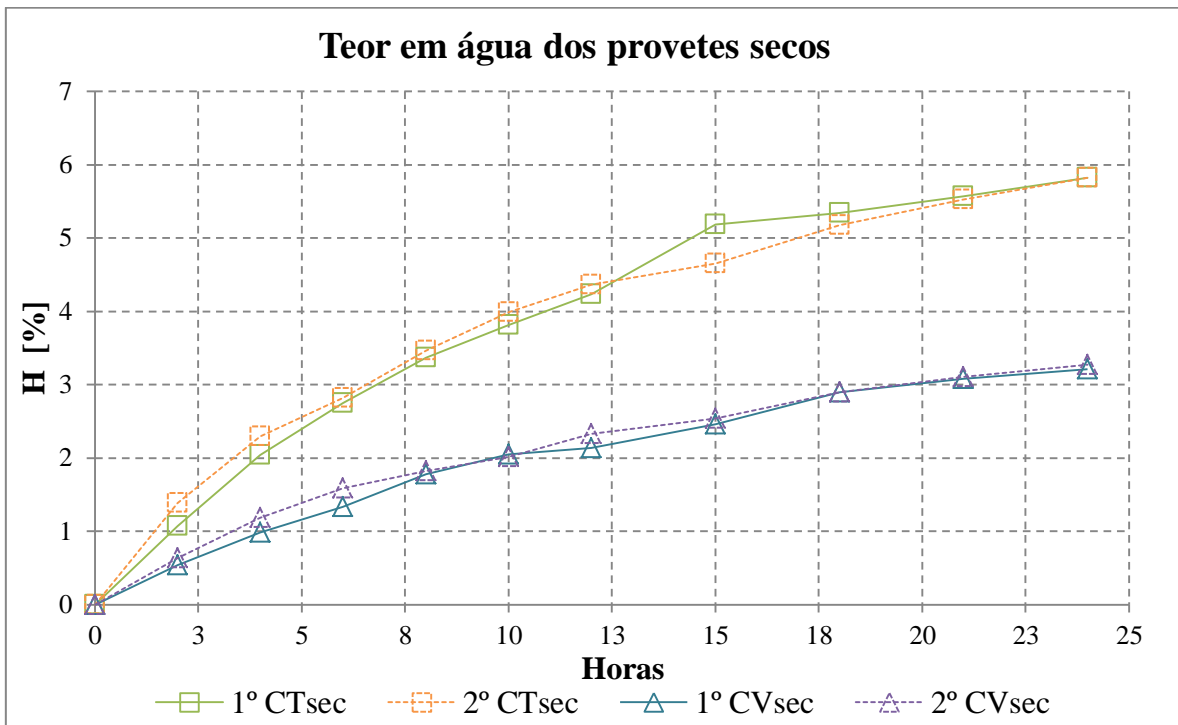


Figura 49- variação do teor em água dos provetes secos nos dois primeiros ciclos

Os provetes saturados, Figura 50, apresentam no instante inicial teores de água que variam entre os 50 a 60% na madeira de castanho e entre 30 e os 40% para o carvalho, e, ao longo do tempo apresentam curvas similares de decrescimento, que se tornam mais acentuadas no caso do castanho, mas que convergem para valores muito semelhantes ao fim de 24 horas. O teor de água nesse instante varia entre os 15 e os 20% para dos dois tipos de madeira.

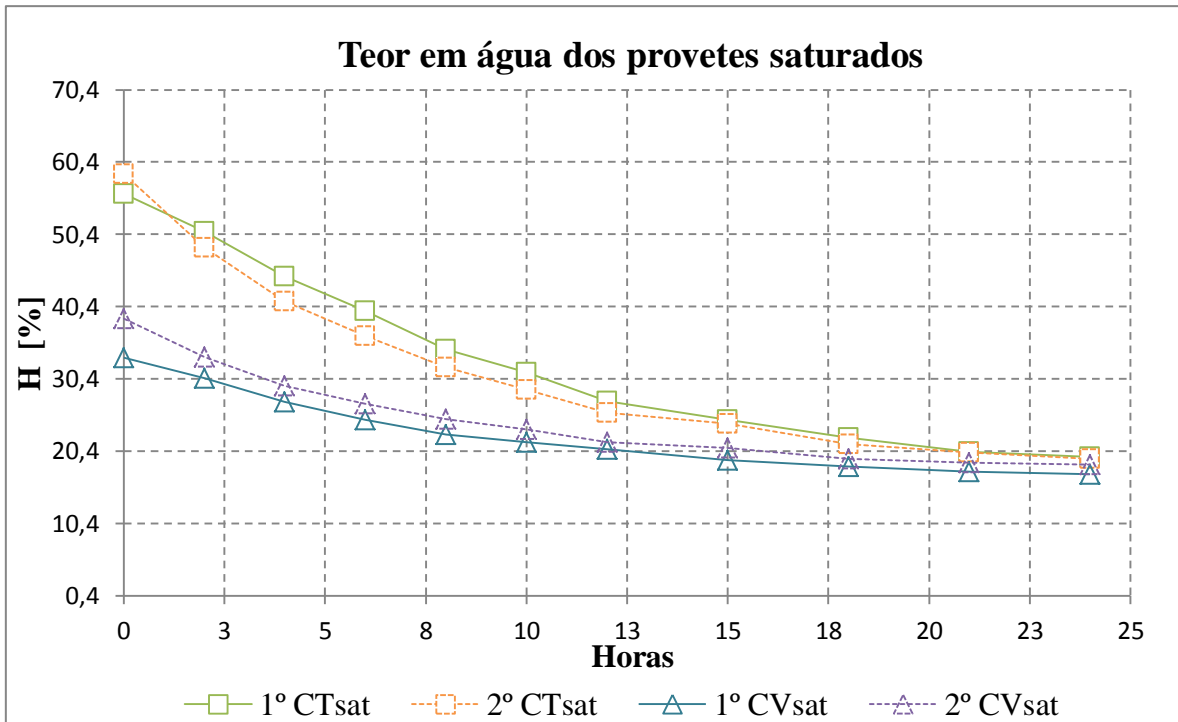


Figura 50- variação do teor em água dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos

O teor de água dos provetes saturados, de madeira folhosas, diminui de forma significativa ao longo do tempo em comparação com os incrementos dos provetes secos, que são claramente inferiores, resultados similares foram obtidos por outros autores, [22], [23] e [20]. No presente estudo obtiveram-se comportamentos similares, tanto para o castanho como o carvalho, que reportam perdas muito mais significativas do que os ganhos dos saturados.

A variação do teor de água nos três ciclos é apresentada nas Figuras 51 e 52, estando na primeira os provetes secos e na segunda os saturados. Nos primeiros observa-se que o castanho ganha maior quantidade de água, em particular no 3.º ciclo com variação ligeiramente superior a 6%. No carvalho, os provetes que absorveram mais água são os usados no 3.º ciclo, com percentagens sempre superiores às registadas nos dois primeiros ciclos, que culminam num incremento final de 4,7%, aproximadamente.

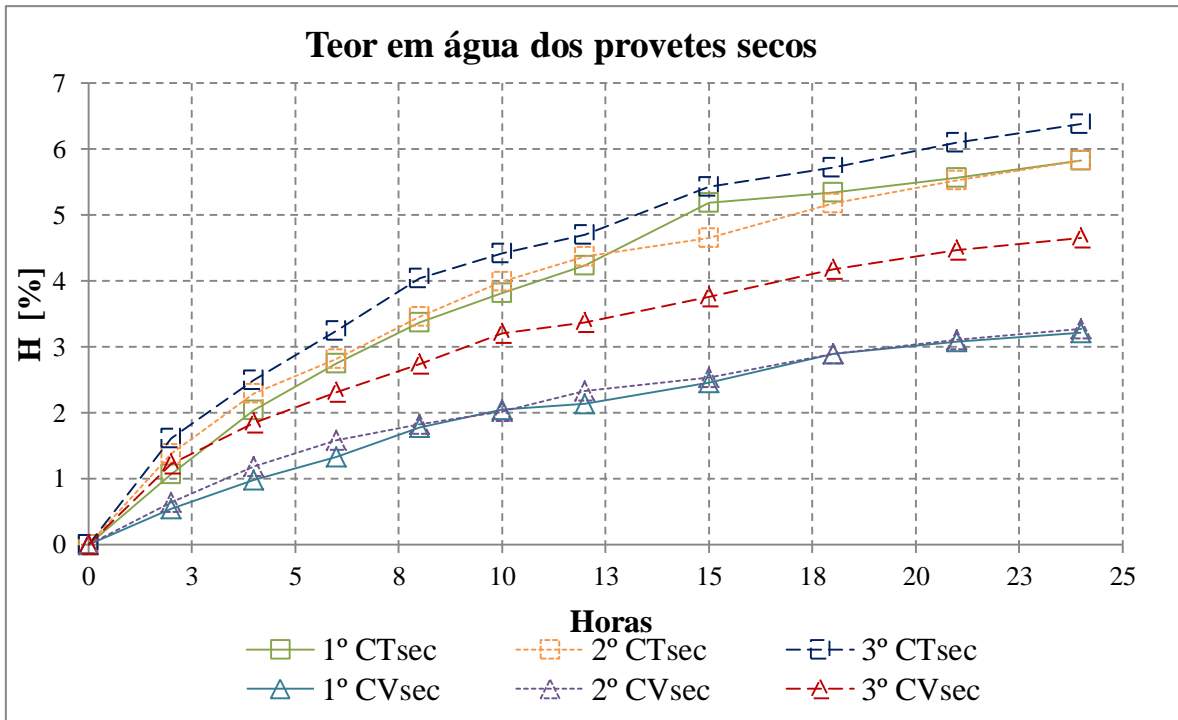


Figura 51- Variação do teor em água dos provetes secos nos três ciclos

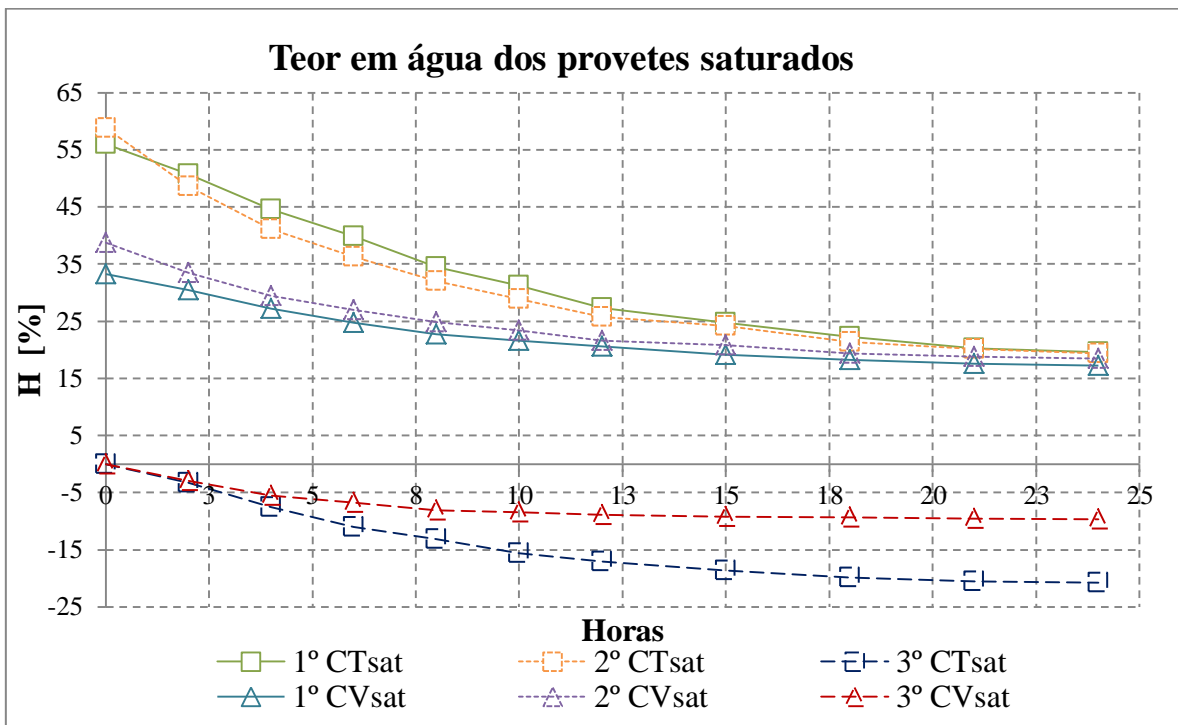


Figura 52- Valores de teor em água dos provetes saturados nos três ciclos

5.4 Massa volúmica de referência

A massa volúmica ou densidade da madeira está ligada ao seu teor em água, quando maior o teor em água maior a massa volúmica. Este indicador permite determinar a massa que a

madeira tem por cada unidade de volume. A massa volúmica de um provete de madeira é determinada segundo a [18] e [21].

A massa volúmica, ρ_H , representa o quociente entre a massa e o volume do provete, obtidos a partir de provetes contendo H% de teor em água como se indica na equação 10.

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)} \quad (10)$$

A massa volúmica de referência (equação 11), utilizada para o dimensionamento de estruturas de madeira, é determinada com o provete a 12% de teor em água, expressa em gramas por centímetro cúbico.

$$\rho_{12} = \rho_H \frac{(100+12)(100+\alpha_v H)}{(100+H)(100+12\alpha_v)} \quad (11)$$

Na expressão anterior H' toma o valor de H ou S conforme o teor em água do provete seja inferior, ou não, ao ponto de saturação das fibras (S).

Quanto à massa volúmica dos provetes secos usando a dimensão radial, Figura 53, observa-se que no carvalho os valores são constantes ao longo do tempo, sendo o valor inicial 0,934 e o final 0,944. Regista-se a mesma tendência nos provetes de castanho, apresentando alguma diferença entre os dois ciclos, com valores ligeiramente mais elevados no 1.º ciclo, que variam entre 0,619 e 0,634 para os instantes inicial e final, respetivamente. No 2.º ciclo registam-se valores iniciais e finais de, respetivamente, 0,601 e 0,612.

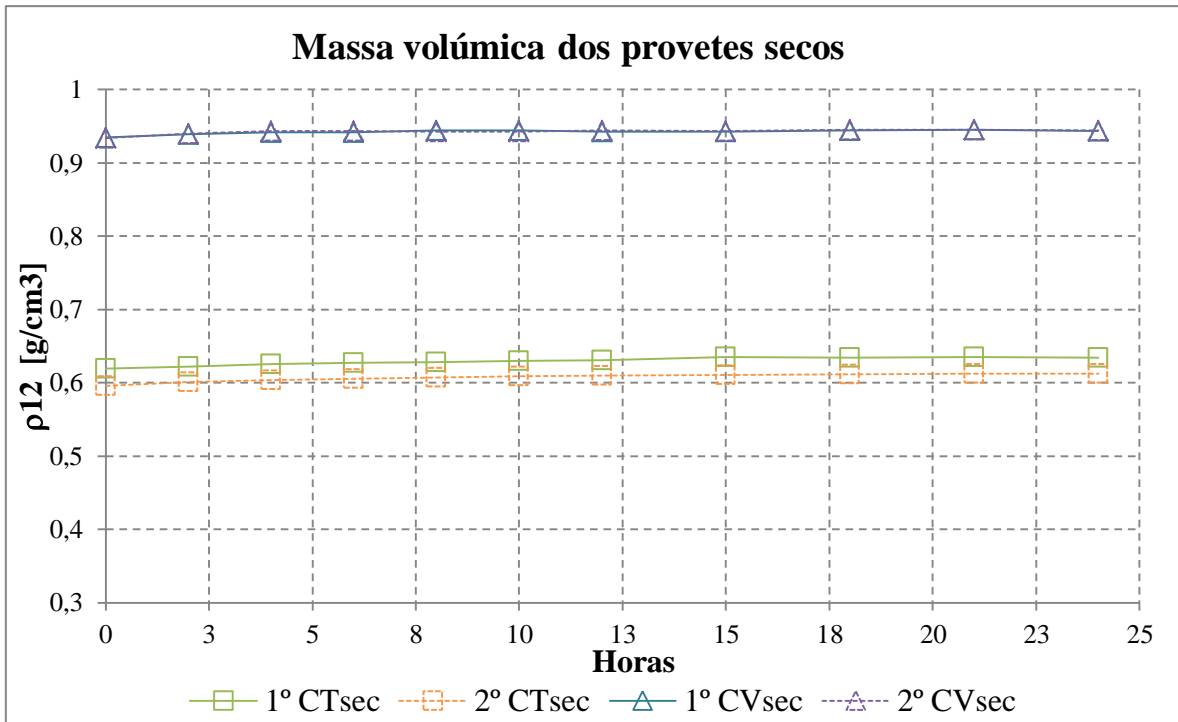


Figura 53- Variação da massa volúmica dos provetes secos nos dois primeiros ciclos

Na Figura 54 apresentam-se as massas volúmicas dos provetes saturados nos dois primeiros ciclos. O carvalho apresenta maior massa volúmica variando entre 1,1 e 1 entre os instantes iniciais e finais. Para o castanho obtêm-se maiores perdas ao longo do tempo, pois no instante inicial registam-se valores que rondam os 0,75 e ao fim de 24 horas os valores registados rondam 0,58.

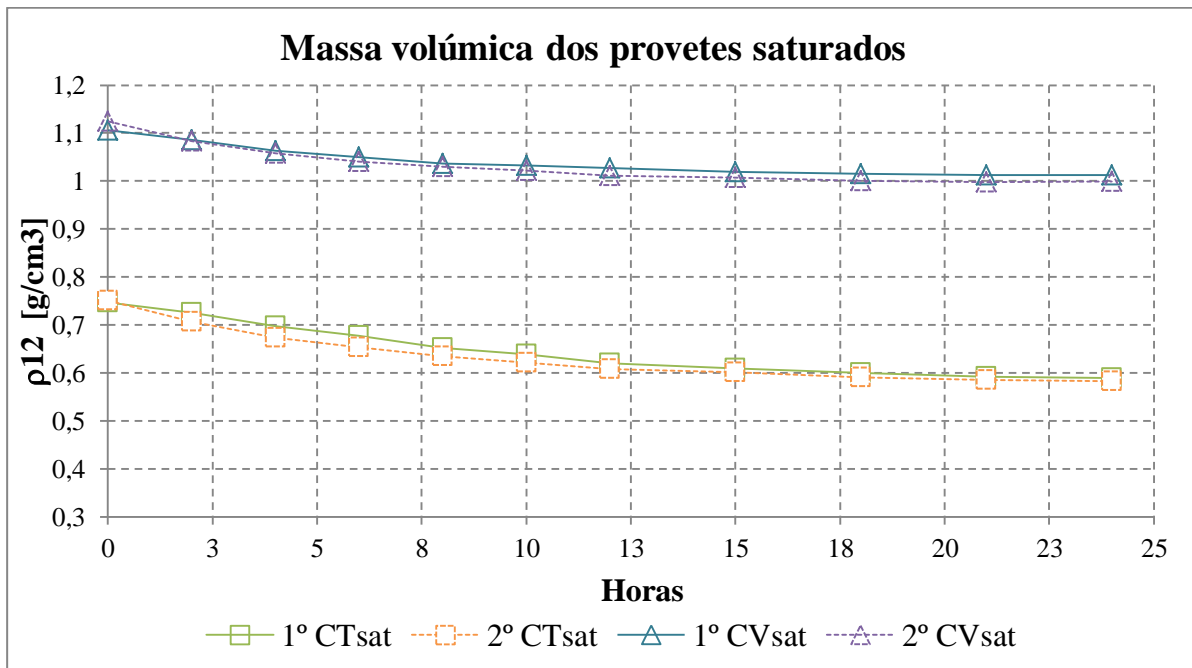


Figura 54- Variação da massa volúmica dos provetes saturados nos primeiros ciclos

Na Figura 55 apresenta-se a evolução da massa volúmica dos provetes secos nos três ciclos. Observa-se que nos provetes de carvalho usados nos três ciclos se registam pequenas variações da massa volúmica (as linhas estão sobrepostas em vários instantes) e os valores iniciais e finais são similares (0,93 e 0,95, respetivamente).

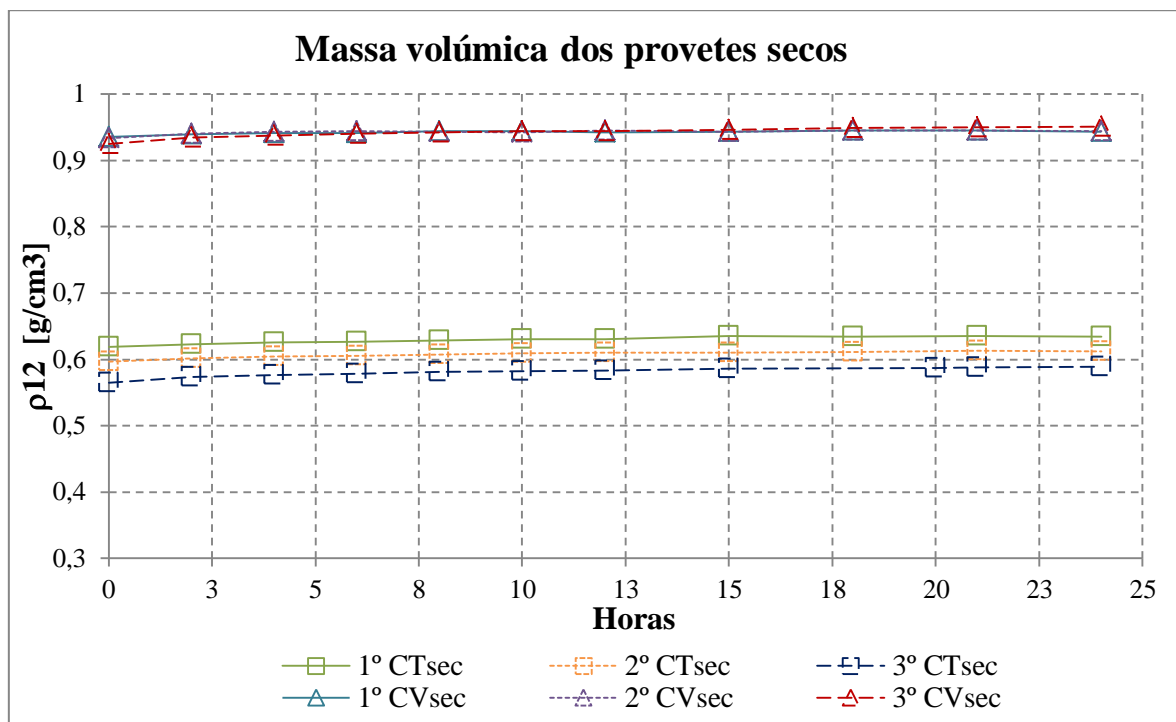


Figura 55- Variação da massa volúmica dos provetes secos nos três ciclos

Quanto aos provetes de castanho, observam-se três linhas praticamente paralelas para cada um dos ciclos, o que traduz pouca variabilidade da massa volúmica ao longo do tempo. De notar que é no 3.º ciclo que se registam os valores mais baixos.

Quanto à massa volúmica dos provetes saturados nos três ciclos, registam-se maiores oscilações nestes dois tipos de madeira face ao observado para os provetes secos (Figura 56). Nos provetes de carvalho (maior massa volúmica) no terceiro ciclo registam-se valores ligeiramente mais baixos ao longo das 24 horas de observação. No castanho, a tendência é contrária, isto é, os provetes do terceiro ciclo têm massa volúmica ligeiramente superior aos dos outros dois ciclos. Em termos de variação, as curvas apresentam o mesmo comportamento nos dois tipos de madeira.

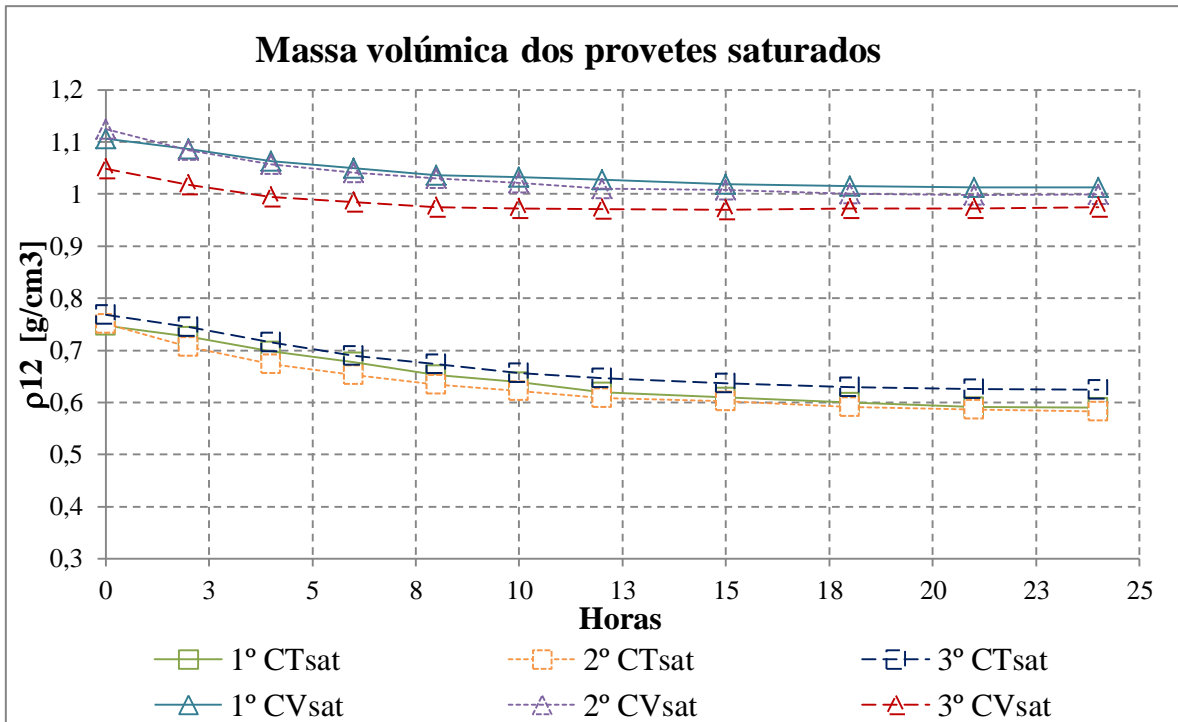


Figura 56- Variação da massa volúmica dos provetes nos três ensaios

Em termos de comportamento variacional para as duas espécies de madeira, ambas pertencentes à família das folhosas, têm comportamentos distintos, verificando-se que a madeira de carvalho é mais estável que a madeira de castanho.

Feita uma comparação entre as duas madeiras em estudo, observa-se que o maior teor em água foi obtido nos provetes de castanho e a massa volúmica maior foi obtida nos provetes de carvalho. Conclui-se que as madeiras têm naturezas distintas, no caso do carvalho visto ser uma madeira mais dura, não apresenta grande variação na sua dimensão, aumentando no caso a sua massa e alterando pouco o seu volume, com isto a sua massa volúmica aumenta, ao passo que no castanho depara-se com o contrário, a sua massa e o seu volume aumentam ainda que a percentagem de volume aumentada seja maior do que a percentagem de massa, levando isto a uma diminuição da massa volúmica.

5.5 Resistência mecânica à tração

Durante os ensaios à tração, a deformação ficou confinada à região central do corpo de prova. A máquina de ensaio de tração foi programada para alongar o provete a uma taxa constante (velocidade igual a 0,5 mm/min), além de medir contínua e simultaneamente a carga instantânea aplicada e os alongamentos resultantes. Simultaneamente é elaborado um gráfico carga-deslocamento ou tensão-deformação durante o ciclo de cada ensaio.

5.6 Ensaio destrutivos

Após a colocação de cada provete na máquina de ensaios é necessário atender à direção paralela ou perpendicular ao fio, (Figura 57 (a, b)) para o estudo correto das propriedades mecânicas e realização do ensaio.

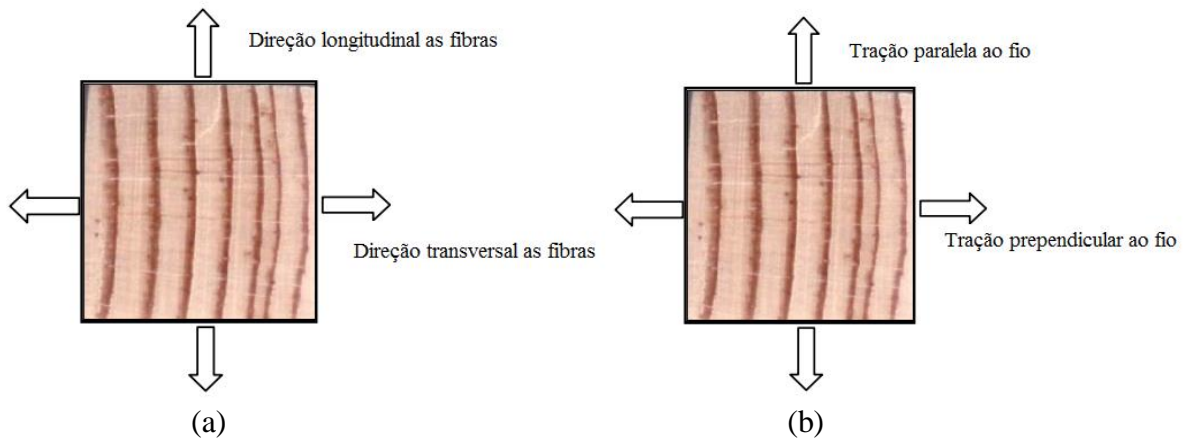


Figura 57- (a) - Direções no desenvolvimento das fibras; (b) - Direções nas fibras quando aplicada uma força.

5.6.1 Castanho na direção longitudinal ao fio

A preparação das amostras da madeira em castanho, identificação e determinação das dimensões, foi efetuada de acordo com a Tabela (6).

Tabela 6- Dimensões dos provetes de castanho na direção longitudinal ao fio

Dimensões dos provetes

	a *, [mm] Espessura média	b *, [mm] Largura média	S0 *, Área da secção inicial da zona útil [mm ²]	L0
CTL2	7,00	28,00	196,00	115,00
CTL3				
CTL4				
CTL5				
CTL6				

Na Figura 58 está representado o desenvolvimento da curva tensão-deformação para os provetes de castanho na direção paralela as fibras. Numa fase inicial observa-se um desenvolvimento constante, chamada zona elástica, que termina aproximadamente a 1,5% de deformação, correspondendo a uma tensão de 10 MPa. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica que normalmente é caracterizado por uma oscilação da carga com

valores muito próximos uns dos outros. Nota-se que este acontecimento não se deu na passagem do estado elástico para o plástico, mas sim repetidamente durante toda a fase plástica. Por fim os provetes rompem entre os 6 a 8% de deformação para uma tensão entre os 30 e 55 MPa. Com exceção do CTL6 que rompe aos 10% de deformação correspondendo a uma tensão de rotura de 60MPa, como se verifica através da Tabela 7. Após análise dos resultados gráficos pode concluir-se que a madeira de castanho na direção longitudinal ao fio tem um comportamento de rotura com alguma ductilidade.

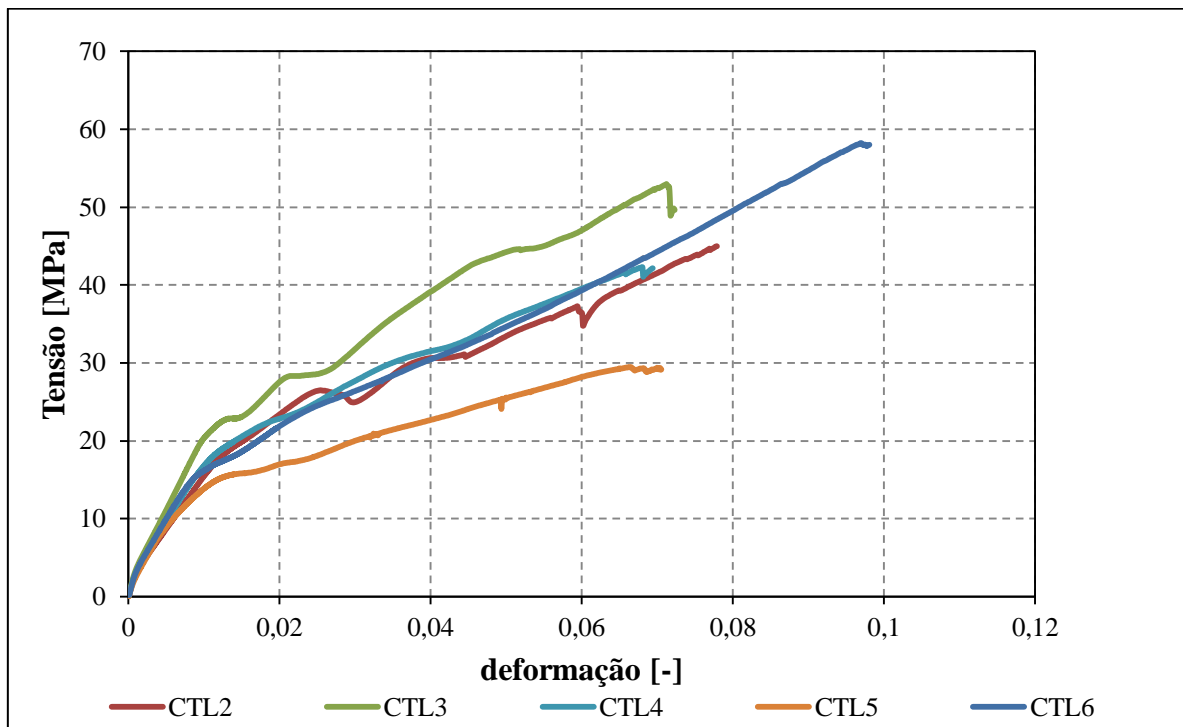


Figura 58 – Curvas tensão-deformação do castanho na direção longitudinal.

Após a realização dos ensaios destrutivos, e confirmando o que teoricamente seria esperado, foram obtidos resultados, em termos de padrões de rotura, semelhantes aos previstos, ver Figura 59.



Figura 59 - Rotura nos provetes de castanho na direção longitudinal ao fio: (CTL2 e CTL3) corte; (CTL4, CTL5 e CTL6) combinação de corte com tração.

Na Tabela 7 apresentam-se os valores obtidos do módulo de elasticidade, tensão de rotura e força máxima obtida.

Tabela 7- Resultados do ensaio

Resultados do ensaio			
	E , Módulo de elasticidade [MPa]	Rm* , Tensão de rotura à tração	Fm * , Força máxima [kN]
CTL2	3068,0	42,0	8,8
CTL3	3562,0	53,0	10,4
CTL4	2961,0	27,0	8,3
CTL5	2539,0	29,5	5,8
CTL6	3086,2	58,2	11,4
Média	3038,4	42,4	9,5
Desvio Padrão	67,6	15,6	1,7

5.6.2 Carvalho na direção longitudinal ao fio

Os provetes de carvalho são tratados de forma análoga aos de castanho, descritos no ponto anterior. A preparação das amostras, nomeadamente identificação e determinação das dimensões são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8- Dimensões dos provetes de carvalho na direção longitudinal ao fio

Dimensões dos provetes				
	a * , [mm] Espessura média	b * , [mm] Largura média	S0 * , Área da secção inicial da zona útil [mm ²]	L0
CVL2	7,00	28,00	196,00	115,00
CVL3				
CVL4				
CVL5				

Na Figura 60 está representado o desenvolvimento da curva tensão-deformação para os provetes de carvalho na direção paralela as fibras. A fase inicial ou zona elástica termina aproximadamente a 2,2% de deformação e correspondendo a uma tensão de 45 MPa. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica, continuando com um desenvolvimento linear. Também não se verificam as oscilações da carga entre a passagem da zona plástica para a zona elástica. Por fim os provetes rompem com valores um pouco distintos uns dos outros, o CVL2 rompe aos 6% de deformação com uma tensão de 100 MPa,

enquanto o CVL3 rompe aos 2% de deformação com uma tensão de 45 MPa, como se verifica através da Tabela 9. Os resultados deste provete CVL3 têm um desvio demasiado elevado em relação os restantes provetes, tendo sido por esse motivo excluído. Por fim o CVL4 e CVL5 rompem a 9% de deformação com uma tensão de 90 MPa. Também a madeira de carvalho e na direção longitudinal ao fio tem um comportamento de rotura com tendência dúctil.

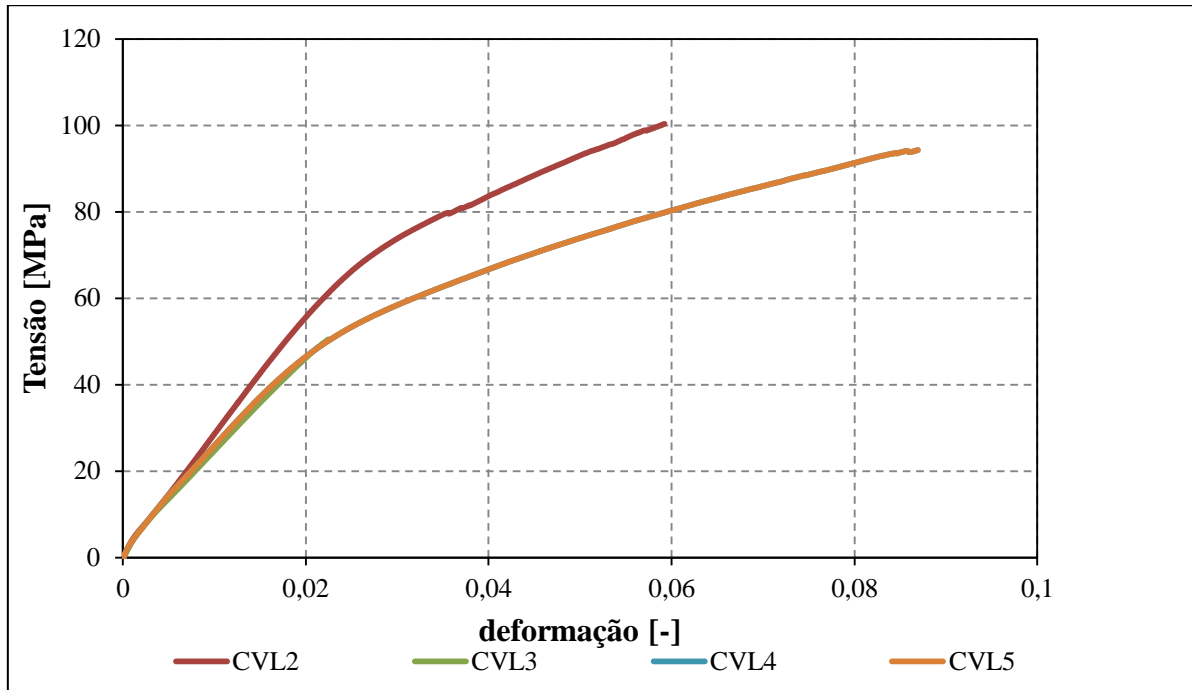


Figura 60- Curvas tensão-deformação do carvalho na direção longitudinal

O modo de rotura, também semelhantes aos previstos, estão apresentados na Figura 61.



Figura 61- Rotura nos provetes de carvalho na direção longitudinal ao fio: (CVL2 e CVL3) combinação de corte com tração; (CVL4, CVL5) corte.

Na (Tabela 9), apresenta-se em resumo os valores obtidos para o módulo de elasticidade, tensão de rotura e força máxima obtida.

Tabela 9- Resultados do ensaio

Resultados do ensaio			
	E , Módulo de elasticidade [MPa]	Rm* , Tensão de rotura à tração	Fm * , Força máxima [kN]
CVL2	4141,0	100,4	19,7
CVL3	3616,8	50,5	9,9
CVL4	4167,2	94,3	18,5
CVL5	4196,9	94,3	18,5
Média	3984,9	81,7	16,0
Desvio Padrão	27,9	3,5	0,7

5.6.3 Castanho na direção perpendicular ao fio

A Tabela 10 representa a identificação e as dimensões, dos provetes considerados para os ensaios do castanho na direção perpendicular ao fio

Tabela 10- Dimensões dos provetes de castanho na direção transversal ao fio

Dimensões dos provetes				
	a * , [mm] Espessura média	b * , [mm] Largura média	S0 * , Área da secção inicial da zona útil [mm ²]	L0
CTT2	7,00	38,00	266,00	95,00
CTT3				
CTT4				
CTT5				
CTT6				

Na Figura 62 encontra-se representado o desenvolvimento da curva tensão-deformação para os provetes de castanho na direção perpendicular às fibras. A rotura aconteceu perto dos 2% de deformação e com uma tensão entre os 4 e os 5,5 MPa no geral, com exceção do CTT3 que rompeu aos 3% para uma tensão 7 MPa. Após a análise do gráfico pode concluir-se que a madeira de castanho na direção perpendicular ao fio tem um comportamento de rotura frágil.

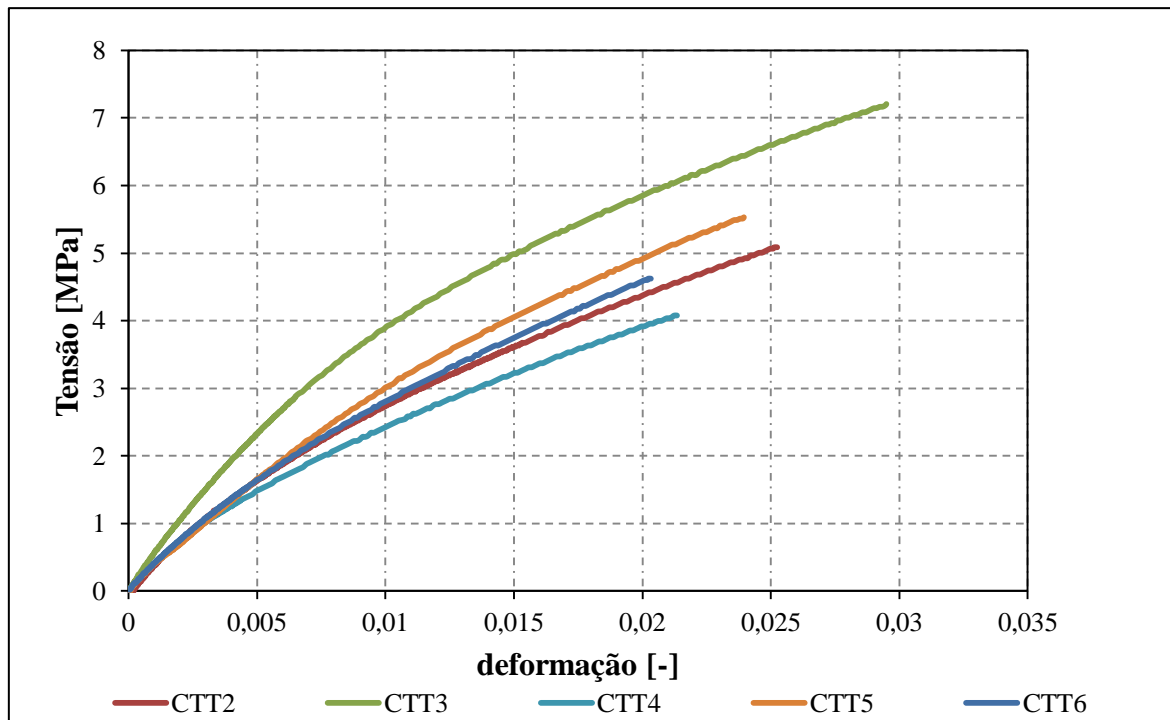


Figura 62- Curvas tensão-deformação do castanho na direção transversal

De uma forma genérica podemos afirmar que a rotura do lenho em tração paralela ao fio, apresenta diferentes padrões, Figura 15. Após a realização dos ensaios destrutivos, foram obtidos resultados, em termos de rotura, ver Figura 63.

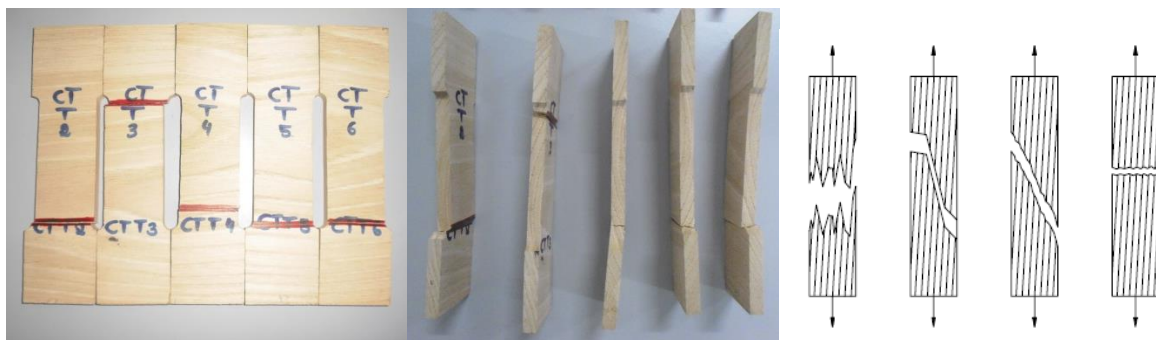


Figura 63- Rotura nos provetes de castanho na direção perpendicular ao fio: Todos os provetes têm uma rotura por lascamento.

Em baixo apresentam-se os resultados obtidos (Tabela 11), em termos de módulo de elasticidade, tensão de rotura e força máxima.

Tabela 11 – Resultados do ensaio

Resultados do ensaio			
	E , Módulo de elasticidade [MPa]	Rm* , Tensão de rotura à tração	Fm * , Força máxima [kN]
CTT2	370	5,09	1,35
CTT3	552	7,21	1,92
CTT4	448	4,08	1,08
CTT5	402	5,53	1,47
CTT6	411	4,62	1,23
Média	407,8	4,8	1,3
Desvio Padrão	39,0	0,5	0,1

5.6.4 Carvalho na direção perpendicular ao fio

Na tabela 12 representam-se as características dimensionais dos provetes de carvalho na direção perpendicular ao fio.

Tabela 12- Dimensões dos provetes de carvalho na direção perpendicular ao fio

Dimensões dos provetes				
	a * , [mm] Espessura média	b * , [mm] Largura média	S0 * , Área da secção inicial da zona útil [mm ²]	L0
CVT2	7,00	38,00	266,00	95,00
CVT3				
CVT4				
CVT5				
CVT6				

Na Figura 64 está representado o desenvolvimento tensão-deformação para os provetes de carvalho na direção perpendicular às fibras. O que se verifica neste gráfico é o mesmo que aconteceu com a madeira de castanho na direção perpendicular às fibras. A rotura aconteceu entre 1,5 e o 2,3% para uma tensão entre 10 a 12 MPa. Depois da análise do gráfico pode concluir-se que a madeira de carvalho na direção perpendicular ao fio tem um comportamento de rotura frágil.

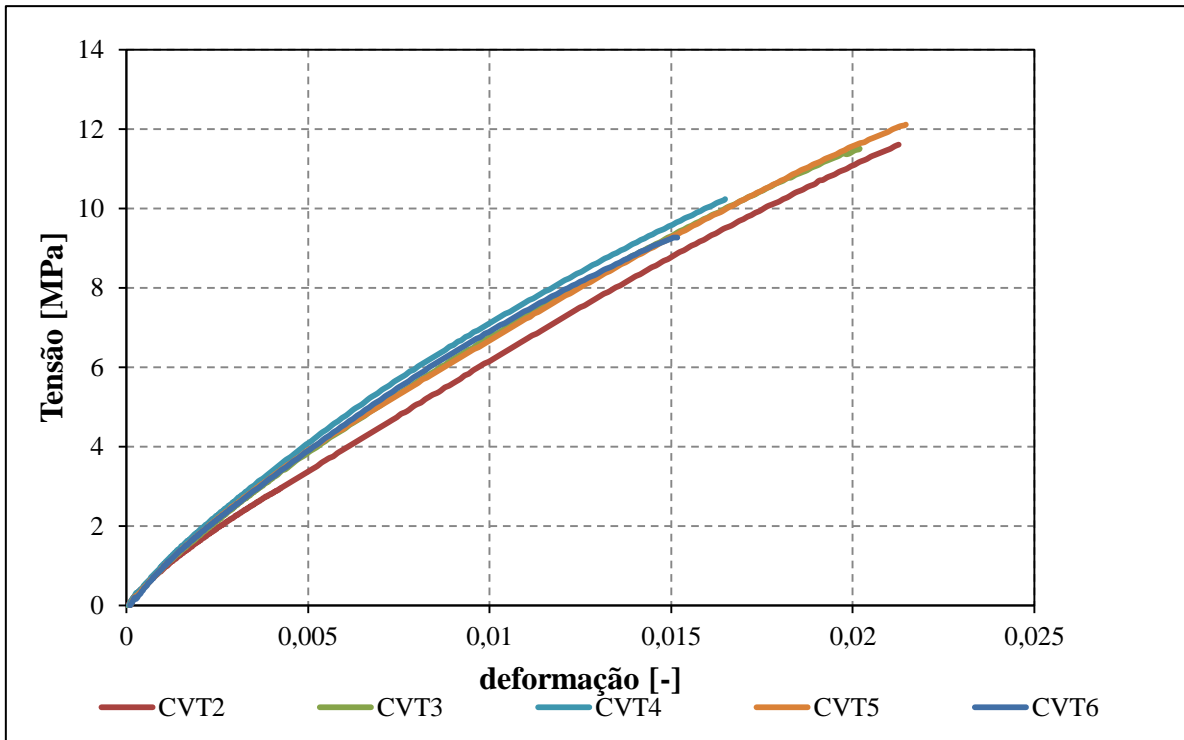


Figura 64- Tensão de formação do carvalho na direção transversal

De uma forma genérica podemos afirmar que a rotura do lenho em tração paralela ao fio, apresenta diferentes padrões, Figura 15. Após a realização dos ensaios destrutivos, e confirmando o que teoricamente seria previsto, foram obtidos resultados, em termos de rotura, ver Figura 64.



Figura 65- Rotura nos provetes de carvalho na direção perpendicular ao fio: Todos os provetes têm uma rotura por lascamento.

Os resultados finais são obtidos (Tabela 13), em termos de módulo de elasticidade, tensão de rotura à tração e força máxima.

Tabela 13- Resultados do ensaio

Resultados do ensaio			
	E , Módulo de elasticidade [MPa]	Rm* , Tensão de rotura à tração	Fm * , Força máxima [kN]
CVT2	905,0	11,6	3,1
CVT3	922,0	11,6	3,1
CVT4	1009,0	10,2	2,7
CVT5	935,0	12,1	3,2
CVT6	926,0	9,3	2,5
Média	939,4	11,4	3,0
Desvio Padrão	40,4	1,2	0,3

5.7 Análise dos Ensaios Destrutivos

Conforme se observa através do módulo de elasticidade na Figura 66 os valores obtidos na direção longitudinal encontram-se abaixo de alguns dos valores de referência para outras espécies de carvalho e castanho. A norma [25] propõe valores entre os 10000-20000 MPa para as madeiras folhosas. O mesmo é referido por [26], que classificou o castanho com 11000 MPa e o carvalho com 6100 MPa. Outra referência [20] apresenta valores para o castanho com 10300 MPa e o carvalho com 9040 MPa. Ainda na madeira de castanho, foram encontrados alguns ensaios realizados por [27] que apresentam um valor de módulo de elasticidade de 9734 MPa. Também [28] aponta 12300 MPa para o valor do módulo de elasticidade. Na direção transversal os valores também são baixo, sendo apontado pela norma [25] 6400MPa como o valor mais baixo para a madeira das folhosas para direção perpendicular, contudo nesta direção encontra-se poucos estudos no sentido que apresenta uma resistência muito baixa.

A divergência entre os ensaios realizados e a bibliográfica consultada pode acontecer devido a uma série de fatores que afetam as características da madeira tais como: teor de humidade, massa volúmica, temperatura, duração da carga e corte da madeira.

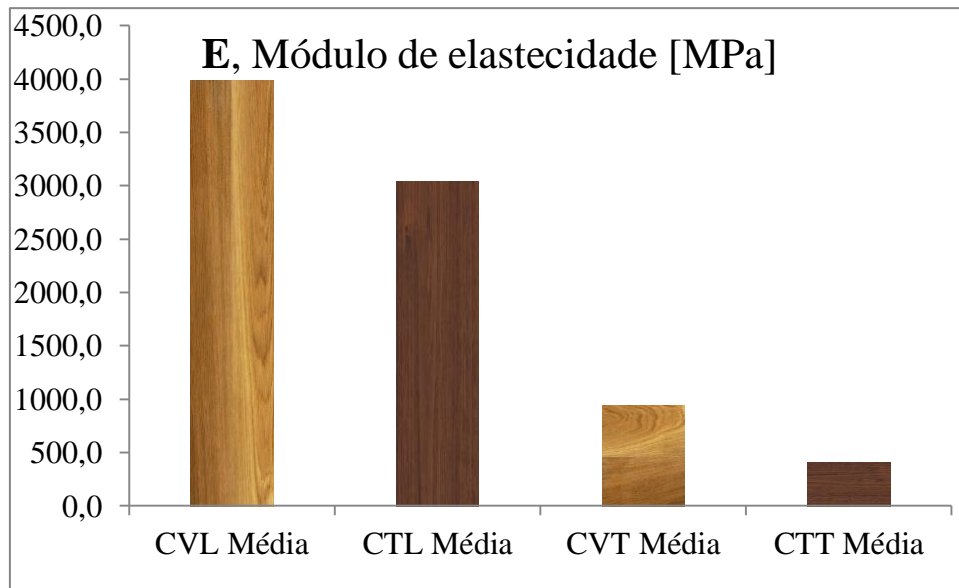


Figura 66- Médias dos valores do módulo de elasticidade registadas em ensaio.

- As características físicas e mecânicas da madeira variam regularmente a partir do centro geométrico do tronco para a periferia, seguindo um padrão razoavelmente caracterizado e confirmado em muitos dos ensaios realizados [29].
- Deverá ser sempre evitada a zona de lenho juvenil (até cerca da quinta camada de crescimento), mas também as duas ou três últimas camadas do lenho (borne exterior) [29] (Figura 67 (a)) no caso das folhosas. Tendo como justificação que regra geral, quanto maior a taxa de crescimento (maior largura das camadas anuais), menor é a textura, pois é normal que nos maiores crescimentos, a camada de lenho inicial (cor mais clara e menor densidade) seja mais larga em comparação com a camada de lenho final (mais escura e mais densa) (Figura 67 (b)). Sendo isto comprovado pelo autor (Santos, 2007) com uma série de ensaios e onde conclui que a madeira do lenho juvenil possui um valor inferior a 2 GPa (módulo de elasticidade) em relação à madeira com mais idade ou seja referente a camadas mais exteriores. Esta baixa capacidade resistente nas folhosas é explicada de forma contrária, existindo fracas ligações intercelulares e crescimentos mais lentos, que significam densidades mais elevadas; nas folhosas verifica-se o contrario devido as porosidades entre cada anel (Figura 67 (c)).

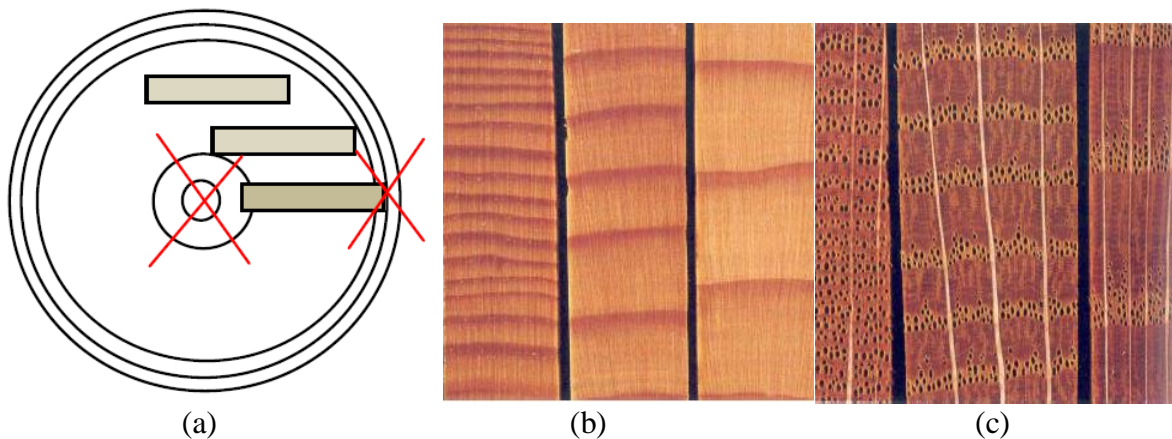


Figura 67- (a) - Zonas que não se deve retirar amostra; (b) - Amostras de madeiras resinosas, (c) - amostra de madeiras folhosas

- Também a máquina de ensaios utilizada tem uma célula de carga que atinge valores de 200kN, sendo considerada demasiado elevada para este tipo de ensaios.
- Um dos fatores que tem mais influência nas propriedades físicas e mecânicas da madeira é a humidade [30] . De acordo com a norma [19] os provetes deveriam ser colocados na camara húmida a uma temperatura de 20°C e com uma humidade relativa do ar a rondar os 65%, para atingirem um teor de humidade de 12%. Isto não se verificou, apesar da temperatura estar dentro do desejável, a humidade do ar rondava os 90%. Foi comprovado por [30] com ensaios de tração paralela à fibra que quanto maior o teor de humidade, menor seria o valor do módulo de elasticidade.

Analisando os resultados da Figura 68 em relação à tensão de rotura à tração, os valores obtidos comparados com as referências bibliográficas [20], encontram-se dentro dos parâmetros desejáveis.

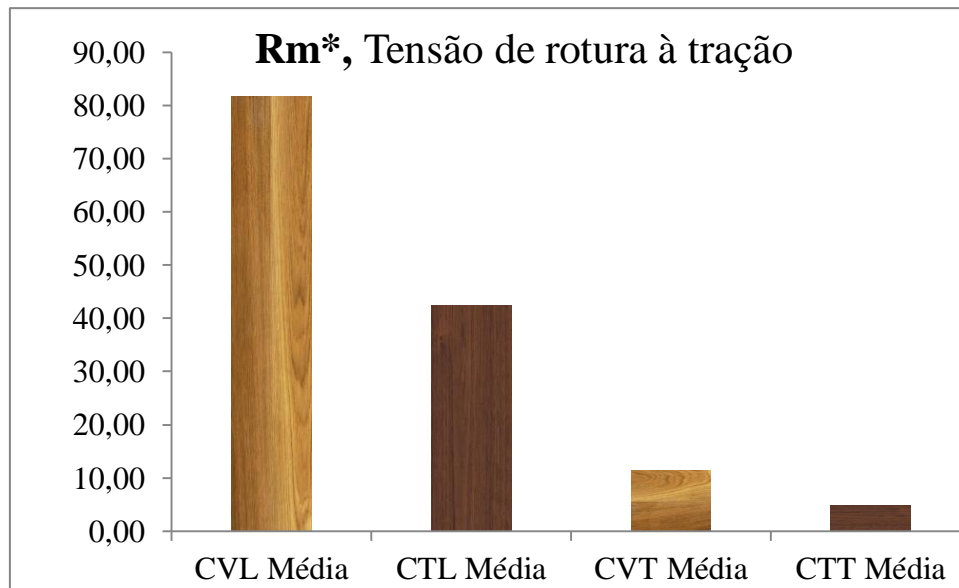


Figura 68- Valores obtidos nos ensaios para a tensão de rotura

5.8 Resultados dos Ensaios com aplicação de extensómetros

O objetivo destes ensaios foi calcular o coeficiente de Poisson (Tabela 14). Este coeficiente pode ser entendido como uma relação entre a deformação lateral e a deformação axial no provete com carga axial.

Tabela 14- Coeficiente de Poisson

Coeficiente de Poisson, ν	
CTL	0,35
CVL	0,16
CTT	ND
CVT	ND

Na bibliográfica consultada é referido [29] que o coeficiente de Poisson para a madeira de carvalho estará compreendido entre os 0,20 e os 0,45 e para a madeira de castanho o coeficiente está entre 0,15 e 0,40. Também foi referido no livro publicado por [26] que o coeficiente de Poisson do carvalho na direção longitudinal é de 0,43, não fazendo referência ao castanho, mas à gama das madeiras folhosas que anda na ordem dos 0,37-0,64. Por fim [20] apresenta um coeficiente para o carvalho entre 0,17-0,61 e para o castanho 0,37-0,55. Quanto a direção transversal [26] refere que os valores são praticamente nulos ou não são possíveis de registar (ND).

Comparando os valores dos ensaios com a bibliografia consultada, conclui-se que o coeficiente de Poisson na direção longitudinal registou valores aceitáveis. No caso da direção transversal e pelo facto da carga estar a ser aplicada na perpendicular à direção das fibras, a

deformação longitudinal é quase nula comparada com a outra direção. Quando aplicada a força nestes provetes, a rotura é quase imediata, sendo que para o coeficiente de Poisson não há registos significativos de valores.

Capítulo 6

Conclusões e futuros desenvolvimentos

6.1 Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

O principal objetivo deste trabalho foi a elaboração de um programa experimental de ensaios para uma análise crítica ao comportamento da madeira de carvalho e castanho, na presença de água e posterior avaliação mecânica.

No geral, os provetes de castanho revelaram variações dimensionais, teor em água e massa volúmica de ordem de grandeza superior às do carvalho, contudo é necessário lembrar que a anisotropia é um facto de grande influência no estudo do comportamento da madeira e nada garante que, perante outras amostras, os resultados sejam rigorosamente iguais aos obtidos na fase experimental desta dissertação. Observações a tirar, nos dois primeiros ciclos os valores são muito idênticos dentro de cada espécie de madeira, o mesmo já não acontece com a comparação dos dois primeiros com o terceiro ciclo, existindo neste último algumas variações significativas, em alguns casos verificam-se ganhos e noutros perdas, mas nada de grande relevância. Como seria de esperar a variação dimensional segundo a direção tangencial é sempre superior em relação à direção radial, que por sua vez é superior na direção longitudinal, os coeficientes de variação dimensional, linear e volumétrica, traduzem isso mesmo.

Foi bem claro ao longo de todas as fases experimentais, que cada tipo de madeira estabiliza ao seu respetivo teor de água de equilíbrio e que as movimentações dimensionais são uma das ferramentas que a madeira usa para obter o equilíbrio com o meio envolvente.

Nos ensaios à tração para determinação das propriedades mecânicas dos provetes em madeira, verificaram-se resultados baixos do módulo de elasticidade, o que se justificou pela elevada humidade relativa dos provetes. A teoria da elasticidade pressupõe que um corpo submetido a um estado de deformação por aplicação de forças externas, recupere totalmente a sua forma e geometria após remoção desse carregamento. Os provetes foram ensaiados com um teor de humidade superior aos 12% recomendados. Esta elevada humidade pode ter afetado as ligações intercelulares existentes. Contudo os resultados da resistência à tração e o coeficiente de Poisson relativo aos provetes na direção longitudinal à fibra das duas madeiras encontram-se dentro dos parâmetros aceitáveis. Na direção perpendicular à fibra, nos provetes de castanho e carvalho não houve registo do coeficiente de Poisson, o que leva a concluir, que nesta direção esta propriedade não é mensurável pela não deformabilidade da mesma. Esta observação é também concluída por outros autores em que os valores obtidos podem ser próximos de zero ou não mensuráveis.

Do trabalho experimental elaborado conclui-se que a madeira de carvalho apresenta melhor comportamento considerando como características, a massa volúmica, a variação dimensional e o teor de água, quando comparado com a madeira de castanho. Ambas as madeiras, tendem a melhorar o seu comportamento na presença de humidade, isto no caso de se aumentarem o número de ciclos, ou seja, o seu comportamento estabiliza com o envelhecimento da madeira. Os valores obtidos nos resultados à tração seguem a mesma tendência com os resultados da massa volúmica, variação dimensional e teor de água, onde se constatou que o carvalho obteve maior tensão de rotura, força máxima aplicada e módulo de elasticidade.

Feita a análise global dos resultados, a madeira de carvalho é mais adequada quando aplicada em exteriores estando em contato com as diversidades do meio ambiente. Em situação de carga mecânica o carvalho apresenta também o melhor desempenho.

6.2 Futuros desenvolvimentos

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se algumas sugestões tendo como objetivo, futuros desenvolvimentos nesta área de investigação.

- Realizar ensaios com diferentes teores de humidade e temperatura, fazendo uma comparação com os valores padrão mencionados na norma [19];
- Realizar ensaios à tração em provetes com humidade relativa mais baixa;
- Realizar uma comparação física e mecânica entre amostras tiradas do cerne e do borne da madeira, e em várias direções;
- Realizar um estudo das diferenças de velocidade de perda e absorção de água nas diferentes direções da madeira.
- Realizar ensaios de tração com diferentes valores para a taxa de alongamento.

7 Bibliografia

- [1] F. n. d. a. d. b. florestal, “Aplicação da madeira na construção civil,” *artico tecnico n° 24*, Agosto 2004.
- [2] “Instituto Nacional de Estatística,” 2012. [Online]. Available: www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=134293661&att_display=n&att_download=y. [Acedido em 13 Maio 2013].
- [3] C. Machado e J. Bento, “Plano Regional de Ordenamento Florestal do Nordeste,” 2006.
- [4] J. Júnior, “Avaliação Não Destrutiva da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira de Edifícios Antigos,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [5] J. Coutinho, “Madeiras,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [6] N. Machado, “Variação Dimensional da Madeira Devido ao seu Comportamento Higroscópico,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [7] A. Carvalho, Lisboa: Madeiras Portuguesas. Estruturas anatómica. Propriedades. Utilizações.- Vol.I, 1996.
- [8] J. Silva, “Comportamento Mecânico dde Madeira de Carvalho Português,” Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2011.
- [9] A. Carvalho, Lisboa: Madeiras Portuguesas- Vol.II, 1997.
- [10] C. M. e. C. d. M. Tudo sobre Casas Pré-Fabricadas. [Online]. [Acedido em 12 Novembro 2012].
- [11] A. Ganhão, “Construção Sustentável - Propostas de melhoria da eficincia energetica em edifícios de habitação,” Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [12] N. Lopes, “Reabilitação de Caixilharias de Madeiras em Edifícios do Século XIX e Início do Século XX,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [13] P. Cachim, *Construções em Madeira - A Madeira como Material de Construção*, Porto: Publindustria, 2007.
- [14] S. Franco, “Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual In Site,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [15] G. Dalcin, “Ensaio dos Materiais,” Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e da Missões, Santo Ângelo, 2007.
- [16] *NP 614*, Instituto Português da Qualidade, 1973.
- [17] *NP 615*, Instituto Português da Qualidade, 1973.

- [18] *NP 616*, Instituto Português da Qualidade, 1973.
- [19] *NBR 7190*, Técnicas, ABNT-Associação Brasileira de Normas, 1997.
- [20] J. Martins, “Bases para o Projecto de Conservação, Restauro e Reabilitação de Edifícios Antigos,” Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.
- [21] D. Ferreira, C. Pinto, P. Borges e E. Fonseca, “Dimensional Stability of Wood in Presence of Water, Proceedings of IRF 2013,” em *4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure*, Madeira, 2013.
- [22] J. Costa, “Influência da Água no Comportamento de Madeiras Resinosas,” Universidade do Minho, 2011.
- [23] R. Sousa, “Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho Bravo e Madeira Tratada Termicamente,” Universidade do Minho, 2012.
- [24] J. Prim, Piovesan e Angela, “Estudo sobre as Propriedades de duas Espécies de Madeiras Utilizadas na Construção Civil,” *Unoesc & Ciência - ACET*, 2011.
- [25] *NP EN338*, Lisboa: IPQ, 2003.
- [26] D. Green, J. Winandy e D. Kretschmann, *Wood Handbook- Mechanical Properties of Wood*, Forest Products Laboratory, 1999.
- [27] P. Brites, J. Machado e P. Lourenço, “Avaliação das propriedades mecânicas da madeira in situ de mesoprovetes,” *Revista da associação Portuguesa da avaliação experimental de tensões*, 2012.
- [28] A. Feio, J. Machado e P. Lourenço, “Caracterização da resistência da madeira de Castanho à tração paralela ao fio”.
- [29] J. Santos, “Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira,” Universidade do Minho, Guimarães, 2007.
- [30] N. Logsdon, Z. Finger e C. Borges, “Caracterização físico-mecânica da madeira de *Peroba-Mica*, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (APOCYNACEAE),” 22 Maio 2006.
- [31] “Madeira Estrutural- Estruturas de Madeira,” [Online]. Available: <http://madeiraestrutural.wordpress.com>. [Acedido em 14 Novembro 2013].
- [32] J. Davim e A. Magalhães, *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*, Aveiro: Estante Editora, 1992.
- [33] A. Daga. [Online]. Available: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABQIcAK/deformacao>. [Acedido em 14 Outubro 2013].
- [34] C. d. c. e. Industria, “Associação Empresarial de Portugal,” Março 2008. [Online]. Available: [http://aep.org.pt/docs/aep-estudos/sector-florestal-\(mar%C3%A7o-2008\).pdf?sfvrsn=4](http://aep.org.pt/docs/aep-estudos/sector-florestal-(mar%C3%A7o-2008).pdf?sfvrsn=4). [Acedido em

18 Julho 2013].

Anexos

Anexo 1- Classes de resistência – valores característicos [25]

	Apenas choupou e resinosas										Apenas folhosas						
	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40		D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Propriedades de resistência em N/mm²																	
Propriedades de resistência em flexão																	
Tracção axial	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40	30	35	40	50	60	70	
	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24	18	21	24	30	36	42	
	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9	
	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26	23	25	26	29	32	34	
	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5	
	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0	
Propriedade de rigidez em kN/mm²																	
Propriedade de rigidez em módulo médio elasticidade axial	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14							
	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10	10	11	14	17	20	
	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33	
	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25	
Massa volumica em kg/m³																	
Massa volumica	ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420	530	560	590	650	700	900	
Massa volumica média	ρ_{mean}	350	370	380	410	420	450	460	480	500	640	670	700	780	840	1080	

Anexo 2- Classes de resistência – valores caraterísticos [26]

Table 4-3a. Strength properties of some commercially important woods grown in the United States (metric)^a

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load ^d (kJ/m ³)						
Hardwoods											
Alder, red	Green	0.37	45,000	8,100	55	560	20,400	1,700	5,300	2,700	2,000
	12%	0.41	68,000	9,500	58	510	40,100	3,000	7,400	2,900	2,600
Ash											
Black	Green	0.45	41,000	7,200	83	840	15,900	2,400	5,900	3,400	2,300
	12%	0.49	87,000	11,000	103	890	41,200	5,200	10,800	4,800	3,800
Blue	Green	0.53	66,000	8,500	101	—	24,800	5,600	10,600	—	—
	12%	0.58	95,000	9,700	99	—	48,100	9,800	14,000	—	—
Green	Green	0.53	66,000	9,700	81	890	29,000	5,000	8,700	4,100	3,900
	12%	0.56	97,000	11,400	92	810	48,800	9,000	13,200	4,800	5,300
Oregon	Green	0.50	52,000	7,800	84	990	24,200	3,700	8,200	4,100	3,500
	12%	0.55	88,000	9,400	99	840	41,600	8,600	12,300	5,000	5,200
White	Green	0.55	66,000	9,900	108	970	27,500	4,600	9,300	4,100	4,300
	12%	0.60	103,000	12,000	115	1,090	51,100	8,000	13,200	6,500	5,900
Aspen											
Bigtooth	Green	0.36	37,000	7,700	39	—	17,200	1,400	5,000	—	—
	12%	0.39	63,000	9,900	53	—	36,500	3,100	7,400	—	—
Quaking	Green	0.35	35,000	5,900	44	560	14,800	1,200	4,600	1,600	1,300
	12%	0.38	58,000	8,100	52	530	29,300	2,600	5,900	1,800	1,600
Basswood, American	Green	0.32	34,000	7,200	37	410	15,300	1,200	4,100	1,900	1,100
	12%	0.37	60,000	10,100	50	410	32,600	2,600	6,800	2,400	1,800
Beech, American	Green	0.56	59,000	9,500	82	1,090	24,500	3,700	8,900	5,000	3,800
	12%	0.64	103,000	11,900	104	1,040	50,300	7,000	13,900	7,000	5,800
Birch											
Paper	Green	0.48	44,000	8,100	112	1,240	16,300	1,900	5,800	2,600	2,500
	12%	0.55	85,000	11,000	110	860	39,200	4,100	8,300	—	4,000
Sweet	Green	0.60	65,000	11,400	108	1,220	25,800	3,200	8,500	3,000	4,300
	12%	0.65	117,000	15,000	124	1,190	58,900	7,400	15,400	6,600	6,500
Yellow	Green	0.55	57,000	10,300	111	1,220	23,300	3,000	7,700	3,000	3,600
	12%	0.62	114,000	13,900	143	1,400	56,300	6,700	13,000	6,300	5,600
Butternut	Green	0.36	37,000	6,700	57	610	16,700	1,500	5,200	3,000	1,700
	12%	0.38	56,000	8,100	57	610	36,200	3,200	8,100	3,000	2,200
Cherry, black	Green	0.47	55,000	9,000	88	840	24,400	2,500	7,800	3,900	2,900
	12%	0.50	85,000	10,300	79	740	49,000	4,800	11,700	3,900	4,200
Chestnut, American	Green	0.40	39,000	6,400	48	610	17,000	2,100	5,500	3,000	1,900
	12%	0.43	59,000	8,500	45	480	36,700	4,300	7,400	3,200	2,400
Cottonwood											
Balsam poplar	Green	0.31	27,000	5,200	29	—	11,700	1,000	3,400	—	—
	12%	0.34	47,000	7,600	34	—	27,700	2,100	5,400	—	—

Anexo 2 - Classes de resistência – valores característicos [26]

Table 4-3a. Strength properties of some commercially important woods grown in the United States (metric)^a—con.

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Com-pression		Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)		parallel to grain (kPa)	perpendicular to grain (kPa)			
Hickory, pecan											
Bitternut	Green	0.60	71,000	9,700	138	1,680	31,500	5,500	8,500	—	
	12%	0.66	118,000	12,300	125	1,680	62,300	11,600	—	—	
Nutmeg	Green	0.56	63,000	8,900	157	1,370	27,400	5,200	7,100	—	
	12%	0.60	114,000	11,700	173	—	47,600	10,800	—	—	
Pecan	Green	0.60	68,000	9,400	101	1,350	27,500	5,400	10,200	4,700	
	12%	0.66	94,000	11,900	95	1,120	54,100	11,900	14,300	—	
Water	Green	0.61	74,000	10,800	130	1,420	32,100	6,100	9,900	—	
	12%	0.62	123,000	13,900	133	1,350	59,300	10,700	—	—	
Hickory, true											
Mockernut	Green	0.64	77,000	10,800	180	2,240	30,900	5,600	8,800	—	
	12%	0.72	132,000	15,300	156	1,960	61,600	11,900	12,000	—	
Pignut	Green	0.66	81,000	11,400	219	2,260	33,200	6,300	9,400	—	
	12%	0.75	139,000	15,600	210	1,880	63,400	13,700	14,800	—	
Shagbark	Green	0.64	76,000	10,800	163	1,880	31,600	5,800	10,500	—	
	12%	0.72	139,000	14,900	178	1,700	63,500	12,100	16,800	—	
Shellbark	Green	0.62	72,000	9,200	206	2,640	27,000	5,600	8,200	—	
	12%	0.69	125,000	13,000	163	2,240	55,200	12,400	14,500	—	
Honeylocust	Green	0.60	70,000	8,900	87	1,190	30,500	7,900	11,400	6,400	
	12%	—	101,000	11,200	92	1,190	51,700	12,700	15,500	6,200	
Locust, black	Green	0.66	95,000	12,800	106	1,120	46,900	8,000	12,100	5,300	
	12%	0.69	134,000	14,100	127	1,450	70,200	12,600	17,100	4,400	
Magnolia											
Cucumber tree	Green	0.44	51,000	10,800	69	760	21,600	2,300	6,800	3,000	
	12%	0.48	85,000	12,500	84	890	43,500	3,900	9,200	4,600	
Southern	Green	0.46	47,000	7,700	106	1,370	18,600	3,200	7,200	4,200	
	12%	0.50	77,000	9,700	88	740	37,600	5,900	10,500	5,100	
Maple											
Bigleaf	Green	0.44	51,000	7,600	60	580	22,300	3,100	7,700	4,100	
	12%	0.48	74,000	10,000	54	710	41,000	5,200	11,900	3,700	
Black	Green	0.52	54,000	9,200	88	1,220	22,500	4,100	7,800	5,000	
	12%	0.57	92,000	11,200	86	1,020	46,100	7,000	12,500	4,600	
Red	Green	0.49	53,000	9,600	79	810	22,600	2,800	7,900	—	
	12%	0.54	92,000	11,300	86	810	45,100	6,900	12,800	—	
Silver	Green	0.44	40,000	6,500	76	740	17,200	2,600	7,200	3,900	
	12%	0.47	61,000	7,900	57	640	36,000	5,100	10,200	3,400	
Sugar	Green	0.56	65,000	10,700	92	1,020	27,700	4,400	10,100	—	
	12%	0.63	109,000	12,600	114	990	54,000	10,100	16,100	—	
Oak, red	Green	0.56	57,000	8,100	84	1,020	23,900	4,900	8,400	—	
Black	12%	0.61	96,000	11,300	94	1,040	45,000	6,400	13,200	—	