

ESTABILIDADE DIMENSIONAL DAS MADEIRAS DE PINHO, FREIXO, CASTANHO E CARVALHO NA PRESENÇA DE ÁGUA

DIMENSIONAL STABILITY OF PINE, ASH, CHESTNUT AND OAK IN THE PRESENCE OF WATER

D. R. S. M. Ferreira¹, E. M. M. Fonseca¹, C. D. P. Pinto¹, P. C. B. Borges¹

¹ Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança



RESUMO

As estruturas de madeira apresentam-se como uma solução competitiva face às estruturas de aço e betão, exibindo características e vantagens que superam largamente as suas concorrentes: relação peso/resistência superior, rapidez de montagem, resistência ao fogo, excelente desempenho sísmico, beleza estética natural, e racionalismo ecológico conduzindo a uma construção sustentável. Um dos objetivos do presente trabalho experimental foi o de compreender a relação da madeira com a água em quatro espécies diferentes de madeira: Pinho, Freixo, Castanho e Carvalho. Apresenta-se um estudo sobre a estabilidade dimensional da madeira, atendendo aos fenómenos de retração e inchamento, assente na realização de diversos ensaios experimentais. Os provetes analisados, com uma forma prismática de dimensão igual a 40×40×10 mm, foram obtidos a partir de madeira sã e isenta de nós, fendas ou outros defeitos. O comportamento mecânico das diferentes madeiras foi igualmente avaliado através de ensaios à tração para comparação e determinação das suas características mecânicas.

ABSTRACT

Timber structures are a competitive solution when compared to steel and concrete structures, showing features and advantages that overcome their competitors: weight/strength ratio, rapid assembly, fire resistance and excellent performance in earthquake scenario, natural aesthetic attractiveness, and ecological rationality which leads to sustainable construction. The main purpose of this experimental study is to understand the relationship between timber and water in four different wood species: Pine, Ash, Chestnut and Oak. Experimental tests were carried out in order to assess shrinkage and swelling behaviours. The analysed specimens have a prismatic shape with dimensions equal to 40×40×10 mm, and were obtained from healthy wood, free of knots, cracks or other defects. The timber mechanical behaviour timber was also evaluated by tensile tests to obtain the mechanical characteristics and comparison with other woods.

1. INTRODUÇÃO

Durante vários séculos a madeira foi utilizada nas construções em todo o mundo, a sua aplicabilidade foi evoluindo, e os tratamentos para aumentar a sua resistência desenvolveram-se com o avanço tecnológico

e industrial. A constante evolução e a durabilidade apresentada pela madeira podem ser observadas na maioria das construções antigas. Nas primeiras décadas do século XX, com o aparecimento do betão e do aço, a construção em madeira foi temporariamente

secundarizada. Essa tendência tem vindo a alterar-se principalmente em obras de reabilitação da construção. A madeira apresenta-se como uma solução competitiva face às estruturas de aço e betão, além de apresentar vantagens e características que superam largamente as suas concorrentes: relação peso/resistência, rapidez de montagem, resistência ao fogo, excelente desempenho sísmico, aspeto estético natural, sendo ainda um material ecológico o que conduz a uma construção sustentável. A madeira é uma matéria-prima importante e um recurso natural renovável. Através de uma utilização cuidadosa, responsável e planeada, as florestas podem fornecer madeira de forma permanente.

Toda a madeira de árvores contém uma quantidade considerável de água, genericamente designada de seiva. A função primordial da água é a de circular pelos tecidos da planta conduzindo os nutrientes minerais para as folhas e preenchendo os vazios intercelulares. A água apresenta-se, na madeira, de três formas: água de constituição, água livre e água impregnada. O estudo da sua presença dentro do tronco da árvore é indispensável dado que a variação do teor em água na madeira influencia o seu comportamento e as suas propriedades.

No processo de secagem da madeira, a perda de água livre é a que ocorre em primeiro lugar, não induzindo qualquer alteração quer nas dimensões quer nas propriedades físicas e mecânicas. Quando toda a água livre desaparece, as paredes celulares mantêm-se saturadas ocorrendo uma diminuição drástica do teor em água até se atingir o Teor de Saturação da Fibra (TSF). Em termos práticos, este teor de saturação é geralmente considerado compreendido entre 25% e 30%, em função das espécies de madeira (Simpson, 1999). A madeira é dimensionalmente estável quando o teor em água é superior ao TSF. Para teores de água inferiores ao TSF, as dimensões da madeira alteram-se podendo ocorrer perda de humidade (retração) ou ganho de humidade (inchamento). Os fenómenos de retração e inchamento estão na base de muitos problemas que podem ocorrer na madeira,

tanto durante a secagem como na sua utilização, pelo que um conhecimento profundo deste comportamento ajudará a sua minimização (White, 1999). Considera-se que a madeira está protegida de possíveis ataques por parte de fungos e bactérias para um teor de água inferior a 20%, por ser o valor mínimo acima do qual normalmente ocorre a propagação e o ataque.

O escasso conhecimento do comportamento da madeira dificulta a sua utilização em projeto. O conhecimento das características e propriedades bem como dos fatores que influenciam os comportamentos físicos e mecânicos poderá ajudar a inverter esta tendência. No âmbito do presente trabalho foram conduzidos diferentes ensaios em laboratório para verificação e comparação dessas propriedades. Os ensaios experimentais foram divididos em dois grupos: estudo da variação dimensional na presença de água e avaliação do comportamento mecânico para quatro espécies de madeira provenientes do Nordeste Transmontano: Pinho Bravo (*Pinus pinaster*), Freixo (*Fraxinus*), Castanheiro (*Castanea sativa miller*) e Carvalho Negral (*Quercus pyrenaica*).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Variação dimensional da madeira na presença de água

Foram conduzidos diversos ensaios para o estudo da estabilidade dimensional, atendendo aos fenómenos de retração e inchamento da madeira. Esta instabilidade constitui um dos mais graves defeitos da madeira, que sendo um material anisótropo e heterogéneo não apresenta os mesmos valores de retração e de inchamento segundo as três direções principais: longitudinal, radial e tangencial (LNEC, 1997). A determinação do teor em água e da massa volúmica foi efetuada em conformidade com as normas do LNEC (NP 614, NP 615, 1973) respetivamente. Os provetes analisados foram obtidos a partir de madeira sã e isenta de nós, fendas ou outros defeitos, com forma prismática e de dimensão igual a 40×40×10 mm, Fig. 1, num total de 30 provetes de cada espécie de

madeira. Antes de dar início aos ensaios, metade dos provetes de cada espécie foram secos num forno a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, Fig. 2, enquanto os restantes provetes foram saturados num tanque com água, Fig. 3, até se atingir uma massa constante. A massa é considerada constante quando a diferença entre duas medições consecutivas, num intervalo de 2 horas, é inferior a 0,5%.



Fig. 1 - Provetes Fig. 2 - Secagem Fig. 3 - Saturação

Na tabela 1 apresenta-se o código da designação atribuída a cada espécie, em função do estado para cada fase de ensaio.

Tabela 1 – Designação dos provetes

Espécie de madeira	Designação provetes secos	Designação provetes saturados
Pinho	Psec	Psat
Freixo	Fsec	Fsat
Castanho	CTsec	CTsat
Carvalho	CRsec	CRsat

Tanto os provetes previamente secos como os provetes saturados são colocados numa câmara climática com um ambiente interno controlado de 20°C de temperatura e 60% de humidade, durante um período de tempo igual ou superior a 24 horas, até se atingir a estabilização dimensional. Posteriormente, todo o processo é repetido até completar três ciclos. O último ciclo termina com as amostras previamente saturadas colocadas no forno para secagem, enquanto a outra metade é saturada. Os provetes permaneceram dentro da câmara climática até à estabilização das quatro espécies de madeira. Diferentes velocidades de estabilização dimensional dos provetes foram identificadas nas quatro espécies de madeira aqui analisadas. Para além do registo das dimensões, são também adquiridos os valores da humidade e da massa. As massas foram obtidas utilizando uma balança com menos de 5 mg de erro e

as leituras de humidade foram efetuadas usando um higrómetro. Para todas as medições, utilizou-se um calibrador acoplado a uma base de aço com uma precisão igual a 0,001 mm (Ferreira, 2013).

2.2 Resistência mecânica à tração

Outro objetivo do presente trabalho foi a caracterização das propriedades mecânicas das quatro espécies de madeira, assente na determinação dos valores da resistência mecânica à tração, tensão de rotura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Para os ensaios de tração foram maquinados um total de doze provetes de cada espécie de madeira, Fig. 4, seis dos quais foram cortados no sentido transversal às fibras, com as dimensões iguais a $190 \times 50 \times 9$ mm, Fig. 5, sendo os restantes obtidos no sentido longitudinal das fibras, com as dimensões $210 \times 40 \times 9$ mm, Fig. 6. As dimensões dos provetes foram estabelecidas atendendo a diferentes publicações (NBR 7190, 1997; Martins, 2010).

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios universal Instron, modelo 4400, Fig. 7. Alguns provetes foram instrumentados com extensómetros eléctricos com o objectivo de calcular o coeficiente de Poisson, Fig. 8. Este coeficiente é obtido em função da deformação lateral e da deforma-



Fig. 4 – Maquinagem dos provetes para os ensaios de tração

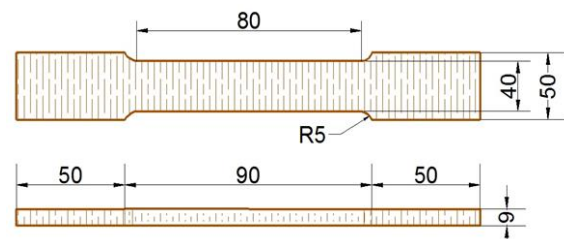


Fig. 5 – Dimensões dos provetes cortados no sentido transversal às fibras

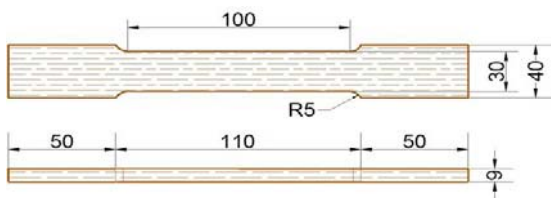


Fig. 6 – Dimensões dos provetes cortados no sentido longitudinal das fibras



Fig. 7 - Ensaios de tração



Fig. 8 - Instrumentação dos provetes

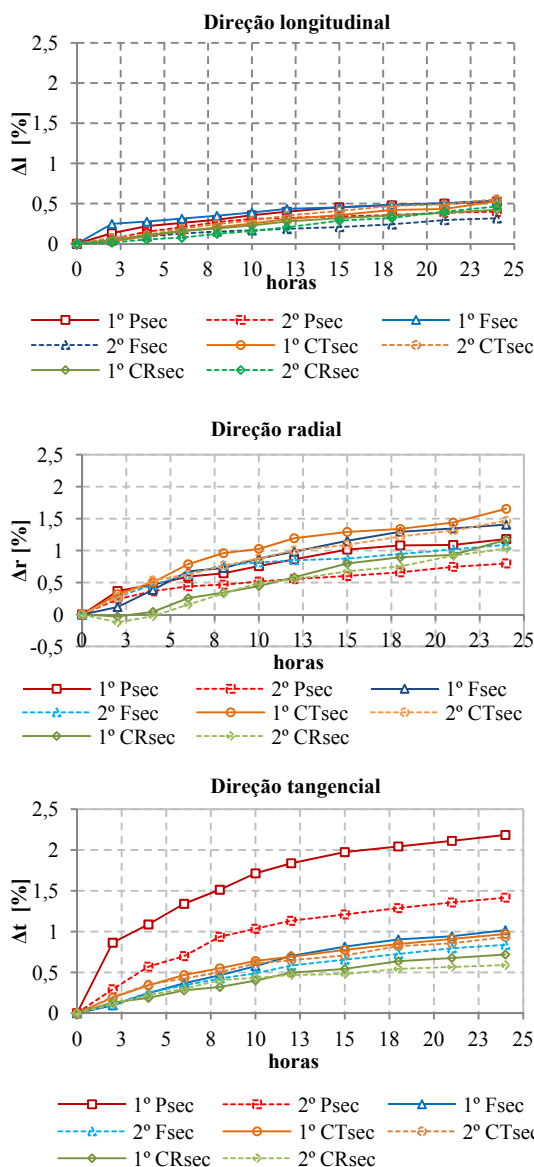


Fig. 9 – Variação dimensional dos provetes secos

ção axial, direção na qual o provete é submetido a uma carga axial.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Variação dimensional

As variações dimensionais foram registadas segundo as direções longitudinal, radial e tangencial, conforme referenciado em (Ferreira, 2014).

Nos gráficos apresentados nas Fig. 9 e 10 são apresentadas as médias dos valores obtidos para as dimensões dos provetes secos e dos provetes saturados. As variações dimensionais segundo a direção longitudinal, radial e tangencial foram designadas por Δl , Δr e Δt , respetivamente. A variação dimensional foi calculada a partir da Eq. (1), em que d_1 é a dimensão do provete seco ou saturado, variável ao longo do tempo, e d_0 é a primeira dimensão longitudinal, radial ou tangencial (no início dos ensaios experimentais):

$$\Delta = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

Na Fig. 9 apresentam-se os resultados obtidos para a variação dimensional, segundo as três direções consideradas, para os provetes previamente secos. Quando colocados na câmara húmida, estes provetes vão absorver água e aumentar a sua dimensão.

Da análise dos gráficos verifica-se que na direção longitudinal as variações dimensionais para as quatro espécies de madeira são muito pequenas, sendo a madeira de Pinho a que regista as maiores diferenças, na ordem dos 0,5%. Como seria de esperar, foi segundo a direção tangencial que ocorreram as maiores variações nas dimensões dos provetes, devido ao fenómeno de inchamento da madeira. A madeira de Pinho é a madeira que maior variação dimensional apresenta, aproximadamente dupla quando comparada com a madeira de Freixo. Para todas as espécies de madeira verifica-se uma estabilização dimensional com o aumento do número de ciclos, ou seja, a madeira torna-se estável com o envelhecimento.

Na Fig. 10 apresentam-se os resultados obtidos para a variação dimensional, segundo as três direcções consideradas, para os provetes previamente saturados. Quando colocados na câmara húmida, estes provetes perdem humidade sofrendo diminuição da sua dimensão, ou seja, sofrem retração. A retração longitudinal para as quatro espécies de madeira é praticamente nula sendo a tangencial cerca do dobro da radial. Para este fenómeno, os provetes de Carvalho foram os que apresentaram pior comportamento.

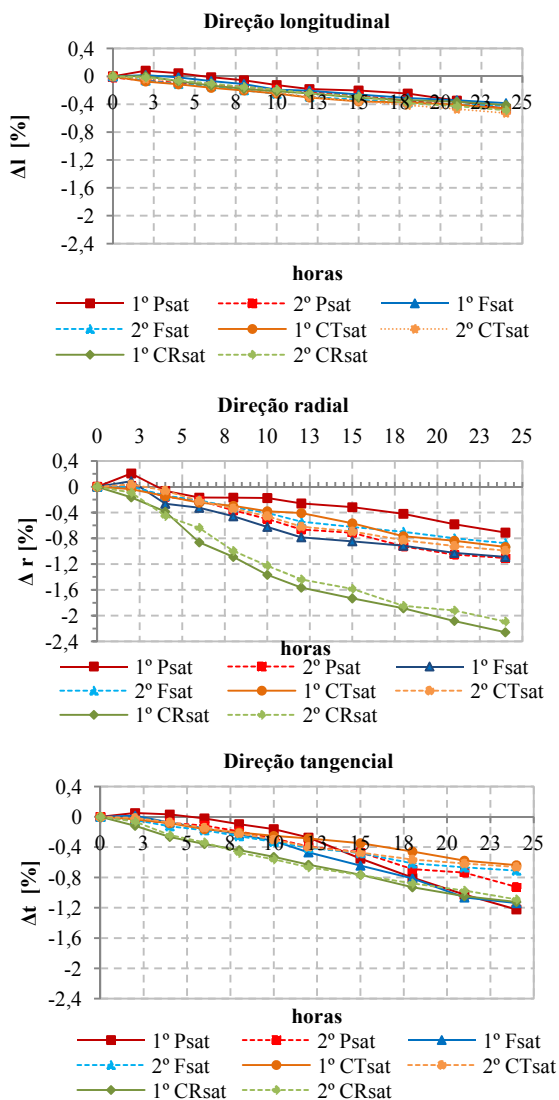


Fig. 10 – Variação dimensional dos provetes saturados

3.2 Teor em água

O teor em água de um provete de madeira é determinado segundo a NP EN 614, obtido pelo quociente entre a massa da

água que se evapora por secagem a 103°C e a massa do provete seco. Com vista à realização de ensaios de determinação das propriedades da madeira, foi internacionalmente estabelecido o valor de referência para o teor de água de 12%. O provete é pesado e seco em estufa durante 24 horas. No término desse período, o provete é retirado da estufa, deixando-se arrefecer no exsiccador e é novamente pesado. O teor em água, H , expresso em percentagem, é determinado de acordo com a Eq. (2):

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

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

As evoluções do teor em água para as madeiras de Pinho, Freixo, Castanho e Carvalho, são as apresentadas na Fig. 11 e na Fig. 12 para os provetes previamente secos e saturados, respetivamente.

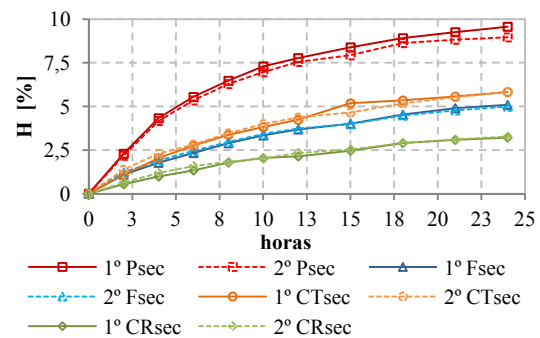


Fig. 11 – Teor em água dos provetes secos

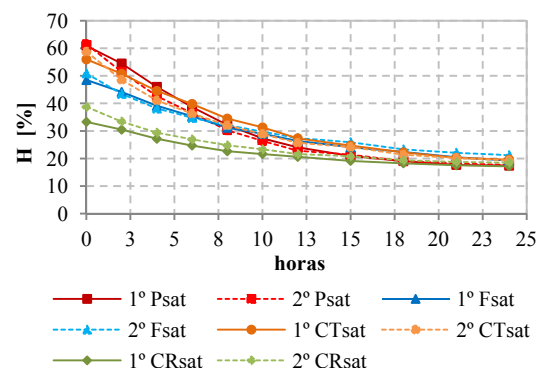


Fig. 12 – Teor em água dos provetes saturados

Os resultados obtidos confirmam o comportamento higroscópico esperado, ou seja, é mais acentuado no início do tempo em que os provetes são submetidos às condições ambiente até entrar em

equilíbrio, tornando-se menos expressivo à medida que se aproxima do teor de água de equilíbrio. O comportamento da madeira ao longo do tempo tende a adaptar-se ao ambiente envolvente. Assim, o teor de água de todos os provetes variou até atingir a condição de equilíbrio termo-higrométrico, comportamento similar foi verificado por outros investigadores (Silva, 2014)

3.3 Massa volúmica

A massa volúmica, ou densidade, da madeira está ligada ao seu teor em água. Quanto maior o teor em água maior a massa volúmica. A massa volúmica de um provete de madeira é determinada segundo a NP EN 616.

A massa volúmica de referência, utilizada para o dimensionamento de estruturas de madeira, é determinada com o provete a 12% de teor em água, expressa em g/cm³ como se indica na Eq. (3):

$$\rho_{12} = \rho_H \frac{(100+12)(100+\alpha_v H)}{(100+H)(100+12\alpha_v)} \quad (3)$$

onde α_v é o coeficiente de retração volumétrica do provete, expresso em %. Este coeficiente foi obtido segundo a norma NP EN 615 e é obtido através da Eq. (4):

$$a_v = \frac{V_2 - V_3}{V_3 \times H} \times 100 \quad (4)$$

V_2 é o volume do provete seco ao ar e V_3 é o volume do provete seco em estufa, expressos em cm³.

Nas Fig. 13 e 14 são apresentados os resultados da massa volúmica de referência, para os provetes previamente secos e saturados, respetivamente.

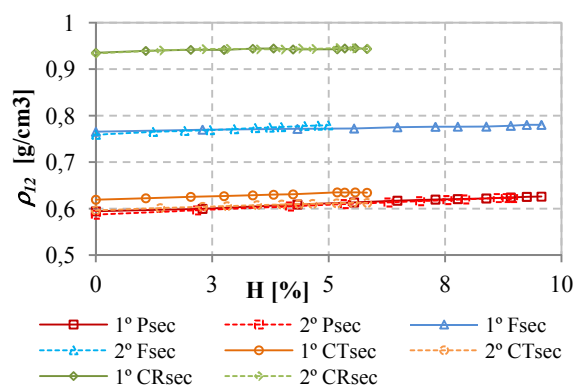


Fig. 13 – Massa volúmica dos provetes secos

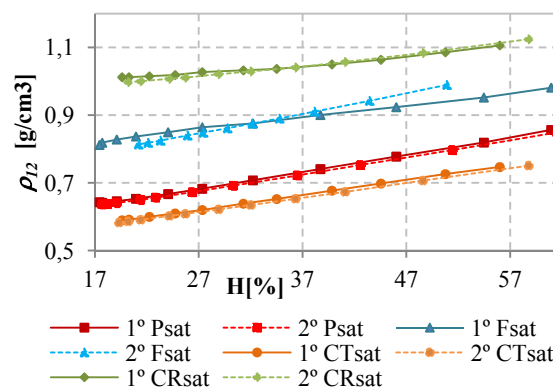


Fig. 14 – Massa volúmica dos provetes saturados

As quatro espécies de madeira apresentam valores bastante diferentes de massa volúmica, mas todos eles dentro dos intervalo de referência preconizados na literatura, 0.1-1.5 g/cm³, (LNEC, 1997). Da análise dos gráficos verifica-se que a massa volúmica da madeira de Carvalho (cerca de 1 g/cm³) é a mais elevada, ao contrário, a madeira de Pinho que é a madeira menos densa (0.8 g/cm³). Esta diferença pode residir no facto da madeira de Carvalho ser uma madeira folhosa e o Pinho uma madeira resinosa.

3.4 Resistência mecânica à tração

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços mecânicos, resultando diretamente nas propriedades anisotrópicas e de heterogeneidade do material lenhoso. O seu estudo reveste-se de grande interesse por permitir deduzir as condições de aplicabilidade de uma dada espécie para um determinado fim. A norma EN 408 define ensaios para determinação das propriedades na madeira estrutural. As propriedades da madeira são condicionadas pela estrutura anatómica, devendo distinguir-se os valores correspondentes à tração dos correspondentes à compressão, bem como os valores relativos à direção paralela às fibras dos correspondentes à direção normal às fibras, (NBR 7190, 1997). Assim, pretende-se caracterizar a madeira quanto às suas especificidades mecânicas em duas direções, uma vez que se trata de um material anisotrópico. Serão determinadas as propriedades no sentido longitudinal ao

fio e no sentido perpendicular ao fio. No sentido do fio, segundo o eixo das fibras, a resistência da madeira é, como se sabe, superior à capacidade resistente perpendicular ao fio.

Nas Fig. 15 e 16 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tração para os provetes maquinados segundo a direção longitudinal e transversal, respetivamente. A deformação ficou confinada à região central do corpo de prova. A máquina de ensaios universal foi programada para alongar o provete a uma taxa constante (velocidade igual a 0,5 mm/min).

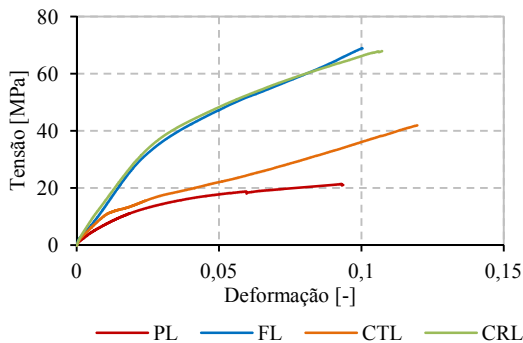


Fig. 15 – Ensaios de tração para os provetes segundo a direção longitudinal

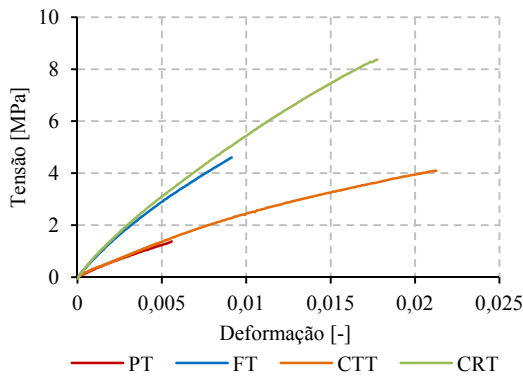


Fig. 16 – Ensaios de tração para os provetes segundo a direção transversal

Para os provetes segundo a direção longitudinal observa-se, numa fase inicial, um desenvolvimento constante designado por zona elástica, que termina para deformações de aproximadamente 1,5% a 2,5%. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica até rotura, sem verificação de oscilações do carregamento na passagem entre a zona elástica e plástica. Os provetes apresentam deformações

últimas distintas, a que correspondem tensões de rotura da ordem dos 70 MPa para as madeiras de Freixo e de Carvalho. Da análise dos resultados pode concluir-se que as quatro espécies de madeira, na direção longitudinal ao fio, apresentam um comportamento caracterizado pela rotura frágil.

Nos ensaios de tração segundo a direção transversal ao fio verificou-se que a extensão de rotura se regista entre 0,5% e 2,3% correspondendo a tensões últimas compreendidas entre 1,5 MPa e 9 MPa. O comportamento das madeiras deve neste caso ser classificado de frágil.

A tabela 2 resume os valores médios obtidos nos diferentes ensaios e para cada tipo de espécie em estudo.

Tabela 2 – Valores médios obtidos no ensaio à tração.

Espécie de madeira	E [GPa]	σ_{rot} [MPa]
Pinho L	4,12	22,84
Pinho T	0,59	0,96
Freixo L	6,46	70,88
Freixo T	1,02	3,56
Castanho L	3,04	42,4
Castanho T	0,41	1,3
Carvalho L	3,99	81,7
Carvalho T	3,0	0,94

4. CONCLUSÕES

O equilíbrio da madeira com o meio envolvente é conseguido à custa das variações dimensionais, pelo que cada tipo de madeira estabiliza dimensionalmente a um teor de água de equilíbrio próprio que a caracteriza. Para atenuar os inconvenientes da retração e do inchamento da madeira devem aplicar-se madeiras em que estes fenómenos tenham um efeito reduzido. O corte das peças de madeira deve ser radial de forma a proporcionar uma superior qualidade no que diz respeito ao comportamento da mesma, nomeadamente, retração, fendas e empeno. A madeira deve ser empregue com o grau de humidade correspondente ao meio onde vai ser utilizada, isto é, o seu teor em água deve ser o mais próximo possível do teor em água de equilíbrio em função do local de aplicação.

Do trabalho experimental elaborado conclui-se que a madeira de Freixo foi a que apresentou melhor comportamento considerando como características a massa volúmica, a variação dimensional, o teor de água e as características mecânicas. Todas as espécies de madeiras tendem a melhorar a sua estabilidade dimensional com o aumento do número de ciclos, ou seja, estabilizam com o envelhecimento.

REFERÊNCIAS

- Coutinho, J., 1999. Madeiras. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- EN 408, 2003. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties.
- Ferreira, D.R.S.M., Pinto, C.D.P., Borges, P.C.B., Fonseca, E.M.M., 2013. Dimensional stability of wood in presence of water, Proceedings of 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal, Portugal, p. 643-644.
- Ferreira, D.R.S.M., Pinto, C.D.P., Borges, P.C.B., Pinto, T., Fonseca, E.M.M., 2014. Estabilidade dimensional da madeira na presença de água, Proceedings do Congresso Latinoamericano sobre Patologías de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación e Gestión del Patrimonio – Rehabend, Santander, Espanha
- LNEC: Madeira para construção, 1997. M1 a M9, Lisboa
- Martins, J., 2010. Bases para o Projeto de Conservação, Restauro e Reabilitação de Edifícios Antigos, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- NP 614, 1973. Instituto Português da Qualidade.
- NP 615, 1973. Instituto Português da Qualidade.
- NP 616, 1973. Instituto Português da Qualidade.
- NBR 7190, 1997. Técnicas, ABNT - Associação Brasileira de Normas.
- Silva, C., Branco, J., Camões, A., Lourenço P., 2014. Dimensional variation of three softwood due to hygroscopic behavior. Construction and Building Materials, 59, p. 25-31.
- Simpson, W., TenWold, A., 1999. Physical properties and moisture relations. In F. P. Laboratory, Wood handbook - Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- White, R. H., Dietenberger, M. A., 1999. Handbook - Wood as an Engineering Material. Madison, Wisconsin : USDA - United States Department of Agriculture.