

ESTUDO POR ELEMENTOS FINITOS DUM NOVO MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE *PINUS PINASTER AIT.* NAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES AO GRÃO

João Luís Pereira¹, José Xavier², José Morais³

RESUMO

Apresenta-se neste artigo a simulação numérica de um novo ensaio de tracção para determinar o comportamento mecânico da madeira na direcção tangencial aos anéis de crescimento. Para o efeito utilizou-se o código de elementos finitos ANSYS 6.0, tendo sido considerada a madeira de *Pinus Pinaster Ait.* Admitiu-se que a madeira é um material linear e elástico, com simetria ortotrópica cilíndrica. Os resultados da simulação mostram que o ensaio proposto é adequado para a determinação experimental do módulo de elasticidade tangencial (E_T) e da resistência à tracção longitudinal (X_T), desde que no tratamento dos resultados experimentais se utilize um factor de correcção que contemple a heterogeneidade do campo das tensões.

1. INTRODUÇÃO

Em termos anatómicos, a madeira é um tecido celular orientado, sendo geralmente tratada à escala macroscópica como um material com simetria ortotrópica cilíndrica [Guitard, D. (1970)]. As direcções de simetria em cada ponto são a direcção longitudinal (L) das fibras de madeira, a direcção radial (R) dos anéis de crescimento e a direcção tangencial (T) aos anéis de crescimento (Figura 1). Para caracterizar o comportamento mecânico da madeira é pois necessário conhecer as relações tensão-deformação no referencial LRT, até à rotura. Os ensaios mecânicos são o único meio de obter essa informação, mas estão ainda por resolver várias dificuldades que esses

¹ ESTV, Departamento de Madeiras, Viseu, Portugal

² UTAD, Departamento de Engenharias, Vila Real, Portugal.

³ CETAV/UTAD, Departamento de Engenharias, Vila Real, Portugal.

ensaios colocam, resultantes não só da natureza anisotrópica da madeira, mas também da sua variabilidade natural.

Um dos problemas ainda em aberto é a identificação completa do comportamento mecânico nas direcções perpendiculares ao grão (R e T), incluindo as tensões de rotura (X_T e X_R). Os trabalhos publicados sobre este problema são relativamente escassos, e dizem respeito essencialmente à identificação dos módulos de elasticidade E_R e E_T , como é o caso dos trabalhos de Bodig e Goodman (1973), Sliker (1988), Sliker e Yu (1993), Sliker e Yu (1994). O método usado por esses autores para determinar E_R e E_T é porém questionável, pois assenta na hipótese da existência dum estado de tensão uniaxial e uniforme na região de referência dos provetes usados. De facto, em consequência da curvatura dos anéis de crescimento, os campos das tensões e das deformações são heterogêneos, não correspondendo à situação ideal do estado de tensão uniaxial em que se baseia o método de tratamento dos resultados experimentais.

As normas actualmente em vigor [BSI (1957), NP-621 (1973) e ASTM D143-94 (1994)] são inadequadas, por um lado porque não têm em conta a heterogeneidade dos campos das tensões e das deformações devida à curvatura dos anéis de crescimento, e por outro porque a rotura está associada a um estado complexo de tensão. Estas objecções colocam-se também relativamente ao projecto de Norma Europeia prEN 408 (2000), como se pode concluir a partir de alguns trabalhos recentes sobre o efeito da curvatura dos anéis de crescimento no campo das tensões, em provetes de madeira maciça ou de lamelados colados [Aicher e Dill-Langer (1996), Hanhijarvi e Ranta-Maunus (1996), Castéra e Lac (1997)].

O objectivo deste artigo é apresentar os resultados da simulação numérica, pelo método dos elementos finitos, de um novo ensaio de tracção para determinar o comportamento mecânico da madeira na direcção tangencial.

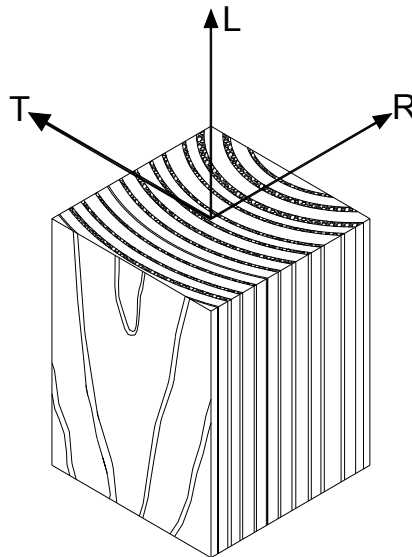


Fig. 1 – Referencial de simetria ortotrópica.

2. ENSAIO DE TRACÇÃO TANGENCIAL

Na sequência de trabalhos anteriores [Morais *et al.* (2001) e Pereira (2003)] propôs-se um novo provete, designado por provete T, com a forma e as dimensões indicadas na Figura 2, para determinar a curva tensão-deformação da madeira de *Pinus Pinaster Ait.* na direcção tangencial (T), e em particular o módulo de elasticidade tangencial (E_T) e a tensão de rotura tangencial (X_T). O referido provete, cujo aspecto geral se pode apreciar na Figura 3, é composto por duas partes coladas, dispostas de forma simétrica em relação ao plano médio do provete. Os ensaios de tracção deverão ser executados numa máquina universal de ensaios mecânicos, equipada com amarras convencionais de cunhas deslizantes, utilizando o procedimento de amarração recomendado por Hojo *et al.* (1994).

As grandezas medidas directamente no ensaio de tracção são a força global F aplicada ao provete, na sua direcção longitudinal, e as deformações lineares médias $\bar{\varepsilon}_1$ e $\bar{\varepsilon}_2$ (Figura 2). Verificando-se a hipótese de Saint-Venant, a tensão normal média na secção central do provete é dada por:

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

onde A é a área da secção transversal do provete. O módulo de elasticidade tangencial aparente, E_T^a , e o coeficiente de Poisson aparente, ν_{TL}^a , são dados respectivamente por:

$$E_T^a = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}_1} \quad \text{e} \quad \nu_{TL}^a = -\frac{\bar{\varepsilon}_2}{\bar{\varepsilon}_1}. \quad (2)$$

Se o campo das tensões não é uniaxial e uniforme em toda a região de referência do provete (entre as amarras), os valores aparentes do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson (Equações 2) coincidem com os valores efectivos dessas propriedades do material. Caso contrário, os valores aparentes deverão ser assim corrigidos a fim de se obterem os valores exactos de E_T e ν_{TL} :

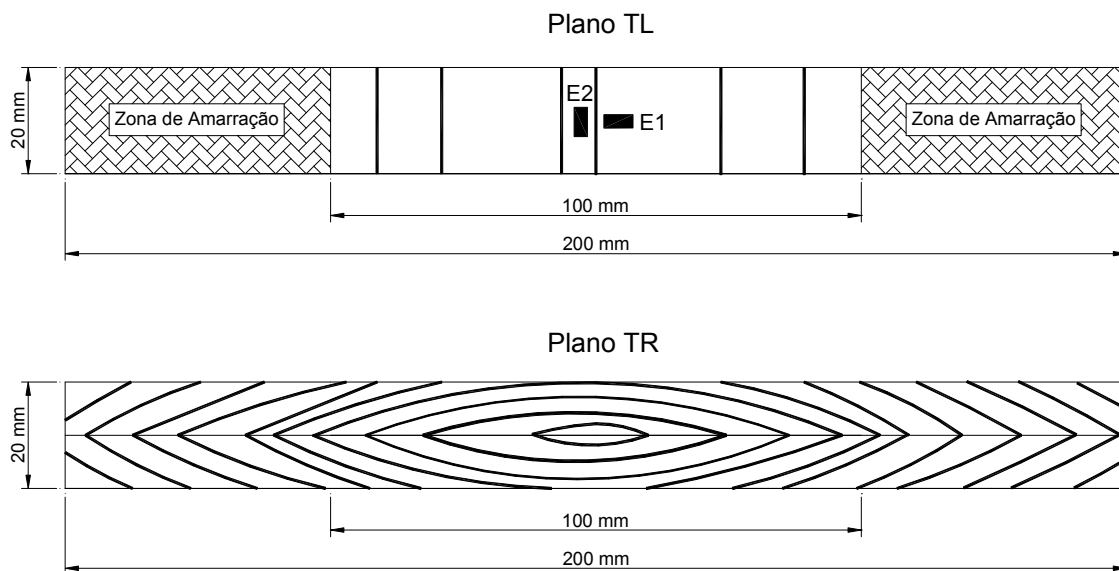
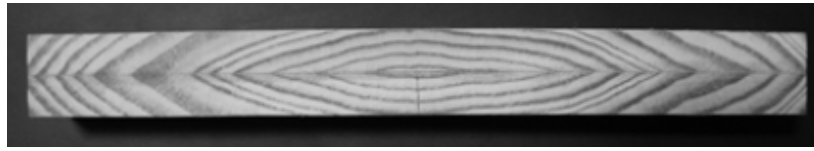
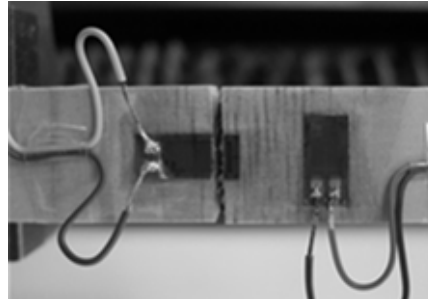


Fig. 2 – Provete T, para madeira de *Pinus Pinaster Ait.*



(a)



(b)

Fig. 3 – Provete T: aspecto geral (a) e da rotura (b).

$$E_T = \Phi E_T^a \quad \text{e} \quad \nu_{TL} = \Psi \nu_{TL}^a \quad (3)$$

Os factores de correcção Φ e Ψ podem ser determinados de uma forma aproximada simulando o ensaio de tracção pelo método dos elementos finitos.

À semelhança das propriedades elásticas, o valor máximo da tensão média $\bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}_M$) corresponderá à resistência à tracção na direcção T (X_T) se o campo das tensões for uniaxial e homogéneo, pelo menos na zona do provete onde ocorre a rotura. Mas se assim não for, a resistência à tracção tangencial poderá ser obtida indirectamente, através da equação:

$$X_T = \Omega \bar{\sigma}_M, \quad (4)$$

com um valor aproximado do factor de correcção Ω obtido pelo método dos elementos finitos.

3. SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

O ensaio de tracção tangencial foi simulado por elementos finitos, recorrendo ao código ANSYS 7.0. Para o efeito construiu-se um modelo com base no elemento sólido tridimensional SOLID 64, da livreria de elementos do código ANSYS [ANSYS *University High Option* (2002)] com 40.000 elementos e 44.541 nós (Figura 4).

As condições de fronteira empregues correspondem ao carregamento ideal dos provetes através das amarras de cunhas deslizantes. Assim, aos nós da face ABCD (Figura 4) foi imposto um deslocamento u_z nulo, enquanto que aos nós da face oposta (EFGH) foi imposto um deslocamento $u_z = 0.5$ mm. Para os nós da aresta CD foram também impedidos os deslocamentos u_x e u_y , enquanto que para os nós das arestas AB, GH e EF foi apenas impedido o deslocamento u_x .

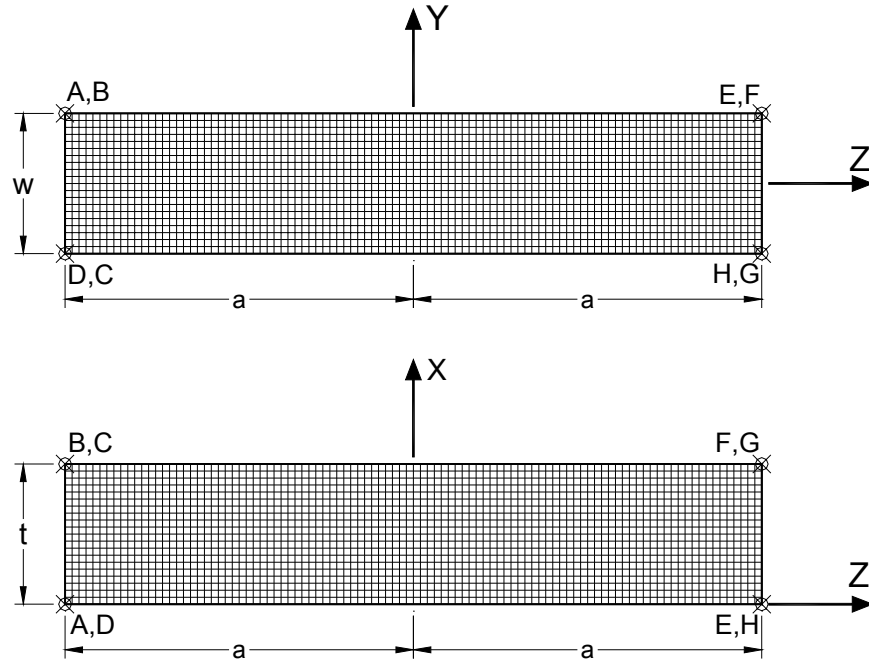


Fig. 4 – Malha de elementos finitos: $a = 50$ mm, $t = 20$ e $W = 10, 15, 20, 25$ ou 30 mm.

O material considerado na simulação foi a madeira de *Pinus Pinaster Ait.*, com as propriedades elásticas indicadas na Tabela 1 [Pereira (2003) e Xavier (2003)]. Para lidar com a curvatura dos anéis de crescimento, o provete foi dividido em vinte regiões, em cada uma das quais se admitiu que as direcções L e R eram constantes (Figura 5). A matriz de elasticidade de cada uma dessas regiões, relativamente ao referencial global (XYZ), foi obtida a partir das propriedades da Tabela 1, usando a lei de transformação da matriz de elasticidade de materiais ortotrópicos [Tsai e Hahn, (1980)].

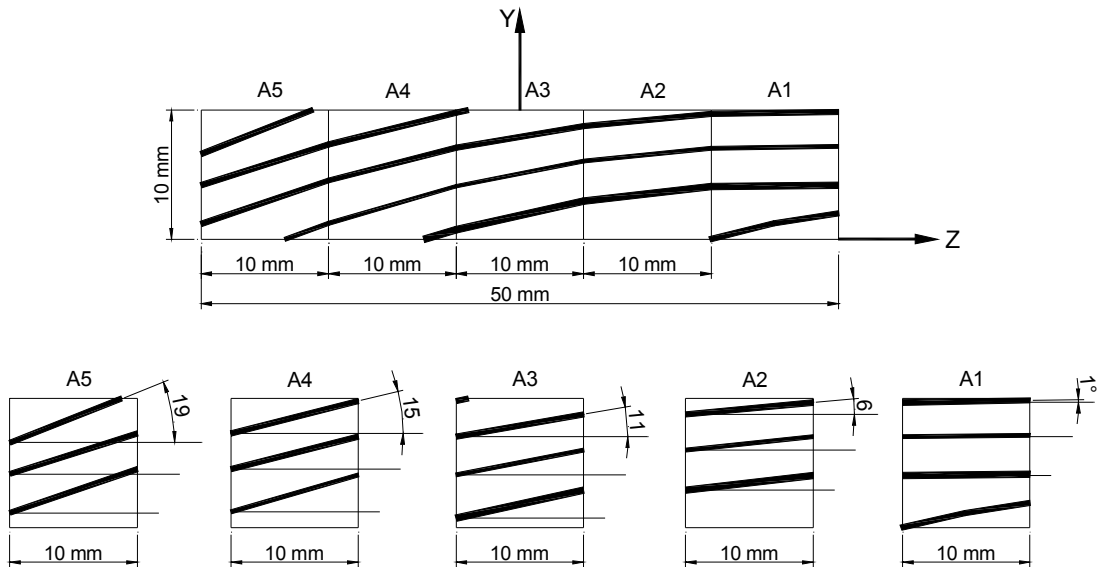


Fig. 5 – Discretização das propriedades do material, no referencial global XYZ.

Tabela 1 – Propriedades da madeira de *Pinus Pinaster, Ait.* no referencial LRT.

E_L [GPa]	E_R [GPa]	E_T [GPa]	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{TL}	G_{RT} [GPa]	G_{LT} [GPa]	G_{LR} [GPa]
15,133	1,912	1,010	0,568	0,051	0,471	0,171	1,042	1,115

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Um dos objectivos da simulação do ensaio de tracção tangencial é averiguar em que medida o estado de tensão instalado no provete corresponde ao ensaio de tracção ideal, ou seja, é um estado de tensão uniaxial e uniforme. Tirando as regiões da vizinhança das extremidades do provete, os resultados da simulação mostram que o estado de tensão pode ser considerado uniaxial, com uma única componente não nula (σ_{zz}), embora não seja uniforme (Figura 6). Isto mesmo está claramente patente nas Figuras 7 a 9, onde se apresentam alguns perfis das tensões normais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , normalizadas pela tensão normal média $\bar{\sigma}_{zz}$. Nessas figuras não se representam as componentes de corte do tensor das tensões (τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{xz}), uma vez que são nulas.

A distribuição das tensões σ_{zz} é praticamente uniforme na direcção do eixo dos XX (Figura 6), não o sendo porém na direcção dos eixos dos YY e dos ZZ (Figuras 7 a 9). Na zona de fixação dos extensómetros E1 e E2 (Figura 2) a tensão σ_{zz} é, com muito boa aproximação, constante. Todavia, essa tensão é superior à tensão normal média, calculada directamente a partir dos resultados experimentais (Equação 1). Assim sendo, as propriedades elásticas (E_T e ν_{TL}) e a resistência à tracção tangencial (X_T) deverão ser obtidos conforme indicado na secção 2 (Equações 1 a 4).

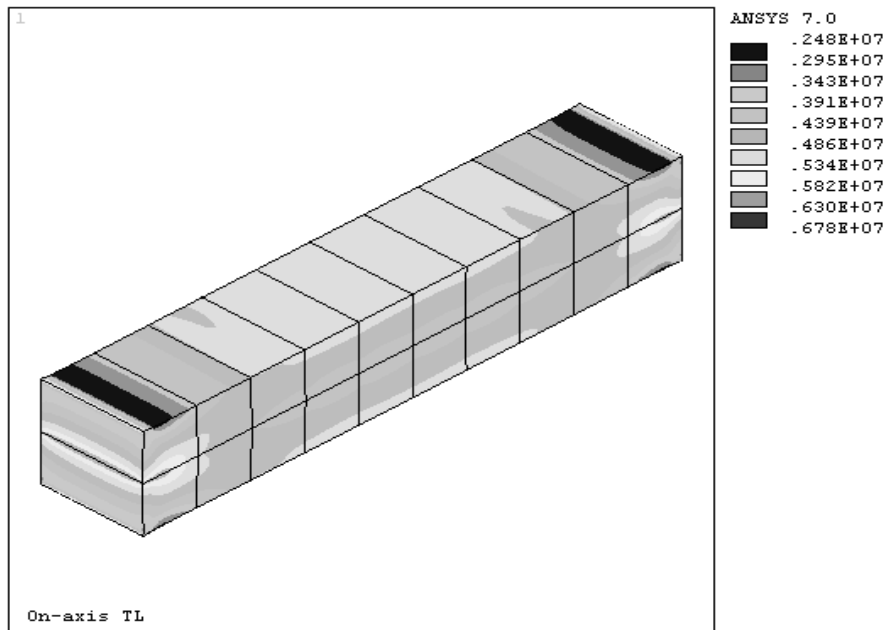


Fig. 6 – Campo das tensões normais σ_{zz} .

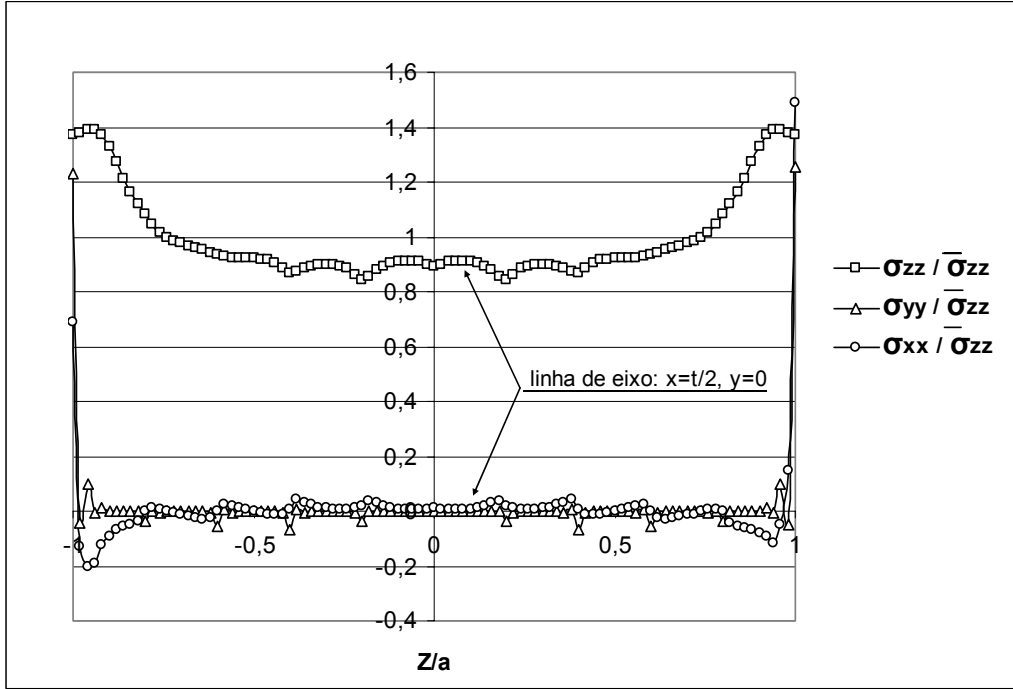


Fig. 7 – Variação das tensões normais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , ao longo da recta ($x=t/2$ e $y=0$).

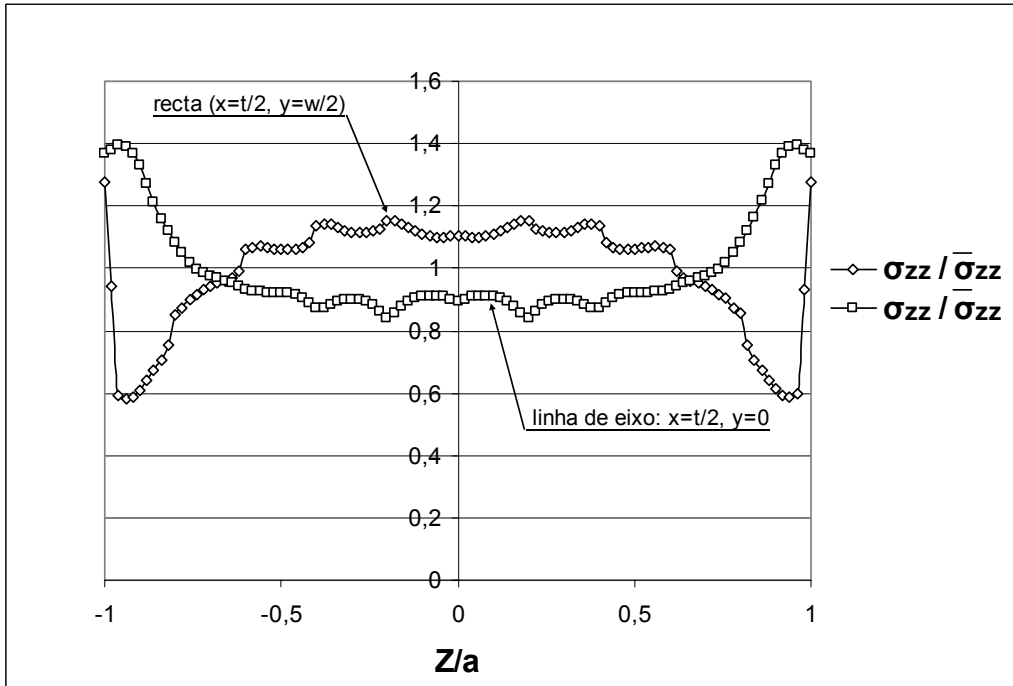


Fig. 8 – Distribuição da tensão normal σ_{zz} , ao longo das rectas ($x=t/2$ e $y=0$) e ($x=t/2$ e $y=w/2$).

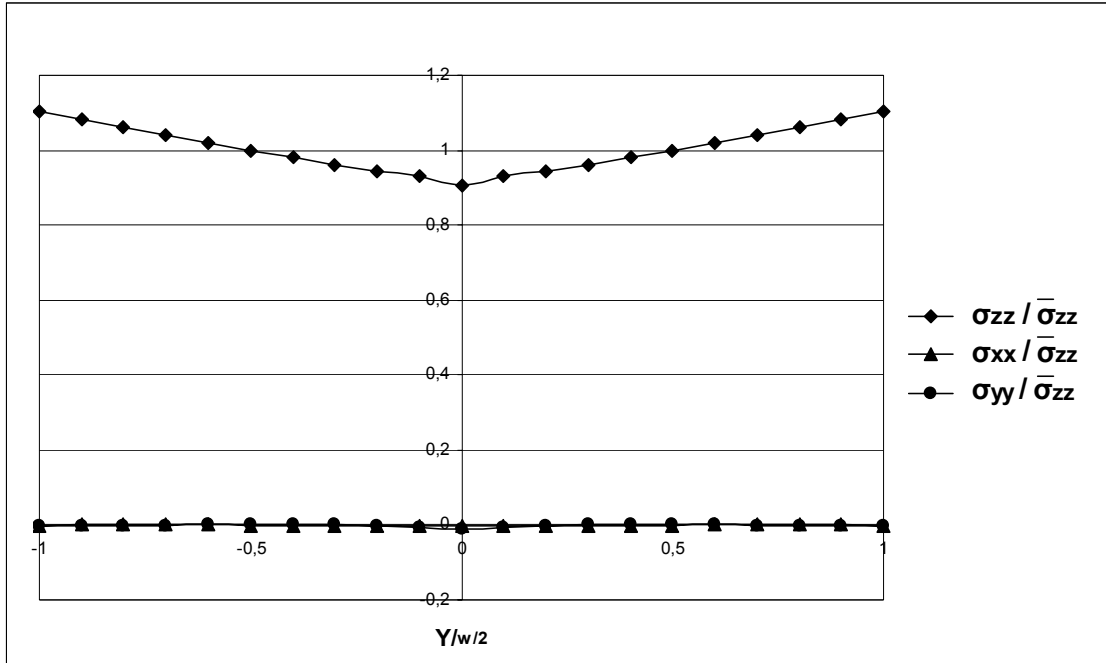


Fig. 9 – Variação das tensões normais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , ao longo da recta ($x=t/2$ e $z=0$).

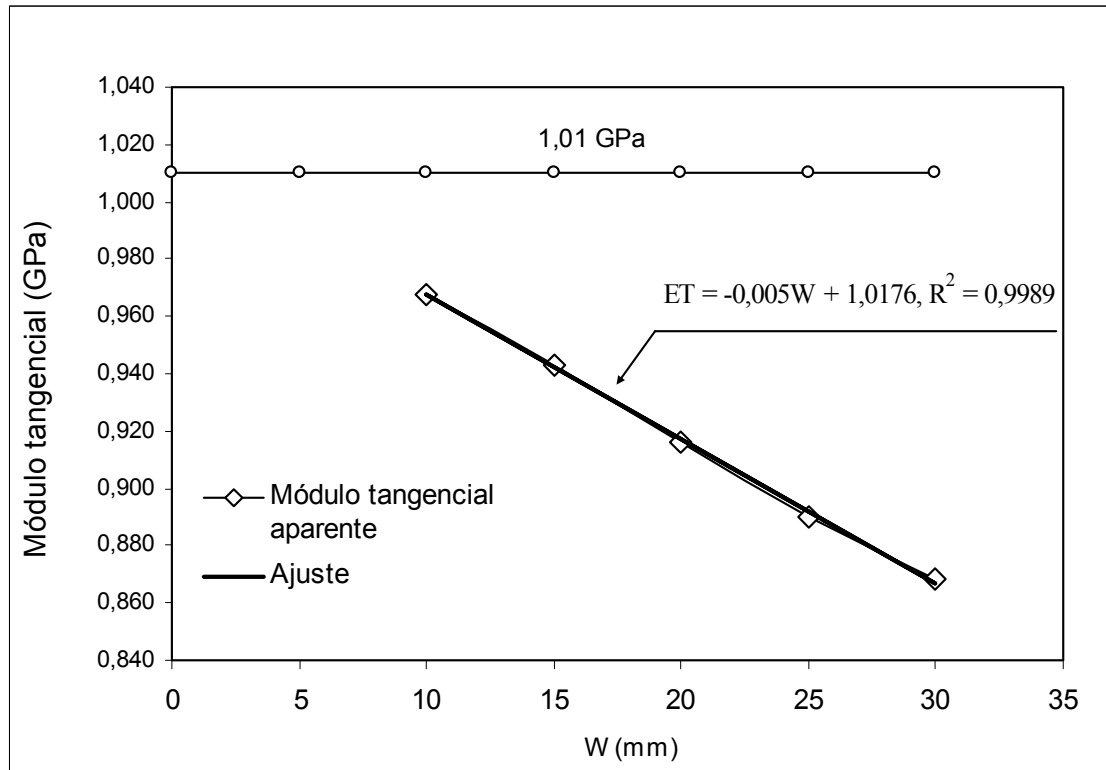


Fig. 10 – Relação entre o módulo de elasticidade tangencial aparente e W .

Na figura 10 apresenta-se a dependência do módulo tangencial aparente com a largura W do provete. A relação entre essas duas quantidades é linear, com o facto notável do valor de E_T^a extrapolado para $W=20$ mm diferir menos de 1% do verdadeiro valor de E_T (1.01 GPa). A partir destes resultados conclui-se que o factor de correcção Φ (Equação 3) vale 1.1, para o provete com $W=20$ mm. O factor de correcção Ω (Equação 4) tem o mesmo valor que Φ (1.1), como se pode verificar a partir dos resultados apresentados na Figura 9. Este resultado é uma consequência do facto do campo das tensões na zona de colagem dos extensómetros ser uniaxial e uniforme. Pelo mesmo motivo, o factor de correcção Ψ (Equação 3) deverá ser igual à unidade.

É de crer que as condições de amarração que vigoram nos ensaios experimentais conduzam a um campo de tensões mais uniforme que o campo das tensões resultante das condições de fronteira consideradas neste trabalho. Será essa a razão pela qual a rotura ocorre na região central do provete (Figura 3.b) e não na vizinhança das amarras [Pereira (2003)] como se poderia concluir a partir das Figuras 7 e 8. Assim, é legítimo supor que a rotura é devida a um estado uniaxial de tensão, podendo a resistência à tracção tangencial ser determinada através da Equação 4.

5. CONCLUSÕES

O ensaio de tracção com o provete T é um ensaio promissor para a determinação da lei de comportamento mecânico da madeira na direcção tangencial aos anéis de crescimento. De facto, com um tratamento adequado dos resultados experimentais é possível determinar as propriedades elásticas E_T e ν_{TL} , bem como a resistência à tracção X_T . Para isso é necessário corrigir os valores aparentes E_T^a e X_T^a , determinados directamente a partir dos resultados experimentais, com um mesmo factor de correcção. Esse factor de correcção, que contempla a heterogeneidade do campo das tensões, pode ser estimado recorrendo ao método dos elementos finitos. Nenhum factor de correcção é necessário para determinar o coeficiente de Poisson ν_{TL} . Para validar este ensaio deverá ser feito um estudo numérico e experimental mais exaustivo, nomeadamente sobre a influência da curvatura dos anéis de crescimento e sobre a sensibilidade do factor de correcção à variabilidade das propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

- Guitard, D., "Mécanique du matériau bois et composites", Colecction Nabla. C. E. P. A. D. U. E. S. Editions, Toulouse, France: 220pp, 1970.
- Bodig, J. e Goodman, J. R., "Prediction of elastic parameters for wood", Wood Sci., **5**(4), pp. 249-264, 1973.
- Sliker, A., "A method for predicting non-shear compliances in the RT plane of wood". Wood and Fiber Sci., **20**(1), pp. 44-55, 1988.
- Sliker, A. e Yu, Y., "Elastic constants for hardwoods measured from plate and tension tests". Wood and Fiber Sci., **25**(1), pp. 8-22, 1993.
- Sliker, A., Yu, Y., Weigel, T. e Zhang, W., "Orthotropic elastic constants for eastern hardwood species", Wood and Fiber Sci., **26**(1), pp. 107-121, 1994.

British Standards Institution, “Methods of testing small clear specimens of timber”, BSI London, 1957.

Norma Portuguesa, “NP-621 Madeiras – Ensaio de tracção transversal”, 1973.

American Society for Testing and Materials, “D143-94 Standard methods of testing small clear specimens of timber”, ASTM, Philadelphia, USA, 1994.

European Committee for Standardization, “prEN 408 Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2000.

Aicher, S. & Dill-Langer, G., “Influence of cylindrical anisotropy of wood and loading conditions on off-axis stiffness and stresses of a board in tension perpendicular to grain”, *Otto Graf Journal*, **7**, pp. 216-242, 1996.

Hanhijarvi, A. e Ranta-Maunus, A., “Computational analysis of the effect of transverse anisotropy and annual ring pattern in cross sections of curved glulam beams in the size effect of strength”, *Proceedings of European Workshop on Application of Statistics and Probabilities in Wood Mechanics*, Bordeaux, 22 – 23 February, 1996.

Castéra, P. e Lac, P., “Effet d'échelle en traction perpendiculaire pour un multicouche composé de lamelles orthotropes : cas du bois lamellé collé”, *Annales CG Bois*, **2**, pp. 15-24, 1997.

Morais, J. L., Xavier, J. M., Dourado, N. M. & Lousada, J. L., “Measuring the mechanical behavior of wood in the orthotropic directions”, *Proceedings of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics*, Lausanne, Switzerland, Parviz Navi (Editor), April 19th-21st, pp. 355-363, 2001.

Pereira, J. L., “Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria material”, Tese de Mestrado, UTAD, Vila Real, 2003 (em preparação).

Hojo, M., Sawada, Y. e Miyari, H., “Influence of camping method on tensile properties of unidirectional CFRP in 0° and 90° directions – round robin activity for international standardization in Japan”, *Composites*, **25**(8), pp. 786-796, 1994.

ANSYS University High Option, “User’s Manual”, Swanson Analysis System, Inc., Philadelphia, PA, 2002.

Xavier, J. M. (2003), “Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Iosipescu”, Tese de Mestrado, UTAD, Vila Real, 2003 (em preparação).

Tsai, W. T. e Hahn, H. T., “Introduction to composite materials”, Technomic Publishing Co, Lancaster, USA, 1980.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro para a execução deste trabalho, através do projecto POCTI/EME/36270/2000.