



UNIVERSIDADE DO MINHO

Departamento de Engenharia Mecânica

**Estudo de modelos e caracterização do
comportamento mecânico da madeira**

Tese de Doutoramento

José António dos Santos

Guimarães, 2007

(em branco)

**Dedico este trabalho a todos aqueles que,
num exercício de grande humildade e humanidade,
em todas as profissões, colocam o bem da sociedade
acima dos seus próprios interesses do momento.**

**As leis da natureza estão sempre presentes, mesmo para
aqueles que não as compreendem, os que não as conhecem,
ou aqueles que com elas não concordam.**

José António Santos

(em branco)

Sumário

Sendo a madeira um material com características muito próprias, iniciou-se este trabalho com uma explicação sobre a sua origem, formação, singularidades e características básicas, nomeadamente as de maior importância para o desempenho estrutural, como o teor em água, as tensões internas e as retracções. De seguida foi revista a teoria da mecânica dos materiais no que se pensa poder ser importante para a compreensão do comportamento da madeira, que se distingue de outros materiais melhor estudados, sobretudo por uma completa anisotropia do arranjo estrutural e propriedades, além de manifestar intensamente a variabilidade normal em produtos de origem natural, o que muito dificulta a sua utilização em projecto. Foi ainda passada em detalhe uma revisão das várias normas e procedimentos relativos à caracterização mecânica da madeira.

Em cumprimento dos objectivos do trabalho cumpriu-se um exigente programa de ensaios laboratoriais, não só por procedimentos conhecidos em normas, mas também em repetição de estudos recentes encontrados na bibliografia, e ainda desenvolvimento de novos procedimentos de ensaio. A interpretação dos resultados experimentais permitiu concluir o trabalho com a apresentação de novos modelos destinados à compreensão e caracterização do comportamento mecânico da madeira quando submetida a esforços de flexão, tracção, compressão e corte. Foram também consideradas as vertentes do comportamento reológico, nomeadamente o visco-elasticidade e visco-plasticidade da madeira, através de ensaios de fluência e de relaxação de tensões, assim como a respectiva modelação. Foram também identificadas as dificuldades de aplicação à madeira dos modelos informáticos de cálculo já muito rigorosos na resposta ao comportamento de materiais isotrópicos.

O estudo teve como matéria-prima amostras de duas das mais importantes espécies de madeira produzidas em Portugal, o pinho bravo e o eucalipto.

Muitas das aplicações práticas encontram-se dependente de cálculo e projecto de elementos estruturais.

O aumento da fiabilidade do comportamento mecânico da madeira renova o potencial do seu uso em maior escala e em produtos de maior valor acrescentado, aliando vantagens de segurança, criatividade estética e de uma forma global, um impacte ambiental positivo.

Palavras-chave:

Modelos; mecânica da madeira; módulo de elasticidade; comportamento estrutural; características mecânicas; reologia.

Abstract

Wood is a material with very special characteristics of its own. This study began with an explanation of the origin and formation of wood, highlighting its singularities and basic features, particularly the extreme importance of moisture content and shrinkage in the state of stresses. Following it was revised the theory of mechanics of materials, believed to be important for the understanding of the behaviour of wood, which is distinguished from other better studied materials, at least for a complete anisotropy its internal arrangements and structural properties, in addition to the great variability, which is normal for products of natural origin, making it even more difficult to use in structural project. It was also revised in detail the various standards and procedures relating to the mechanical characterization of wood. Fulfilling the objectives of this work it was followed a demanding program of laboratory tests, not only by procedures known in international and European standards, but also in recent studies found in the references. Finally this study has finished with the proposal of physical models for the understanding and characterization of the mechanical behaviour of wood when subjected to efforts to bending, tension, compression and shear. Also considered the rheological behaviour, including the visco-elasticity and visco-plasticity of wood, through testing of creep and relaxation of tensions, as well as their modelling.

The study had as raw material, samples from two of the most important wood species produced in Portugal, the maritime pine and eucalyptus. The practical applications are to be found at the level of structural calculation, calculation and design of structural elements.

Increased reliability of the mechanical behaviour of wood renews the potential of its use in larger scale and in products of higher added value, combining advantages of safety, allowing the exploitation of its aesthetic potential and positive environmental impact.

Keywords:

Models; mechanics of wood; module of elasticity; structural behaviour; mechanical properties; rheology.

Agradecimentos

Começo por manifestar o meu profundo agradecimento ao meu orientador Prof. Doutor António Costa Marques Pinho, pela incansável ajuda e incentivo dados à realização deste trabalho, não esquecendo a permanente disponibilidade e as muitas horas que passámos juntos a pensar em novas soluções para realizar ensaios mecânicos, que nos ajudaram a conhecer um pouco melhor o material madeira.

Nada teria sido possível sem a minha colaboração com a Universidade do Minho, que começou com um convite do Prof. Jaime Ferreira da Silva, a quem, por este motivo e na continuação de uma velha amizade que vem da sua passagem como director técnico no Centro Tecnológico para as Indústrias da Madeira, aqui deixo o meu agradecimento.

Um agradecimento também especial ao técnico de laboratório da Universidade do Minho, Sr. Fernando Araújo, que dedicou muitas horas a acompanhar a realização dos ensaios práticos.

Um agradecimento geral aos professores e funcionários da Universidade do Minho que me conheceram e com quem tive o privilégio de contactar, que me apoiaram directa ou indirectamente, nos Conselhos Científicos, pareceres, opiniões e sugestões.

No Instituto onde trabalho, o INETI tive um apoio e incentivo muito importante por parte da Eng.^a Maria Manuela Oliveira, e ainda a confiança do director do Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção, o Eng.^o José Miguel França Figueiredo, a quem agradeço tudo o que fizeram e disseram para eu levar a pouco e pouco esta tarefa até ao fim.

Aos meus colegas de Grupo de Trabalho das Tecnologias da Madeira, agradeço a disponibilidade que me deram de me ausentar periodicamente da equipa, deixando a eles outras tarefas e assim ajudarem-me a ter maior disponibilidade para este trabalho. Uma especial referência à Eng.^a Joana Martins dos Santos que me ajudou em ensaios no laboratório e em trocas de ideias na sua área de competência em ciência florestal.

Agradeço à minha família à minha mulher e aos meus filhos, o sacrificio em suportar os momentos de indisponibilidade da minha companhia, tanto devida às deslocações para trabalhos em Guimarães, como pelas horas de isolamento em casa para trabalhos de escrita em computador.

(em branco)

Índice de conteúdos

Sumário	V
Abstract	VI
Agradecimentos.....	VII
Índice de conteúdos.....	IX
Índice de figuras.....	XII
Índice de tabelas.....	XXI
Símbolos.....	XXIII
Unidades S.I.	XXIII
Glossário / Definições	XXIV
Capítulo I.....	1
Introdução.....	1
1.1 - A Madeira como Material de Engenharia.....	1
1.2 – Objectivo da tese	2
1.3 – Organização da dissertação	3
Capítulo II.....	5
Conhecimentos básicos sobre a madeira.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Estrutura anatómica da madeira.....	6
2.3 Defeitos da madeira	9
2.4 Propriedades físicas da madeira.....	10
2.4.1 Teor em água.....	11
2.4.2 Massa volúmica.....	14
2.4.3 Retracção / inchamento	14
2.5 Defeitos e singularidades da madeira	15
2.5.1 Fio da madeira	15
2.5.2 Nós.....	16
2.5.3 Lenho juvenil.....	17
2.5.4 Cerne e borne.....	18
Capítulo III	21
Mecânica da Madeira. Revisão bibliográfica.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Mecânica ao nível microscópico	23
3.3 Elementos micro-estruturais da madeira	23
3.4 Estado de tensão num ponto	24
3.5 Relações matemáticas entre propriedades elásticas.....	28
3.6 Tracção paralela às fibras	30
3.7 Tracção transversal	32
3.8 Compressão paralela.....	34
3.9 Compressão transversal	36
3.10 Fendimento.....	38
3.11 Corte paralelo.....	38
3.12 Corte transversal	43
3.13 Flexão.....	44
3.13.1 Módulo de elasticidade à flexão.....	52
3.13.2 Teoria geral para o cálculo do módulo de elasticidade em flexão	53

3.13.3	Discussão sobre a aplicação de uma ou duas cargas de flexão	55
3.13.4	Normas mais usuais para determinação experimental do módulo de elasticidade à flexão	56
3.14	Coefficiente de Poisson	67
3.15	Módulo de corte	72
3.15.1	Análise no plano	72
3.15.2	Significado físico do Módulo de corte para a madeira	80
3.15.3	Avaliação do módulo de corte segundo a EN 408:2003	82
3.15.4	Método Iosipescu	84
3.15.5	Método de Arcan	89
3.15.6	Método “ <i>off-axis</i> ”	90
3.16	Módulo de elasticidade volumétrico	91
3.17	Comportamento viscoso da madeira sob tensão	91
3.18	Fluência e relaxação de tensões	95
3.18.1	Comportamento visco-plástico	98
3.18.2	Comportamento mecânico-sortivo	98
3.18.3	Interpretação do fenómeno da fluência	100
3.18.4	Relaxação de tensões	102
3.18.5	Modelos matemáticos da fluência	105
3.19	Concentração de tensões	107
3.20	Critérios de análise de falha	111
3.20.1	Critério de von Mises	114
3.20.2	Critério de Tresca	115
3.20.4	Critério de Tsai-Hill	119
3.21	Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios	122
3.22	Modelo de Weibull para análise estatística da falha	124
Capítulo IV.....		127
Desenvolvimento experimental.		127
4.1.1	Introdução.....	127
4.1.2	Equipamentos de preparação de amostras e ensaio	128
4.1.3	Amostragem e preparação para ensaios	130
4.2	Tracção paralela às fibras	133
4.2.1	Procedimento de ensaio	136
4.2.2	Resultados da tracção paralela do pinho bravo	138
4.2.3	Resultados da tracção paralela do eucalipto.....	141
4.2.4	Coefficientes de Poisson na tracção paralela.....	146
4.3	Compressão paralela às fibras	149
4.3.1	Resultados da compressão paralela do pinho bravo.....	150
4.3.2	Resultados da compressão paralela do eucalipto	151
4.4	Tracção transversal	160
4.5	Corte	166
4.5.1	Corte paralelo	167
4.5.2	Corte transversal.....	172
4.5.3	Corte por enrolamento.....	175
4.5.4	Módulo de corte do corte paralelo.....	179
4.6	Compressão transversal	184
4.7	Flexão	195
4.7.1	Variação radial e características à flexão do eucalipto.....	196
4.7.2	Variação radial e características à flexão do pinho bravo	200
4.7.3	Distância entre apoios e aplicação de cargas.....	202
4.7.4	Tensões nas camadas externas	204

4.7.5	Ensaio de flexão de provetes de perfil modificado	206
4.8	Fluência.....	211
4.8.1	Análise experimental.....	211
4.8.2	Concepção do equipamento.....	212
4.8.3	Material e condições de ensaio de fluência	214
4.8.4	Resultados experimentais	216
4.8.5	Reflexões sobre o modelo de deformação por fluência	221
Capítulo V	223
Interpretação dos resultados. Modelos.....		223
5.1	– Introdução.....	223
5.2	Modelo para a tracção e compressão de um bi-material.....	225
5.2.1	Variação das propriedades ao longo do eixo de ensaio.....	225
5.2.2	Variação de propriedades paralela ao eixo de ensaio	226
5.2.3	Aplicação do modelo ao comportamento da madeira	228
5.2.4	Considerações gerais	231
5.3	Modelo para a flexão estática	231
5.3.1	Modelos de ruptura por flexão	233
5.3.2	Optimização de perfil para a flexão	239
5.4	Modelo para as tensões de corte	242
5.4.1	Corte transversal num plano transversal	244
5.4.2	Corte transversal num plano paralelo.....	245
5.4.3	Tensões de corte e compressão durante uma solicitação de corte paralelo	246
5.4.4	Tensões de corte criadas por variação das tensões de tracção, de compressão e de momento flector	248
5.5	Modelo de análise de uma ligação entre madeira e outros materiais	249
5.6	Modelo de comportamento à compressão paralela às fibras por efeito de irregularidades da secção resistente	253
5.7	Modelo para o comportamento relativo ao coeficiente de Poisson	256
5.8	Modelo para a compressão transversal	256
5.9	Modelos para o fendimento.	257
5.10	Encastramento de um varão numa peça de madeira	262
Capítulo VI.....		265
Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....		265
6.1	Principais conclusões.....	265
6.2	Desenvolvimentos futuros	267
Bibliografia.....		269
Índice remissivo		273

Índice de figuras

Figura 2.1 - Representação de diferentes modelos de constituição da parede celular.	7
Figura 2.2 – Constituição química da madeira e sequência organizacional da sua estrutura.....	9
Figura 2.3 – Curvas de equilíbrio higroscópico para determinados valores da temperatura. (Gráfico do autor).....	12
Figura 2.4 – Curvas de equilíbrio higroscópico para dois diferentes valores da temperatura inicial. (Gráfico do autor).....	13
Figura 3.1 – Volume elementar representado por um prisma orientado segundo as direcções principais (Adaptado de Branco,1985).....	25
Figura 3.2 – Tensões num plano inclinado em relação ao prisma elementar.....	27
Figura 3.3 – Diagrama circular do estado plano de tensões.....	27
Figura 3.4 – Geometria e dimensões em milímetros, do provete de tracção paralela às fibra da norma ASTM D 143.....	31
Figura 3.5 - Forma do provete e acessório de ensaio, para a determinação da resistência à tracção transversal da madeira, segundo a norma ASTM D143.....	32
Figura 3.6 - Forma do provete de tracção transversal às fibras, segundo a norma NP-621.....	33
Figura 3.7 - Forma do provete de tracção transversal às fibras, segundo a norma EN 408:2003. .34	
Figura 3.8 - Padrões da falha por compressão paralela às fibras, segundo a norma ASTM D 143.	36
Figura 3.9 - Forma de encontrar o valor da carga máxima para compressão transversal, segundo o definido na norma EN 408:2003.	37
Figura 3.10 – Origem das tensões de corte. (a) Tracção em planos paralelos; (b) Compressão em planos paralelos; (c) Diferentes forças não colineares.	39
Figura 3.11 – Equilíbrio das tensões de corte em direcções perpendiculares.	40
Figura 3.12 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo Normas nacionais de países europeus e por uma norma americana.	41
Figura 3.13 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo a norma Europeia EN 408-2003.	41
Figura 3.14 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo (Hiroshi Yoshihara e Akira Matsumoto, 2005).....	42
Figura 3.15 – Dimensões do provete de Iosipescu para ensaio de corte paralelo de madeira, (Liu,1995).....	43
Figura 3.16 – Corte transversal. (a) – Paralelo às fibras; (b) – Transversal às fibras.	44
Figura 3.17 – Distribuição dos esforços, dos momentos e das tensões durante a flexão: tracções, compressões e corte paralelo e transversal. (a) representação física; (b)- modelo das tensões.	45
Figura 3.18 – Decomposição dos momentos flectores na zona de flexão pura.....	46
Figura 3.19 – Efeito da flexão numa secção elementar.....	47
Figura 3.20 – Tensão longitudinal numa secção elementar.	48
Figura 3.21 – Relações geométricas elementares para relacionamento de tensões.....	49
Figura 3.22 – Momento flector e tensões a partir de um extremo.....	50
Figura 3.23 – Decomposição das tensões de uma secção elementar.....	50
Figura 3.24 – Equivalência de tensões no ponto elementar, na zona de compressão.	51
Figura 3.25 – Deformações das superfícies planas transversais nas zonas fronteira da flexão simples.....	51

Figura 3.26 – Deformação da geometria da secção na zona central da flexão pura, por efeito do coeficiente de Poisson.	52
Figura 3.27 - Curva característica relacionando carga/deformação, num ensaio de flexão estática em madeira ou derivados.....	54
Figura 3.28 – Modelos de pormenor das superfícies de contacto entre a madeira e os acessórios de aplicação de carga.....	55
Figura 3.29. – Esquema do ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade. (a) flexão a três pontos; (b) flexão a quatro pontos.	56
Figura 3.30 - Esquema do ensaio de flexão pela norma ASTM D 143.....	57
Figura 3.31 - "Método b" da norma B.S.373 para determinação do módulo de elasticidade à flexão.....	59
Figura 3.32 – Montagem para ensaio de determinação do módulo de elasticidade à flexão pela norma NF B 51-016.....	59
Figura 3.33 - Esquema da curva carga-deformação, e pontos de referência para as cargas e flechas.....	61
Figura 3.34 - Influência da distância entre apoios, no valor do módulo de elasticidade à flexão..	65
Figura 3.35 – Flecha de deformação devida ao peso próprio da viga e devida à carga aplicada... 65	65
Figura 3.36 - Estudo da curva "carga-deformação" para determinação do módulo de elasticidade (ponto A - início da zona recta ou de proporcionalidade).....	66
Figura 3.37 – Esquema da deformação correspondente ao coeficiente de Poisson.	68
Figura 3.38 – Evolução dos valores experimentais do coeficiente de Poisson para materiais compósitos industriais com acentuada anisotropia. (Baer, 2007).	72
Figura 3.39 – Representação das tensões pelo círculo de Mohr.	73
Figura 3.40 – Representação da equivalência de tensões e deformações de um ponto: (a) forças sobre o elemento; (b) deformação e tensões de corte equivalentes; (c) reorientação do elemento com as tensões de corte. (Desenho do autor).	73
Figura 3.41 - Relação entre a deformação elementar e os ângulos em duas figuras simplificadas da Figura 3.37.....	74
Figura 3.42 – Condição ideal de criação de tensão de corte puro à superfície de um cilindro em torção.	77
Figura 3.43 - Ensaio “off-axis” de um material ortotrópico para determinação experimental do módulo de corte, segundo Morozov (2003).	78
Figura 3.44-. Resultados experimentais de dependência da relação E_x/E_1 com o ângulo ϕ , para diferentes materiais compósitos de resina epoxídica, com: (1) fibra de vidro; (2) fibra de aramida (® Kevlar); e (3) fibra de carbono. (Morosov, 2003).....	79
Figura 3.45 - Relação entre a deformação por compressão transversal e a extensão longitudinal. (Desenho do autor).	80
Figura 3.46 – Representação da deformação que aparece associada à definição do módulo de distorção, na deformação por corte paralelo às fibras da madeira.	81
Figura 3.47 – Determinação do módulo de distorção pelo método do vão variável. (Adaptado de EN 408:2003).	84
Figura 3.48 – Geometria do provete Iosipescu para ensaios de corte.	85
Figura 3.49 - Acessório Iosipescu comercial.	86
Figura 3.50 – Modelo das tensões e deformações no ensaio de corte pelo método Iosipescu. (a) – Esquema de aplicação de carga; (b) – Deformada; (c) – Esforços e corte transversal. (Modelo do autor).	87
Figura 3.51 – Padrão da tensão de corte num ensaio pelo método de Iosipescu, analisado pelo método dos elementos finitos (Neumeister, et al., 2004).	88
Figura 3.52 – Dispositivo de Arcan, para ensaio de corte e propriedades elásticas ao corte.....	89
Figura 3.53 – Ensaio de corte “off-axis” para determinação do módulo de corte.	90
Figura 3.54 – Modelo do comportamento puramente elástico.....	92

Figura 3.55 – Modelo do comportamento puramente viscoso.	92
Figura 3.56 – Modelo de Kelvin-Voigt para o comportamento viscoelástico.	93
Figura 3.57 – Modelo de Maxwell para comportamento viscoelástico.	93
Figura 3.58 – Modelo SLS para o comportamento viscoelástico e viscoplástico da madeira.	93
Figura 3.59 – Modelo de Burger para o comportamento da madeira tendo em conta todas as componentes da fluência.	94
Figura 3.60 – Modelo de Burger para o comportamento da madeira tendo em conta todas as componentes da fluência. (Lee, et al. 2004).	95
Figura 3.61 - Exemplo das curvas de deformação por fluência, para diferentes níveis de tensão. (Adaptado de Bodig, 1982).	97
Figura 3.62 - Decomposição da curva de deformação em suas componentes. (Adaptado de Bodig, 1982).	97
Figura 3.63 – Aplicação cíclica de carga e fluência, para duas situações de teor em água na madeira de faia em compressão transversal: (a) teor em água a 0%; (b) Teor em água a 12 %. (Bodig, 1982).	99
Figura 3.64 – Deformação mecânico-sortiva num provete de fibras de papel sob uma tensão constante de 450 MPa, com introdução a partir do tempo 120 minutos, de períodos de 45 minutos de variação cíclica de humidade. (Olsson et al., 2006).	100
Figura 3.65 - Modelo reológico geral para materiais que sofrem fluência (exceptuando casos onde não existe limite de fluência. (Hunt, 1991).	101
Figura 3.66 - Curva de relaxação de tensões: (a) deformação imposta e mantida constante; (b) força de reacção exercida pelo material em função do tempo. (Adaptado de vários autores).	103
Figura 3.67 - Perda de carga por relaxação e componentes da deformação. (a) Diminuição da resposta em força de reacção;(b) Componentes da deformação. (Bodig, 1982).	104
Figura 3.68 – Exemplos das representações gráficas de um dos modelos teóricos da fluência, com diferentes valores atribuídos às constantes a e m. (Figuras do autor).	107
Figura 3.69 – Correções para os raios de curvatura da zona de concentração de tensões. (Beer, 1992).	108
Figura 3.70 – Concentração de tensões atribuídas a um defeito natural da madeira – um pequeno nó e num furo artificial.	109
Figura 3.71 – Coeficientes A e B para determinar a tensão de início de propagação de fenda por efeito de entalhe na madeira (Murphy, 1999).	110
Figura 3.72 – Princípio de Saint-Venant. (Beer, 1992).	111
Figura 3.73 - Perturbação da amarração na avaliação do coeficiente de Poisson.	111
Figura 3.74 – Estado de tensão num ponto segundo diferentes direcções, para uma aplicação plana de cargas. a) Viga de grande altura; b) Viga fina.	113
Figura 3.75 – Critério de análise de falha de von Mises, em duas dimensões, para materiais isotrópicos.	115
Figura 3.76 – Hexágono de Tresca para avaliação de cedência num estado plano de tensão (Beer, 1992).	116
Figura 3.77 – Contorno de Norris para avaliação de cedência num estado plano de tensões (Adaptado de Smith, 2003).	118
Figura 3.78 - Modos de rotura para materiais orientados, relativamente às direcções da força aplicada e dos elementos resistentes. A – tracção paralela; B – corte; C – tracção transversal. ...	120
Figura 3.79 - Equivalência de tensões pelo círculo de Mohr para o critério de Tsai-Hill.	120
Figura 3.80 – Exemplos da distribuição estatística de ensaios de compressão paralela às fibras em pinho bravo. (Tomás Mateus, 1961).	123
Figura 4.1 – Padrões de corte e zonas de origem das amostras.	130
Figura 4.2 – Troncos de eucalipto de onde foram retiradas a pranchas para fabrico dos provetes de ensaio das propriedades mecânicas.	132

Figura 4.3 – Serragem orientadas dos toros de eucalipto, para obtenção de maior número de pranchas de corte radial.....	132
Figura 4.4 – Secagem de pranchas de eucalipto sob condições controladas num secador solar e sob forte restrição mecânica.....	133
Figura 4.5 – Preparação intermédia de provetes para ensaio de tracção paralela às fibras.....	134
Figura 4.6 – Dimensões do provete para ensaio de tracção paralela do pinho bravo.....	134
Figura 4.7 – Rotura por corte paralelo paralelo num ensaio do eucalipto à tracção na direcção paralela às fibras.....	135
Figura 4.8 – Dimensões do provete para ensaio de tracção paralela usado para madeira de eucalipto comum.....	135
Figura 4.9 - Preparação dos provetes desde o corte em barra até à colagem no tubo de ferro. ...	136
Figura 4.10 – Pormenores de montagem de ensaio de tracção paralela. (a) Colagem entre a Madeira e o tubo metálico; (b) Sistema flexível de ligação à máquina de ensaios.....	137
Figura 4.11 - Preparação dos provetes desde o corte em barra até à colagem no tubo de ferro. .	138
Figura 4.12 – Orientação das camadas de crescimento em relação às faces, e diferentes ritmos de crescimento do pinho bravo utilizado nos ensaios de tracção paralela.....	139
Figura 4.13 – Gráfico da tracção paralela do pinho bravo ($\gamma = 470 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Pin3 2004-07-07).....	140
Figura 4.14 – Exemplo de ruptura por tracção paralela do pinho bravo ($\gamma = 470 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Pin3 2004-07-07).....	140
Figura 4.15 – Exemplos das formas de ruptura no ensaio de tracção paralela do pinho bravo, essencialmente por corte paralelo nas camadas de lenho inicial.....	141
Figura 4.16 – Topos representativos das amostras de eucalipto de maior densidade, utilizado para ensaios de tracção paralela.....	142
Figura 4.17 – Topos representativos das amostras de eucalipto de menor densidade, utilizado para ensaios de tracção paralela.....	142
Figura 4.18 – Formas de cedência por corte paralelo entre as camadas de crescimento, por descolamento da ligação entre a madeira e o tubo metálico auxiliar, e ainda ruptura por tracção das fibras.....	143
Figura 4.19 – Gráfico da tracção paralela do eucalipto de média densidade ($\gamma = 710 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Euc.17).....	143
Figura 4.20 – Gráfico da tracção paralela do eucalipto de alta densidade ($\gamma = 960 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Euc. 8).....	144
Figura 4.21- Ruptura frágil do eucalipto de menor densidade, no ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (11)).....	145
Figura 4.22 – Imagem da característica do lenho de menor densidade, correspondente ao ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (11)).	145
Figura 4.23 – Ruptura fibrosa do eucalipto de maior densidade, no ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (10)).....	146
Figura 4.24 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade elevada, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07.05.16-euc01).	147
Figura 4.25 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade elevada, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc06).	147
Figura 4.26 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade média, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc11).	148
Figura 4.27 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade média, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc17).	148
Figura 4.28 – Determinação gráfico do módulo de elasticidade à compressão paralela do pinho bravo.....	151
Figura 4.29 – Gráfico da compressão paralela do eucalipto (Ref. ECP1-R).....	151

Figura 4.30 – Gráfico da compressão paralela do eucalipto. Exemplo das deformações axial e transversal.....	152
Figura 4.31 – Relação das deformações transversal e axial ao longo da compressão.	153
Figura 4.32 – Valores de tensão máxima à compressão paralela do eucalipto, provetes de zonas diferentes de uma mesma prancha.....	154
Figura 4.33 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela do eucalipto, provetes de duas zonas diferentes de uma mesma prancha.	154
Figura 4.34 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais baixa massa volúmica (Ref. 07.11.19-A1).	155
Figura 4.35 – Valor do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de menor massa volúmica (Ref. 07.11.19-A1).	155
Figura 4.36 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D1).	156
Figura 4.37 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D1).	156
Figura 4.38 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo do provetes representativo dos de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D2).	157
Figura 4.39 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo do provete representativo dos de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D2).	157
Figura 4.40 – Ensaio repetido de compressão paralela do eucalipto (dois ciclos completos até uma tensão de cerca de 30 % da de cedência esperada). (Ref. 07.11.19-C2).	159
Figura 4.41 – Padrão típico da zona de ruptura por compressão paralela.....	159
Figura 4.42 – Terminologia utilizada nos ensaios de tracção transversal.	161
Figura 4.43 - Ensaio de ruptura na direcção transversal radial.	161
Figura 4.44 - Ensaio de ruptura na direcção transversal próxima da radial.	161
Figura 4.45 - Provete utilizado para determinação das propriedades elásticas e ruptura na tracção transversal.....	163
Figura 4.46 – Superfície de ruptura da tracção transversal.	164
Figura 4.47 – Registo gráfico das deformações relativas na direcção da tracção transversal aplicada e da deformação relativa na outra direcção (ref.05.01.14.PTT-2r).	164
Figura 4.48 – Evolução da relação entre deformações, ao longo do ensaio de tracção transversal (ref.05.01.14.PTT-2r).	165
Figura 4.49 - Provete modificado com secção reduzida, para ensaios à ruptura da madeira de eucalipto.	166
Figura 4.50 – Modelo de aplicação de carga, para o corte paralelo.	166
Figura 4.51 – Modelo de aplicação de carga, para o corte transversal.....	167
Figura 4.52 – Modelo de aplicação de carga, para o corte por enrolamento.....	167
Figura 4.53 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte paralelo.	167
Figura 4.54 – Dimensões do provete com rasgos, para ensaio de corte paralelo.	168
Figura 4.55 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo relativamente ao plano de corte.	168
Figura 4.56 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo. Tensão de corte numa secção de superfície mais estreita.	169
Figura 4.57 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo. Tensão de corte concentrada numa pequena secção.	169
Figura 4.58 – Relação da tensão de corte com a largura da secção resistente ao corte, nos provetes com rasgo lateral, separando os de planos de corte radial e tangencial.	170
Figura 4.59 – Relação da tensão de corte com a largura da secção ao corte, no provete com rasgo lateral. Todos os provetes de pinho.	170
Figura 4.60 – Representações da simulação do corte paralelo feitas num software de elementos finitos: (a) Provete sem rasgos laterais; (b) Provete com largura de 8 mm da secção resistente.	171

Figura 4.61 – Representações planas da simulação FEM do provetes de ensaio de corte, plano central: (a) Sem rasgos (b) Com rasgos laterais	172
Figura 4.62 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte transversal.	172
Figura 4.63 – Provette de eucalipto após ensaio de corte transversal.	173
Figura 4.64 – Representação gráfica do ensaio de corte transversal da madeira de eucalipto.....	174
Figura 4.65 – Representação gráfica representativa do ensaio de corte transversal do pinho bravo.	175
Figura 4.66 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte por enrolamento.	176
Figura 4.67 – Provette de eucalipto após ensaio de corte transversal por enrolamento.	176
Figura 4.68 – Representação gráfica do ensaio de corte transversal por enrolamento, para o pinho bravo.	177
Figura 4.69 – Provette de pinho bravo após ensaio de corte transversal por enrolamento.	178
Figura 4.70 – Curva típica do ensaio de corte transversal por enrolamento e o módulo de corte.	179
Figura 4.71 – Gráfico auxiliar para determinação dos parâmetros de cálculo do módulo de corte, segundo o procedimento da norma EN 408:2003.	180
Figura 4.72 – Novo provete para determinação do módulo de corte no corte paralelo às fibras.	181
Figura 4.73 – Módulo de corte encontrado por procedimento seguindo a definição teórica e com o novo provete.	182
Figura 4.74 - Provette modificado de pinho bravo para determinação do módulo de corte.	183
Figura 4.75 – Módulo de corte do pinho bravo, obtido com o novo provete.....	183
Figura 4.76. – Provette para ensaio de compressão transversal.	185
Figura 4.77 – Provette de elementos colados para compressão transversal na direcção tangencial.	186
Figura 4.78 – Curva de tensão deformação por compressão transversal do pinho bravo até ruptura.	187
Figura 4.79 – Estado de deformação por compressão transversal do pinho bravo até à carga máxima.	187
Figura 4.80 – Curvas de deformação por compressão transversal. Encurtamento na direcção da força e expansão na direcção perpendicular à da força.	188
Figura 4.81 – Compressão transversal de pinho bravo na direcção radial.	189
Figura 4.82 – Compressão transversal de pinho bravo na direcção radial.	189
Figura 4.83 – Curvas de tensão deformação por compressão transversal. Encurtamento na direcção da força e expansão na direcção perpendicular à da força.....	190
Figura 4.84 – Coeficiente de Poisson resultante do cociente entre a expansão relativa tangencial e a contracção relativa radial, no ensaio de compressão transversal radial do pinho bravo.	191
Figura 4.85 – Esquema de ensaio de compressão transversal com aplicador a meio da face de contacto.	192
Figura 4.86 – Curva de tensão - deformação por compressão transversal do eucalipto.	193
Figura 4.87 – Evolução do valor do módulo de elasticidade à compressão transversal da madeira de eucalipto, em função da tensão de compressão.	195
Figura 4.88 – Montagem para a determinação do módulo de elasticidade global, segundo a norma EN 408:2003.	196
Figura 4.89 – Amostras de eucalipto tiradas sequencialmente de uma mesma prancha na direcção radial completa, para ensaios de flexão.....	197
Figura 4.90. – Perfil de variação do módulo de elasticidade com distância à medula, numa direcção radial (provetes de uma mesma prancha).	198
Figura 4.91 – Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, sequencialmente na direcção radial de uma mesma prancha.	198

Figura 4.92 - Padrão de crescimento de pinho bravo para a séria de ensaios do módulo de elasticidade.	201
Figura 4.93 – Exemplos de diferentes valores do módulo de elasticidade do pinho bravo em função da massa volúmica e outros indicadores visuais.	202
Figura 4.94.- Módulo de elasticidade global em função da relação entre a distância entre apoios e a altura da secção.	203
Figura 4.95.- Medições da deformação relativa da camada superficial no ensaio de flexão.	205
Figura 4.96.- Deformações das camadas extremas no ensaio de flexão de um provete de pinho bravo.	205
Figura 4.97.- Deformação relativa e módulo de elasticidade da camada extrema do lado de cima, no ensaio de flexão de um provete de eucalipto.	206
Figura 4.98 – Valores do módulo de elasticidade global, em provete modificado com abertura de um rasgo lateral.	207
Figura 4.99 – Montagem para o ensaio de flexão do provete com rasgos laterais.	208
Figura 4.100 – Superfície irregular de cedência por corte paralelo no ensaio de flexão.	209
Figura 4.101 – Provete composto para ensaio de flexão, com zona colada a 1/3 do comprimento.	210
Figura 4.102 – Provete composto para ensaio de flexão, com zona colada a 1/9 do comprimento.	210
Figura 4.103 – Montagem da bancada de ensaios de fluência à flexão de um único provete.	213
Figura 4.104 – Detalhe da mesa de ensaios de fluência com o provete de lamelado de pinho bravo.	213
Figura 4.105 – Detalhe da mesa de ensaios de fluência com o provete de lamelado de pinho bravo.	214
Figura 4.106 – Topo do provete M6, de pinho bravo, utilizado no ensaio de fluência de madeira maciça.	215
Figura 4.107 – Resultado do ensaio de fluência na viga em pinho maciço M6, ao fim de um período de 85 dias.	217
Figura 4.108 – Resultado do ensaio de fluência de provetes maciços de pinho bravo, ao fim de um período de 85 dias.	217
Figura 4.109 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.	218
Figura 4.110 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.	219
Figura 4.111 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.	219
Figura 4.112 – Resultado do ensaio de fluência em duas vigas de lamelado colado de pinho bravo.	220
Figura 4.113 – Resultado do ensaio de fluência em três vigas em lamelado colado de eucalipto.	221
Figura 5.1 – Bi-material topo a topo sujeito a tracção pura.	225
Figura 5.2 – Bi-material paralelo sujeito a tracção pura.	226
Figura 5.3 – Tensões e deformações para um bi-material.	227
Figura 5.4 – Constituição em camadas do pinho bravo.	228
Figura 5.5 – Resultado experimental da relação entre o módulo de elasticidade e a textura, em ensaios de tracção paralela de pinho bravo.	229
Figura 5.6 – Modelo teórico da correlação entre o módulo de elasticidade e a textura, para encontrar as propriedades do lenho inicial e do lenho final no pinho bravo.	230
Figura 5.7 – Valor média das tensões de ruptura do pinho bravo na tracção transversal radial e tangencial.	231

Figura 5.8 – Indução de tensões de tracção, compressão e corte em direcções e conforme a localização no elemento submetido à flexão.....	232
Figura 5.9 – Representação das zonas de esmagamento por compressão transversal num ensaio de flexão.....	232
Figura 5.10 – Zona de esmagamento por compressão paralela e transversal num ensaio de flexão de eucalipto.....	233
Figura 5.10 – Início de cedência à flexão por esmagamento por compressão das fibras.....	234
Figura 5.11 – Hipótese de início de falha por tracção paralela.....	234
Figura 5.12 – Tensões transversais após falha por tracção.....	235
Figura 5.13 – Inclinação local do fio da madeira, por motivo de contorno a um nó, dando origem a componentes de tracção transversal à direcção das fibras.....	235
Figura 5.14 – Fractura por tracção transversal no ensaio de flexão, induzida por abertura de um pequeno entalhe.....	236
Figura 5.15 – Indução da falha por compressão, através do corte de um entalhe.....	236
Figura 5.16 – Fractura por compressão no ensaio de flexão, induzida por abertura de um pequeno entalhe.....	237
Figura 5.17 – Concentração de tensões vista por técnica de foto-elasticidade, numa fase de médio carregamento.....	237
Figura 5.18 – Concentração de tensões vista por técnica de foto-elasticidade, numa fase de limite de resistência.....	238
Figura 5.19 – Zona esmagada por compressão (sombreado) e deslocamento da superfície neutra.....	238
Figura 5.20 – Modelo do estado de tensões num ponto perto da superfície, de uma secção em flexão pura, considerando diferentes planos de referência.....	239
Figura 5.21 – Perfil para flexão optimizado, de secção variável com faces curvas.....	240
Figura 5.22 – Secção central do perfil, com largura optimizada para compressão e tracção.....	240
Figura 5.23 – Perfil para flexão optimizado, de secção variável com faces planas.....	240
Figura 5.24 – Perfil para flexão optimizado, de secção variável com faces planas a carga aplicada fora do meio vão.....	241
Figura 5.25 – Parâmetros para cálculo de tensões em viga de perfil optimizado.....	241
Figura 5.26 – Modelo geométrico de barras para representar o fenómeno de corte.....	242
Figura 5.27 – Aparecimento de tensões de tracção transversal numa deformação por corte elevada.....	243
Figura 5.28 – Necessidade de tensões de corte opostas para equilíbrio espacial de um elemento.....	243
Figura 5.29 – Tensões de corte no plano central de um elemento em flexão, na região em que existe esforço transversal.....	244
Figura 5.30 – Esmagamento por compressão numa zona de forte tensão de corte transversal.....	245
Figura 5.31 – Exemplo de aparecimento de tensões de corte por enrolamento num encaixe macho e fêmea de uma régua de soalho.....	245
Figura 5.32 – Tensão de corte paralelo e linhas de igual tensão de compressão.....	246
Figura 5.33 – Imagem de foto-elasticidade para a tensão de corte paralelo em linhas de igual tensão.....	247
Figura 5.34 - Linhas de transmissão da compressão total.....	248
Figura 5.35 – Diferentes intensidades de tensões de corte paralelo, dependendo do maior ou menor gradiente do estado de tensões de compressão normais não uniformes.....	248
Figura 5.36 – Correspondência entre tensões compressão e tracção com o corte paralelo, na flexão.....	249
Figura 5.37 – Montagem para o ensaio de tracção paralela da madeira.....	250
Figura 5.38 – Transmissão da força através de tensões de corte do acessório para a madeira.....	250

Figura 5.39 – Tendência de deslocação diferencial de dois materiais.	251
Figura 5.40 – Linhas de deformação e pontos de concentração de tensões.	252
Figura 5.41 – Linhas de deformação e deslocamentos de material numa análise por elementos finitos.	252
Figura 5.42 – Provetes de compressão paralela, retirados de uma mesma prancha de eucalipto.	253
Figura 5.43 – Modelo concentração tensões na compressão à volta de um furo.	254
Figura 5.44 – Modelo concentração tensões na compressão à volta de um furo.	254
Figura 5.45 – Ruptura por tracção transversal a partir de um furo em compressão.	255
Figura 5.46 – Análise por elementos finitos de concentração de tensões nas imediações de um furo.	255
Figura 5.47 - Modelo das deformações transversais em resultado de aplicação de tensões paralelas às fibras e sua interferência no coeficiente de Poisson.	256
Figura 5.48 - Três fases da compressão transversal e sua relação com a alteração micro-estrutural da madeira (Nairn, 2005).	257
Figura 5.49 – Modos de propagação de fendas adaptado à madeira e às suas direcções ortogonais.	258
Figura 5.50 – Modo I de fractura numa aplicação estrutural de madeira.	259
Figura 5.51 – Influência da localização do plano da fenda na sua facilidade de propagação.	260
Figura 5.52 – Exemplos de ligações numa montagem estrutural de um pavimento.	260
Figura 5.53 – Exemplos de ligações no mesmo plano, numa montagem estrutural de um pavimento.	260
Figura 5.54 - Exemplo de Modo II de fractura, no sentido longitudinal, ligação de uma perna de uma asna com a linha.	261
Figura 5.55 – Tensões de corte e compressão originando a propagação de uma fenda (a) e a correspondente distribuição de tensões (b).	261
Figura 5.56 - Ligações axial entre um elemento metálico e um componente de madeira. Modos de ruptura e soluções de reforço.	263
Figura 5.57 – Solução tradicional de reforço de mastros com anéis metálicos. (Fragata D. Fernando II e Glória).	263

Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Equilíbrio higroscópico (%). Gama de valores mais significativos da relação E.H. – H.R. – T.	12
Tabela 3.1 – Constantes necessárias para definir as propriedades elásticas da madeira segundo (David <i>et al.</i> 1999).....	22
Tabela 3.2 – Relação entre as cinco constantes elásticas dos materiais isotrópicos.	29
Tabela 3.3 – Valores indicativos do Coeficiente de Poisson de alguns materiais.....	69
Tabela 3.4 – Valores indicativos do Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras americanas, a 12 % teor em água (David W. Green, 1999).	70
Tabela 3.7 – Factores de correcção encontrados 88	88
para a lei de Hook aplicada ao corte paralelo, em pinho bravo.....	88
Tabela 3.8 – Valores comparados de módulo de corte (G_{LR}) para a madeira de pinheiro bravo, calculados nos ensaios de Arcan, Iosipescu e “ <i>off-axis</i> ”, no plano de <i>LR</i>	90
Tabela 3.9 - Equações empíricas mais comuns para representar a fluência.....	106
Tabela 3.10 – Relações estimadas entre diferentes propriedades da madeira, para fins estruturais, segundo a norma Europeia EN 384:2002.....	117
Tabela 3.11 – Valores característicos para o pinho bravo, segundo a norma Europeia EN 338:2003, classe de resistência C18.	124
Tabela 4.1 – Ensaios mecânicos realizados em pinho bravo e em madeira de eucalipto.	128
Tabela 4.2 – Exigências mínimas da qualidade do pinho bravo utilizado nos ensaios (adaptadas da norma NP 4305).....	131
Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade à tracção paralela, e coeficientes de Poisson para o pinho bravo.	141
Tabela 4.4 – Ensaios até ruptura à tracção paralela do pinho bravo (valores médios dos ensaios realizados).	141
Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade à tracção paralela, e coeficientes de Poisson para o eucalipto.	144
Tabela 4.6 – Ensaio de eucalipto até ruptura por tracção paralela.	144
Tabela 4.7 – Coeficiente de Poisson na tracção paralela do eucalipto. Média e valores limites (ensaios ref. 03.12.30).	149
Tabela 4.8 – Resumo geral de dos ensaios de compressão paralela do pinho bravo.	150
Tabela 4.9 – Resumo dos resultados de uma série de ensaios compressão paralela de eucalipto, organizado por dois conjuntos de diferentes densidades.....	158
3 300 158	158
> 750 kg/m ³ 158	158
Tabela 4.10 – Resumo geral de todos os ensaios de compressão paralela do eucalipto. Média e valores limites da tensão de tracção.	158
Tabela 4.11 - Tracção transversal do pinho bravo, na direcção radial em lenho adulto. Média e valores limites da tensão de tracção.	162
Tabela 4.12 - Tracção transversal do pinho bravo, na direcção tangencial em lenho adulto. Média e valores limites da tensão de tracção.	162

Tabela 4.13 - Tracção transversal do pinho bravo, lenho juvenil, com camadas de crescimento em direcção inclinada. Média e valores limites da tensão de tracção.	162
Tabela 4.14 - Tracção transversal do eucalipto, em planos indiferenciados. Média e valores limites da tensão de tracção.	165
Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de corte transversal do eucalipto. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.	174
Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de corte por enrolamento do eucalipto. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.	177
Tabela 4.17 - Resultados do ensaio de corte por enrolamento do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.	178
Tabela 4.18 – Módulo de corte do pinho bravo, calculado segundo a norma EN 408:2003.	180
Tabela 4.19 - Resultados do ensaio de compressão transversal do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma EN 408.	191
Tabela 4.20 - Resultados do ensaio de compressão transversal do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma ASTM D 143.	193
Tabela 4.21 - Resultados do ensaio de compressão transversal do eucalipto. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma EN 408.	194
Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de flexão repetido com os mesmos provetes rodados de 180°.	199
Tabela 4.23 – Resultados do ensaio de flexão de um conjunto de amostras de eucalipto.	199
Tabela 4.24 – Resumo e tratamento estatístico dos ensaios de módulo de elasticidade à flexão para a madeira de eucalipto.	200
Tabela 4.25 – Exemplo de variação de rigidez à flexão do pinho bravo, em função da localização numa mesma prancha.	201
Tabela 4.26 – Resumo de valores do módulo de elasticidade à flexão encontrados experimentalmente para o pinho bravo sem defeitos.	202
Tabela 4.27 – Valores do módulo de elasticidade global, módulo de elasticidade local e módulo aparente de elasticidade para o pinho bravo.	204
Tabela 4.28 – Valores do módulo de elasticidade com provete de secção sucessivamente modificada.	207
Tabela 4.29 – Valores do módulo de elasticidade do pinho bravo à flexão com provetes compostos com colagens parciais.	210
Tabela 4.30 – Condições de aplicação de carga permanente da viga de pinho bravo “M6”, para ensaio de fluência na flexão a quatro pontos.	215

Símbolos

Símbolo	Unidades	Nome
ν_{LR}	adimensional	Coefficiente de Poisson axial / radial
ν_{LT}	adimensional	Coefficiente de Poisson axial / tangencial
ν_{RT}	adimensional	Coefficiente de Poisson radial / tangencial
E_f	MPa	Módulo de elasticidade à flexão
$E_{c,L}$	MPa	Módulo de elasticidade à compressão paralela
$E_{t,L}$	MPa	Módulo de elasticidade à tracção paralela
$E_{t,R}$	MPa	Módulo de elasticidade à tracção radial
$E_{t,T}$	MPa	Módulo de elasticidade à tracção tangencial
$E_{c,R}$	MPa	Módulo de elasticidade à compressão radial
$E_{c,T}$	MPa	Módulo de elasticidade à compressão tangencial
K_v	MPa	Módulo de elasticidade volumétrico
G_{LR}	MPa	Módulo de corte axial / radial
G_{LT}	MPa	Módulo de corte axial / tangencial
G_{RT}	MPa	Módulo de corte radial / tangencial
σ_m	MPa	Tensão de flexão
$\sigma_{t,L}$	MPa	Tensão de tracção paralela
$\sigma_{t,R}$	MPa	Tensão de tracção transversal radial
$\sigma_{t,T}$	MPa	Tensão de tracção transversal tangencial
$\sigma_{t,Ob}$	MPa	Tensão de tracção transversal oblíqua
$\sigma_{c,L}$	MPa	Tensão de compressão paralela
$\sigma_{c,R}$	MPa	Tensão de compressão transversal radial
$\sigma_{c,T}$	MPa	Tensão de compressão transversal tangencial
$\sigma_{c,Ob}$	MPa	Tensão de compressão transversal oblíqua
ζ_{LR}	MPa	Tensão de corte paralelo radial
ζ_{LT}	MPa	Tensão de corte paralelo tangencial
ζ_T	MPa	Tensão de corte transversal
CV	adimensional	Coefficiente de variação

Unidades S.I.

As unidades S.I. são as preferencialmente utilizadas, de acordo com a norma Internacional ISO 1000.

Para os ensaios e caracterização de materiais neste trabalho são usadas as seguintes unidades:

Forças e cargas	-	kN; kN/m
Massa volúmica	-	kg/m ³
Tensões e resistências	-	N/mm ² ; (= MPa)
Momentos de flexão	-	kN.m

Glossário / Definições

Nesta secção são apresentadas as definições de características da madeira que se relacionam directamente ou indirectamente com o comportamento mecânico da madeira. Para as características mais relevantes é feita uma breve discussão sobre as suas implicações práticas.

Estas breves notas não substituem as explicações detalhadas feitas ao longo do texto, mas apenas servem para uma primeira abordagem à compreensão do texto durante a sua leitura e antes de chegar aos locais certos.

Termo Português / símbolo	Definição	Termo em Inglês
Coeficiente de Poisson ν (niu)	O coeficiente de Poisson de um sólido é definido como a relação entre a contracção transversal unitária e a extensão longitudinal unitária, durante um ensaio de tracção de um material. Para a maioria dos materiais o coeficiente de Poisson apresenta valores negativos, por influência da própria definição, acontecendo que a um aumento da dimensão longitudinal corresponde uma diminuição da dimensão transversal.	Poisson ratio; Poisson's ratio
CAD	Abreviatura de: Computer Aided Design.	CAD
Dimensão nominal	Dimensão desejada (a um teor em água especificado) e em relação à qual os desvios, que idealmente seriam nulos, estão referidos.	Dimension
Extensão δ (adimensional)	Variação de dimensão linear numa direcção, induzida por uma tensão não necessariamente na mesma direcção. As nove possibilidades de extensões num ponto (três tensões normais e seis tensões de corte, nos três eixos) formam um tensor de segunda ordem.	Strain
Extensão de tracção ϵ	Deformação com aumento da dimensão linear resultante de aplicação de tensão na mesma direcção	Tensile strain
Extensão num ponto	Estado de extensão definida por nove extensões ortogonais (três normais e seis tensões de corte).	Strain at a point
FEA	Abreviatura de: Finite Element Analysis.	FEA
Fio da madeira	Este termo tem vários significados, segundo diferentes autores, mas neste trabalho designaremos o fio da madeira como um conceito geométrico relativo à direcção preferencial das fibras.	Grain
Fluência	Variação da extensão de um material ao longo do tempo quando solicitado por uma acção mecânica constante.	Creep
Fuste	Zona tronco cónica de uma árvore, orientada preferencialmente na vertical e situada entre a base e a copa.	Stam
Lenho	Agregado de células lenhosas.	Wood
Lenho final	Lenho formado no fim de uma estação de crescimento, antigamente designado por lenho de Outono.	Latewood
Lenho inicial	Lenho formado no início de uma estação de crescimento, antigamente designado por lenho de Primavera.	Earlywood
Lenho juvenil	Lenho formado durante o período inicial de crescimento de uma dada secção do fuste. Envolve a medula até cerca da quinta camada de crescimento.	Juvenile wood

Material anisotrópico	Material que apresenta diferentes valores das propriedades mecânicas nas três direcção principais e não apresenta planos de simetria em cada uma das direcções.	Anisotropic material ; (synonym : aeolotropic material)
Material isotrópico	Material para o qual as propriedades mecânicas são independentes da direcção. Tem as mesmas propriedades em todas as direcções	Isotropic materials
Material ortotrópico	Material que apresenta diferentes valores das suas propriedades mecânicas nas três direcções perpendiculares entre si. O material apresenta planos de simetria em cada direcção. Por outras palavras, o valor da propriedade avaliada é dependente da direcção considerada.	Orthotropic material
MEF	Método dos elementos finitos – método numérico para cálculo de mecânica dos materiais, admitindo que um elemento estrutural é composto por um número finito de elementos autónomos em equilíbrio de tensões e deformações, elemento que é feito tender para infinitesimal quando se pretende uma aproximação ao comportamento real.	Finite Element Method - FEM
Módulo de distorção radial / axial G_{RT}	O mesmo que módulo de corte, ou módulo de elasticidade ao corte, num plano definido pelas direcções axial e radial.	Shear modulus
Nós	Os nós são o resultado da presença de antigos ramos que foram englobados na massa do lenho durante o crescimento deste.	Knots
Tensão σ (MPa)	Relação entre uma força e a área sobre a qual tem implicação.	Stress
Tensão de tracção σ	Componente da tensão numa direcção normal e de valor positivo	Tensile stress
Teor de água	Relação, expressa em percentagem , entre a massa de água contida na madeira e a sua massa anidra.	Moisture content
Textura	Consiste na apreciação do arranjo, dimensão e grau de variação dos elementos básicos constituintes do lenho. Para as Resinosas designa-se a textura por uniforme ou homogénea se os anéis de crescimento forem pouco diferenciados e a sua transição for gradual, e por não uniforme ou heterogénea se os anéis de crescimento forem bem diferenciados e existir entre eles uma transição mais ou menos brusca (característica da generalidade das espécies de climas temperados, por exemplo o nosso pinho bravo). Ainda para as Resinosas utiliza-se o termo textura para designar a percentagem de lenho final (Outono) em relação ao lenho total, critério que mais do que o aspecto visual dá indicações sobre a densidade e comportamento físico e mecânico. Para as Folhosas a textura designa-se por uniforme ou homogénea, quando há pequeno ou nenhum contraste entre as camadas de crescimento e não uniforme ou heterogénea, quando o contraste entre as sucessivas camadas de crescimento for marcante. Aparece ainda a designação de textura ou grão para caracterizar o aspecto visual respeitante ao tamanho relativo e grau de variação dos elementos que constituem o lenho, dividindo-se em grão fino ou textura fina, se os poros e raios forem pequenos e estreitos e grão ou textura grosseira se os poros forem grandes e os raios forem largos.	Texture
Valor característico	Valor que tem uma probabilidade preestabelecida de não ser atingido numa hipotética série ilimitada de ensaios, isto é, um quantilho da distribuição da propriedade em causa. O valor característico diz-se inferior ou superior conforme a probabilidade preestabelecida é inferior ou superior a 5% respectivamente.	Characteristic value

(em branco)

Capítulo I

Introdução

1.1 - A Madeira como Material de Engenharia.

A madeira e alguns dos produtos derivados da madeira viram reforçado o interesse pela sua utilização a partir dos finais do século XX e são um material muito prometedora para o século XXI por razões de se tratar de um material renovável e por contribuir positivamente para a conservação ambiental e estabilidade do clima, pelo facto de ser um captador e reservatório natural do principal gás com efeito de estufa que é o dióxido de carbono. Adicionalmente a madeira requer muito pouca energia para a sua transformação em produtos finais e ainda tem um bom desempenho térmico e estrutural de baixa densidade, e finalmente, a facilidade de reutilização e reciclabilidade. A utilização em larga escala da madeira em objectos de longo período de vida útil, como é exemplo a construção, e na condição de proveniência garantida de florestas certificadas e sustentadas, contribui para o sequestro do carbono ao mesmo tempo que evita a utilização de outros materiais altamente consumidores de energia na sua fabricação e, por este motivo, prováveis emissores brutos de carbono para a atmosfera (se a sua produção e transporte dependerem da queima de combustíveis fósseis). Por cada m³ da madeira aplicada estima-se uma fixação de 250 kg de carbono, o que equivale mais ou menos a 1 tonelada de dióxido de carbono retido.

A madeira sendo usada desde a antiguidade, teve no século passado uma perda na sua utilização estrutural por motivo de outros materiais alternativos que eram de preço competitivo se não se tivesse em conta o seu impacto ambiental negativo, mas também, sendo materiais industriais, tinham propriedades mais homogêneas e portanto mais fáceis de dimensionar em projecto. Esta situação alterou-se com a criação de novos e rigorosos regulamentos e normas para a aplicação e projecto em madeira, com a utilização de ferramentas informáticas específicas para o cálculo em madeira. No entanto as ferramentas de software necessitam da introdução de características base dos materiais e mais uma vez a engenharia se deparou com dificuldade em utilizar todo o potencial dos novos sistemas de cálculo, por falta de dados respeitantes às características estruturais da madeira, nomeadamente as constantes elásticas, tensões de segurança, etc. Na pesquisa feita para este trabalho registaram-se referências a esta dificuldade actual de obter os dados de cálculo para diferentes espécies de madeira, diferentes qualidades e

diferentes direcções ortogonais. Esta falta de dados não é só por falta e dedicação de investigadores neste área, mas sobretudo pela complexidade de modelizar um material natural, com elevadíssima variabilidade e com uma microestrutura extremamente complexa. Pelo interesse actual que a madeira volta a despertar, pela constituição de novas equipas de estudo, é de esperar que a madeira venha a ter de novo um lugar de destaque nos materiais usados pela Homem. Este trabalho pretende ser mais uma pequena contribuição no sentido da valorização e melhor utilização deste material.

A importância científica de um modelo é realçada de forma explícita na mais abrangente norma europeia para o dimensionamento de estruturas em madeira, que é o eurocódigo 5, (EN 1995-1-1:2004), onde se afirma no capítulo relativo a “Bases de dimensionamento”, secção “Regras de dimensionamento” - “Os modelos devem ser suficientemente precisos para permitirem a previsão do comportamento estrutural, tendo em atenção a qualidade esperada da execução e fiabilidade das informações em que se baseia o projecto”. O texto anteriormente transcrito realça a importância da interpretação das condições reais numa forma simplificada, mas suficientemente abrangente para permitir a aplicação das regras teóricas gerais da mecânica dos materiais, contribuindo assim para um maior aprofundamento destes conhecimentos, e facilitar a sua vez validação através dos ensaios experimentais. Os modelos não são em si mesmos um fim, mas antes um elo de uma cadeia circular de melhoria contínua de compreensão e mais perfeita simulação da realidade.

1.2 – Objectivo da tese

O objectivo geral deste trabalho consistiu na caracterização, compreensão e modelização do comportamento mecânico da madeira, de modo a permitir o cálculo estrutural mais rigoroso e seguro, potenciando a utilização nobre da madeira para fins estruturais no sentido lato, desde um pequeno componente capaz de suportar uma pequena carga até uma grande estrutura de construção civil. Todo o trabalho experimental incidiu em duas espécies de madeira muito utilizadas em Portugal, o pinho bravo e o eucalipto.

Dentro dos objectivos específicos referem-se as propriedades elásticas e o comportamento à fluência, assim como a análise da influência negativa de defeitos e singularidades da madeira, relativamente ao seu comportamento ideal.

1.3 – Organização da dissertação

Para consecução do objectivo definido, este estudo foi dividido em vários capítulos. O Capítulo I constitui o enquadramento, objectivos e organização do trabalho. No Capítulo II faz-se uma abordagem geral das propriedades físicas e particularidades específicas da madeira com relevância para consecução dos objectivos gerais da tese, ou seja, que de algum modo interferem no comportamento estrutural, e deste modo, na melhor compreensão e desempenho deste material depois da transformação em componentes finais. No Capítulo III destaca-se a recolha de informação existente sobre o comportamento da madeira e a adaptação dos conhecimentos gerais da mecânica dos materiais às especificidades da madeira. O Capítulo IV é inteiramente dedicado ao trabalho experimental, sendo feita a descrição dos procedimentos de ensaio normalizados e os novos procedimentos propostos, a caracterização das amostras de madeira utilizadas, e feita a apresentação gráfica e em tabela dos resultados dos ensaios, assim como o seu tratamento estatístico. No Capítulo V é feita a interpretação dos resultados experimentais, propostos, explicados e discutidos os modelos de comportamento, de modo a melhor representar, compreender e prever o comportamento da madeira, incluindo a influência das suas inevitáveis anomalias e variabilidade, nomeadamente em comparação com os modelos teóricos dos materiais isotrópicos. No Capítulo VI é feito um realce às principais conclusões e a indicação de caminhos para prosseguimento de novas actividades que possam dar sequência a oportunidades de desenvolvimento que foram identificadas mas que as limitações existentes não permitiram concretizar.

No que diz respeito à autoria de citações e figuras, é feita uma referência específica para casos de origem bem identificada. Nas transcrições de conhecimentos gerais e que sofreram já uma interpretação do autor, não é feita uma referência específica. Para as figuras que resultam de modelos novos do autor ou interpretações ainda não exploradas por outras fontes, é indicada a origem como sendo a do autor desta tese.

(em branco)

Capítulo II

Conhecimentos básicos sobre a madeira

2.1 Introdução

Na madeira, como noutros produtos naturais de origem biológica, a caracterização científica de qualquer fenómeno é extremamente difícil, já que não se trata de materiais de constituição química imutável, de arquitectura estrutural invariável, nem de homogênea responsabilidade funcional, donde resulta uma enorme variação de propriedades anatómicas, físicas, químicas e mecânicas.

Resultante de uma prodigiosa actividade vital, a madeira reflecte os "mistérios" biológicos que determinam a sua formação e sintetiza todas as singularidades que personalizam os indivíduos, e maravilhosamente os identificam. De facto, na Natureza, não há duas coisas iguais; há contudo, famílias de coisas. Como tal devem ser assumidos, em termos tecnológicos e de utilização, os materiais naturais.

Não podendo, na sua origem, renegar herança genética, nem superar variações provenientes, o ser fruto da biologia é sujeitar-se ao longo do seu desenvolvimento a vicissitudes tantas e tão diversas que determinam especificidades mais ou menos tangíveis, fortemente personalizantes, de sorte que as madeiras da mesma espécie possuem qualidades bastante díspares, determinadas pelas condições edafo-climáticas, ecológicas e culturais.

Mas as tecnologias, por via de transformações mais ou menos profundas que operam nos materiais de qualquer natureza, criam também "mistérios", nomeadamente no que respeita a respostas físicas e prestações mecânicas, nem sempre suficientemente desvendadas pela ciência ou, ainda, incipientemente explicadas. Contudo, as repercussões de tão subtis singularidades só adquirem expressão relevante nas utilizações finais, onde os fenómenos de tensão podem ser irreversíveis, quer por sua natureza, quer por sua complexidade.

Mesmo quando todo o processo de transformação está terminado e uma peça de madeira se encontra com os seus produtos de acabamento superficial e sem solicitações mecânicas exteriores, sofre ainda a influência do condicionamento ambiental, sobretudo humidade relativa do ar. As variações reflectem-se internamente em alterações dimensionais do tipo retracção ou inchamento, que podem criar em consequência o aparecimento de estados internos de tensões,

mais marcantes quando as peças já fazem parte de um conjunto, portanto com impedimento de se movimentar livremente. Esta reflexão mostra, como no caso dos materiais higroscópicos como a madeira, mesmo sem aplicação de cargas exteriores se pode estar perante estados de tensões complexos e atingindo valores suficientemente altos para provocar alterações irreversíveis (rotura e deformações plásticas).

2.2 Estrutura anatómica da madeira

A madeira é produzida pela árvore por imperativos biológicos e por imperativos estruturais ou de suporte do organismo vivo. Material de natureza essencialmente lenho-celulósica, compete-lhe, de facto, duas funções primordiais. Por um lado, importantíssima componente fisiológica - condução da denominada seiva bruta, soluto aquoso de substâncias minerais, desde o sistema de absorção nutricional (raiz), até ao sistema de elaboração fotossintética, constituído por todos os órgãos verdes da planta, sobretudo pelas folhas, produtos que sintetizados (seiva elaborada) são remetidos para os cones meristemáticos e câmbios vasculares, possibilitando, assim, o alongamento e o engrossamento das diversas componentes da árvore, ou seja, seu efectivo crescimento. Por outro lado, a sustentação do sistema aéreo da planta constituído por fuste e copa, que desempenha cumulativamente a função de armazenamento de metabolitos e de água, durante longos períodos de pouco relevante actividade fisiológica, ou mesmo de repouso. Estes produtos de reserva são extraordinariamente importantes para pronta resposta vegetativa no início de novo ciclo biológico. Existe ainda o produto da especialização funcional de certas células, como acontece com o parênquima resinífero e gomífero.

Quanto à sua estrutura anatómica trata-se de um material eminentemente celular constituído por pequenos elementos histológicos, diferenciados segundo as funções que desempenham.

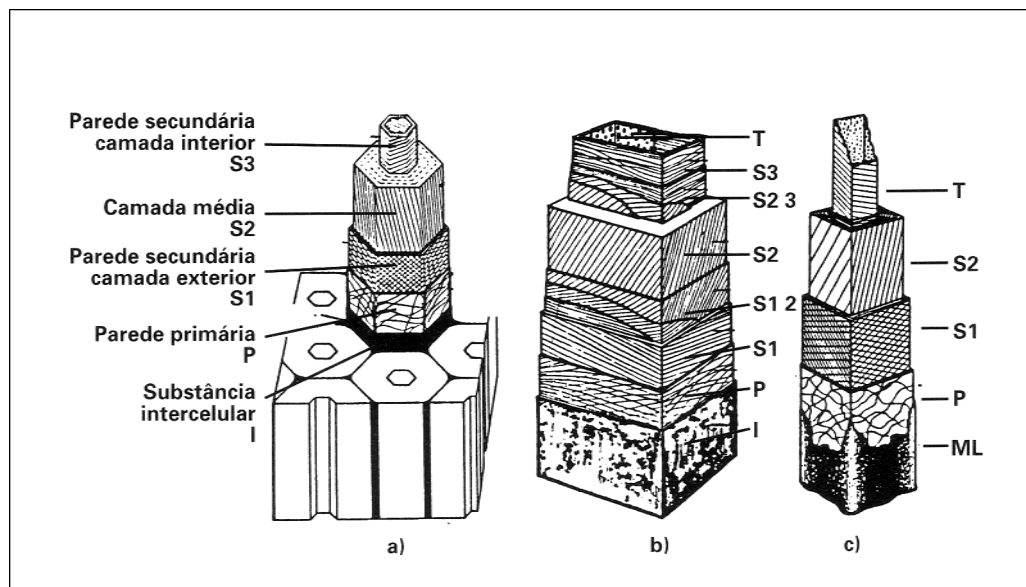
A natureza e a arquitectura dos elementos constitutivos do lenho definem a sua estrutura anatómica, sendo estes elementos e o seu arranjo variáveis com as Espécies, variando também dentro da mesma árvore, com a idade e as condições de crescimento (solo, clima, altitude, etc.).

As madeiras classificam-se em dois grandes grupos, correspondentes a duas subdivisões botânicas - Gimnospérmicas e Angiospérmicas - designados por Resinosas (por exemplo o pinho bravo) e por Folhosas (por exemplo o carvalho). No caso das Famílias menos evoluídas na escala biológica, como acontece nas Resinosas, as células diferenciam-se basicamente em traqueídeos e parênquima, desempenhando aquelas funções de condução de seiva bruta e de suporte, enquanto

o parênquima, constituído por células vivas pouco diferenciadas mais ou menos isodiamétricas, garante a função de armazenamento das substâncias elaboradas no processo de fotossíntese.

No caso das Folhas existe maior especialização, havendo células responsáveis pelo transporte da seiva bruta, elementos esses denominados por vasos, que, em conjunto, podem ser visualizados como longos "tubos" desde a raiz aos cones terminais, enquanto os outros elementos, as fibras, têm função de suporte da árvore. Completam ainda a estrutura células de parênquima e células que estabelecem transição entre dois tipos prosenquimatosos, traqueídeos vasculares e fibrotraqueídeos, (Carvalho, 1993), (Tsoumis, G., 1991) e (Zimmermann, M. H., 1993).

De forma sumária, pode definir-se o lenho (tecido constitutivo fundamental da madeira) como um conjunto de muito numerosas células, elementos caracterizados por uma membrana (parede celular) quimicamente formada sobretudo por celulose, hemicelulose e lenhina, as quais constituem um agregado tubular fundamental, pela maioritária proporção de fibras ou traqueídeos, elementos longitudinais orientados axialmente e com muito íntimas ligações transversais, Figura 2.1. Por seu turno, a parede celular pode configurar-se como feixes de microfibrilas, constituídas por fibrilas elementares de cadeias celulósicas, as quais apresentam zonas de estrutura cristalina e zonas de estrutura amorfa (cadeias celulósicas não orientadas), que ocupam cerca de um terço da dimensão das microfibrilas (Carvalho, 1993).



(Cortesia: Albino Carvalho, 1996)

Figura 2.1 - Representação de diferentes modelos de constituição da parede celular.

As microfibrilas agrupam-se por sua vez em macrofibrilas formando lamelas, que compõem as várias paredes que constituem a parede celular: - parede primária; parede

secundária constituída por três camadas (S1, S2 e S3) e parede terciária, as quais ficam embebidas numa matriz amorfa constituída por hemiceluloses e lenhina, Figura 2.1.

No caso de estudo relacionados com a resistência da madeira, importa considerar aqueles elementos lenhosos que providenciam funções de suporte da árvore, os traqueídeos nas Resinosas e as fibras nas Folhosas. Igualmente a sua importância deriva da sua abundância. Assim, nas Resinosas, os traqueídeos longitudinais constituem 90% do volume total do lenho, enquanto que as fibras compõem cerca de 50% do volume do lenho das Folhosas.

As explicações para o mecanismo de comportamento reológico da madeira têm-se baseado, geralmente, no comportamento dos elementos fibrilares, precisamente por estes serem em grande número, quando comparados com os restantes elementos celulares e pela espessura das suas paredes, o que confere rigidez e resistência ao material face às forças a ela aplicadas ou ao conjunto microfibrilar de celulose-lenhina (Boyd, 1982).

A madeira é assim muitas vezes idealizada como um polímero fibroso com microfibrilas de celulose implantadas numa matriz constituída por um conjunto de compostos amorfos de cadeia curta ou ramificados (lenhina e hemicelulose). A lenhina constitui como que um "cimento biológico", sendo que alguns autores comparam a combinação da celulose e da lenhina à do aço e do cimento no betão armado, correspondendo a acção das microfibrilas de celulose às armaduras metálicas responsáveis pela resistência aos esforços de tracção, enquanto a acção de lenhina seria semelhante à do betão, suportando os esforços de compressão.

Na figura 2.2 mostra-se de forma esquemática a composição aproximada, a crescente organização da constituição da madeira, desde os seus elementos químicos preponderantes, passando pelos compostos intermédios até chegar ao material madeira propriamente dito.

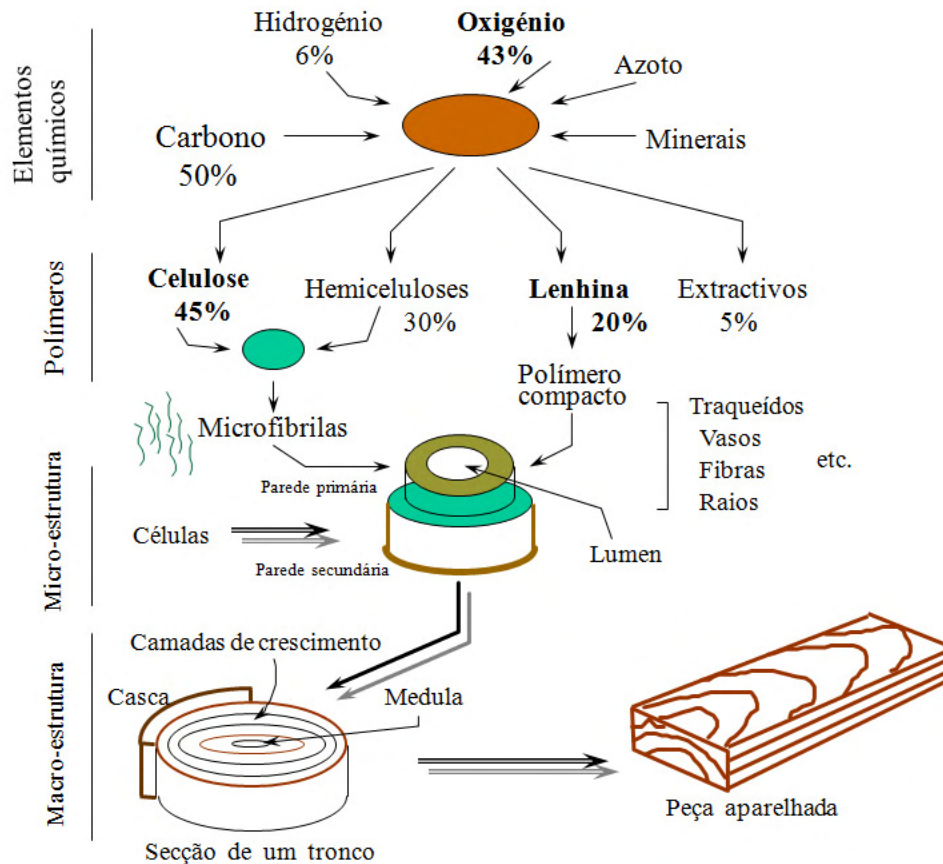


Figura 2.2 – Constituição química da madeira e sequência organizacional da sua estrutura.

2.3 Defeitos da madeira

Os defeitos da madeira são aquelas características indesejáveis quando se projecta uma estrutura ou se fabrica um objecto com finalidades decorativas. Neste sentido, são defeitos os empenos, as fendas, os nós, variações de cor, entre outras. Alguns destas particularidades aqui chamadas “defeitos” são aliás características perfeitamente naturais e normais da madeira retirada de uma árvore, razão pela qual também se lhes atribui a designação de “singularidades”. A madeira podre ou atacada por larvas de insectos, ou com manchas de fungos já são alterações que resultam de algum mau manuseamento e com consequências graves na utilização da madeira. É consensual a opinião segundo a qual se devem chamar singularidades às características que existem e são próprias da madeira (nós, variações de massa volúmica, diferenças de cor entre cerne e borne, etc.), considerando-se defeitos as alterações que poderiam eventualmente ter sido evitadas com

um adequado processamento. Independentemente destes conceitos, para utilizações estruturais, mesmo as chamadas singularidades, como é o caso dos nós, podem fazer diminuir drasticamente o desempenho mecânico. Para estes fins há necessidade de fazer uma classificação por qualidades, que tanto pode ser visual como mecânica. Na classificação visual leva-se em conta a dimensão dos nós, a sua colocação em relação à secção do perfil, ao estado de conservação e aos agrupamentos de nós. Embora não haja madeira sem nós, o seu número, dimensão e estado de sanidade dependem em grande medida das condições de condução florestal, como por exemplo a desramação, o compasso das árvores e a localização em altura e diametralmente no fuste de uma árvore. Há nitidamente uma zona de nós num anel que corresponde à região que em cada momento esteve mais sobre a influência da copa. No processamento de uma árvore adulta (30, 60 ou mais anos) e proveniente de um povoamento bem conduzido, os nós dos toros da zona inferior do fuste estão já numa zona interior, recobertos por madeira limpa, enquanto os toros das zonas mais elevadas, mais perto da copa, apresentam nós maiores e até à superfície.

Para usos industriais são de preferir os primeiros toros após a regularização da perturbação devida ao embasamento (parte junto ao terreno no primeiro toro), e dentro destes, desde as camadas médias até às mais externas, onde se encontra a madeira mais limpa de nós, com crescimento mais regular, cor mais uniforme, menores empenos.

2.4 Propriedades físicas da madeira

Nesta secção abordam-se as propriedades físicas da madeira, que são muito importantes para a madeira, pois têm a ver com o comportamento dimensional, tanto no momento de produção de componentes como em toda a sua vida útil, mas têm também influência na durabilidade a longo prazo, e são também muito relevantes no comportamento mecânico da madeira. As propriedades físicas caracterizam-se por não necessitarem que se actue química ou mecanicamente na estrutura da madeira para avaliação qualitativa e quantitativa. Entre as propriedades físicas, só no referiremos em pormenor àquelas que interferem com as utilizações da madeira e têm relevância no desempenho mecânico, como acontece com o teor em água, a massa volúmica e a retracção/inchamento.

2.4.1 Teor em água

Além de poder conter água no estado livre, nos espaços vazios da sua estrutura, a madeira é um material higroscópico, tende a absorver ou a ceder água conforme as condições de temperatura, estado higrométrico e pressão atmosférica do ar que a rodeia.

O teor em água de uma peça de madeira, expresso em percentagem, é calculado pelo quociente entre a massa de água e a massa de substância lenhosa no estado anidro.

A necessidade e importância do conhecimento, em cada instante, do valor do teor de água, provém da relação que esta propriedade tem com todas as outras, nomeadamente com a massa volúmica, com as variações dimensionais, com as propriedades mecânicas, tecnológicas, entre outros, e da facilidade com que o teor em água varia em forte dependência das condições ambientais a que a madeira esteja exposta.

Com base no que foi dito, pode-se concluir que o valor de teor em água mais conveniente não pode ser dado de uma forma abstracta, mas sim, deve ser o valor para que tenderá no equilíbrio, para as condições médias que vão rodear a peça de madeira durante a sua vida útil. Este valor de teor em água no equilíbrio higroscópico e sua relação com a temperatura e humidade relativa do ambiente circundante aparece habitualmente sob a forma gráfica, com base em valores médios, já que existem diferenças para cada uma das diferentes espécies.

Existem também expressões matemáticas que permitem calcular os valores das humidades de equilíbrio, como definido na norma ASTM D 4933-2004,

$$EH(\%) = \frac{1800}{A} \left[\frac{B \cdot HR}{1 - B \cdot HR} + \frac{C \cdot B \cdot HR + 2 \cdot C \cdot D \cdot B^2 \cdot HR^2}{1 + C \cdot B \cdot HR + C \cdot D \cdot B^2 \cdot HR^2} \right] \quad (2.1)$$

onde,

$$\begin{aligned} &EH - \text{Equilíbrio Higroscópico (\%)}, \\ &HR - \text{Humidade Relativa do ar (\%)}, \\ &T - \text{Temperatura (}^\circ\text{C)}, \\ &A = 330 + 0,452 \cdot T^2, \\ &B = 0,791 + 0,000463 \cdot T - 0,000000844 \cdot T^2, \\ &C = 6,34 + 0,000775 \cdot T - 0,0000935 \cdot T^2, \\ &D = 1,09 + 0,0284 \cdot T - 0,0000904 \cdot T^2. \end{aligned}$$

Na Figura 2.3 são representadas as curvas para determinados valores de temperatura (10°C; 20°C, 30°C e 40°C), observando-se que a influência da temperatura só por si não é muito significativa, pois as curvas apresentam-se bastante próximas umas das outras. Na realidade, o que condiciona verdadeiramente o teor em água da madeira é a humidade relativa do ar. Contudo, para um ambiente fechado, sem trocas de humidade com o exterior, um aumento de temperatura tem um efeito no teor em água da madeira muito ampliado, pelo facto do aumento da temperatura

num ambiente sem alteração do valor de humidade absoluta se reflectir numa diminuição drástica da humidade relativa do ar, como se pode verificar na representação gráfica da Figura 2.4.

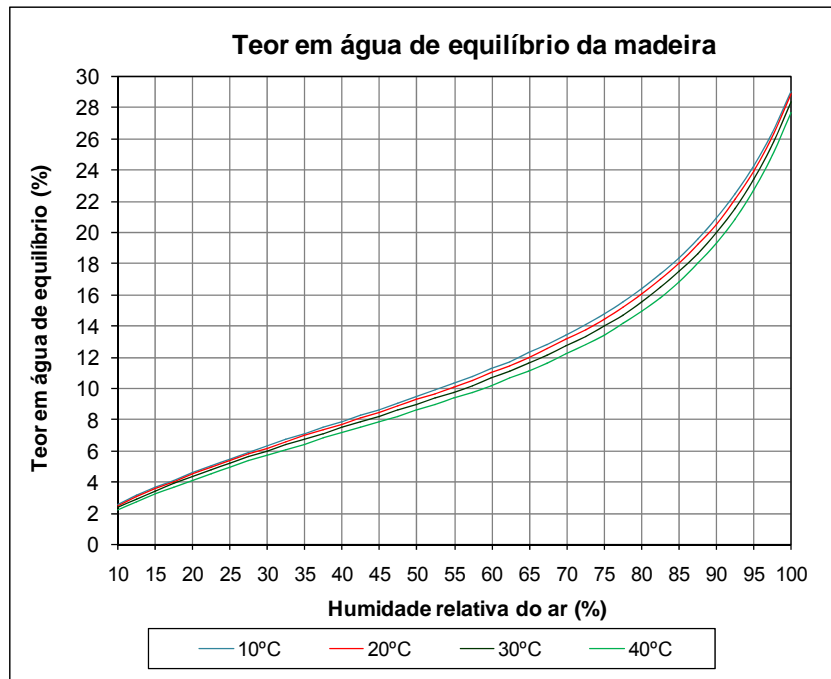


Figura 2.3 – Curvas de equilíbrio higroscópico para determinados valores da temperatura. (Gráfico do autor).

Na Tabela 1.1 apresentam-se alguns valores por forma a uma leitura mais simples do que a que é obtida das curvas da Figura 2.3.

Tabela 1.1 - Equilíbrio higroscópico (%). Gama de valores mais significativos da relação E.H. – H.R. – T.

TEMP. (°C)	HUMIDADE RELATIVA AO AR(%)							
	45	50	55	60	65	70	75	80
5	8,7	9,5	10,4	11,3	12,3	13,5	14,9	16,5
10	8,7	9,5	10,3	11,2	12,3	13,4	14,8	16,4
15	8,6	9,4	10,2	11,1	12,2	13,3	14,6	16,2
20	8,5	9,3	10,1	11,0	12,0	13,1	14,5	16,0
25	8,3	9,1	10,0	10,8	11,8	12,9	14,2	15,8
30	8,2	9,0	9,8	10,6	11,6	12,7	14,0	15,6

Na Figura 2.4 demonstra-se de uma forma inovadora, o efeito da elevação da temperatura num ambiente fechado sem introdução ou retirada de humidade. Cada curva corresponde a uma humidade absoluta constante, que acontece quando nesse ambiente se faz aumentar a temperatura. Nos exemplos parte-se de dois valores diferentes de humidade relativa do ar (90% e 60%) e de dois valores diferentes de temperatura (5°C e 15°C), por serem condições próximas e

prováveis do que pode acontecer na prática. Torna-se assim evidente que o simples efeito de subir a temperatura num ambiente fechado faz diminuir acentuadamente a humidade relativa do ar e consequentemente a humidade de equilíbrio higroscópico da madeira.

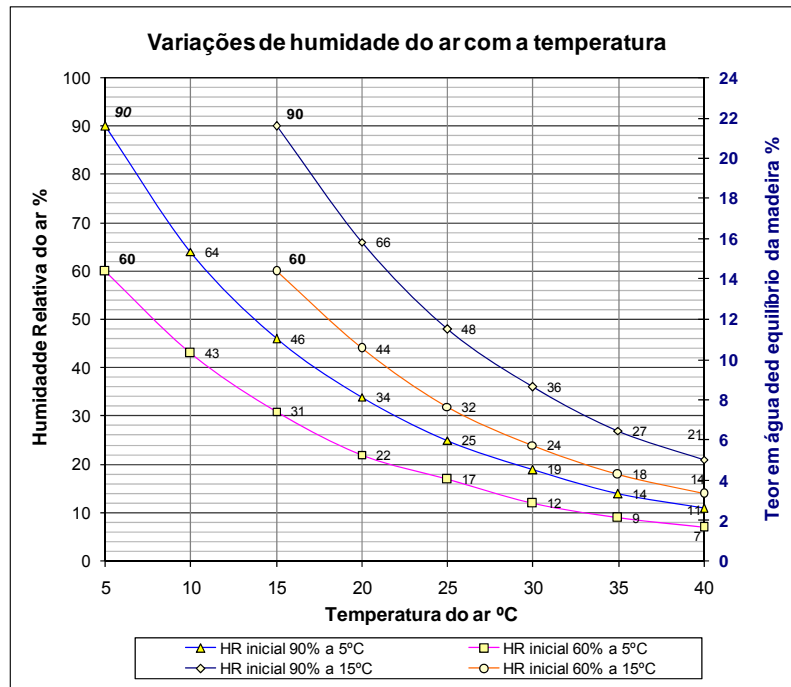


Figura 2.4 – Curvas de equilíbrio higroscópico para dois diferentes valores da temperatura inicial. (Gráfico do autor).

Quanto à exigência do valor do teor em água, para aplicações em carpintaria, esta deve ser em função do equilíbrio médio anual do teor em água do local onde irá trabalhar a obra de madeira, que terá em conta a exposição ao sol, ao vento, à chuva, temperatura do ar e humidade relativa do ar. Para Portugal e de uma forma geral, a madeira seca ao ar e resguardada da chuva estabiliza em valores entre 12 e 16% de teor em água, com limites simultaneamente menores de Norte para Sul. No entanto nos últimos quatro anos (2003 a 2007), por influência de alterações do clima ou apenas à sua variação “aleatória” têm-se registado períodos muito longos de tempo seco e quente, onde os teores em água da madeira descem até valores de 8% ou menos.

Para mobiliário a exigência de teor em água situa-se em valores mais baixos do que para carpintaria, pois em regra aquele será utilizado em interior de habitações, protegido de intempéries, em muitos casos em ambientes aquecidos, o que faz diminuir o valor médio do equilíbrio, que para Portugal e em interiores de habitações, deverá atingir valores médios mais frequentes entre 10% e 12% .

Para climas frios, com grandes condensações de água em forma de neve, sendo as habitações aquecidas, o equilíbrio pode situar-se, durante largos períodos de tempo abaixo dos 10%, pelo que todas as peças do mobiliário devem estar em conformidade com esses valores.

Sendo uma característica de cada espécie e tendo a ver com a sua estrutura interna, a velocidade de adaptação às condições de equilíbrio é muito variável e depende fortemente da forma, relação volume/superfície envolvente e ainda do tratamento dado às superfícies.

Por exemplo, para o pinho bravo que é medianamente permeável à humidade ambiente e em espessuras não muito elevadas (< 25 mm), as condições para que tende em equilíbrio teórico, atingem-se ao fim de relativamente pouco tempo, enquanto que para o eucalipto ou outras espécies densas o tempo para variar de uma condição de equilíbrio a outra pode ser bastante significativo. A explicação para o facto das madeiras mais densas serem também as mais demoradas a fazer as variações de teor em água está na própria definição de teor em água, ou seja, uma mesma variação de teor em água para duas espécies de densidades diferentes, implica uma troca de massa de água maior para a madeira mais densa do que para a madeira menos densa, sendo ainda por cima aquela menos permeável.

2.4.2 Massa volúmica

A massa volúmica indica a massa contida na unidade de volume e as unidades mais comuns para a madeira são, (g.cm^{-3}) e menos frequentemente (kg.m^{-3}).

A massa volúmica varia bastante de espécie para espécie, depende das condições edafo-climáticas, da parte da árvore de onde se retirou a amostra e do teor em água. A madeira dos ramos é normalmente mais densa que a do tronco e a do cerne mais densa que a do borne e a do lenho juvenil menos densa do que todas as outras.

Pelo facto do valor da massa volúmica ser influenciada pelo teor em água deve-se sempre referir o valor deste, ou então, reportar, por meio de determinados cálculos, a um valor designado por massa volúmica de referência, que será a massa volúmica quando a amostra se encontrar a 12% de teor em água, conforme definido na norma Portuguesa NP-616 e muitas outras normas internacionais.

2.4.3 Retracção / inchamento

A retractibilidade é a propriedade que resulta do facto de uma peça de madeira variar as suas dimensões em função da variação do seu teor em água. Designa-se por retracção a diminuição de

dimensões, quando o teor em água diminui e por inchamento, ou entumescimento, o aumento de dimensões quando o teor em água aumenta.

O valor da retracção é diferente conforme a direcção em que seja medida, e é uma característica muito importante ligada a cada espécie e às suas particularidades.

Dentro de uma dada espécie caracterizam-se parâmetros ligados à retracção, como sejam, a retracção na direcção tangencial às camadas de crescimento (que apresentam os valores mais elevados), a retracção na direcção radial (retracções de 1/3 a metade das anteriores), e finalmente a retracção na direcção das fibras, ou axial (apresentando valores muito pouco significativos). Outras relações importantes são os coeficientes de retracção, linear (em cada uma das diferentes direcções) e volumétrico, e ainda a razão entre a retracção tangencial e a radial que dá uma primeira indicação quanto à tendência da madeira para empenar.

2.5 Defeitos e singularidades da madeira

Sendo a madeira um material natural, resultante do crescimento de um ser vivo – planta, traz consigo as características associadas à hereditariedade e apresenta particularidades que derivam das necessidades de evolução da planta que lhe deu origem. Neste sentido designam-se por singularidades as características próprias que individualizam a madeira, como por exemplo os nós, o fio da madeira, o cerne e borne, etc. Algumas destas singularidades são indesejáveis sob o ponto de vista de utilização da madeira como material estrutural, ou apenas no aspecto da sua valorização estética e neste caso passam a considerar-se como defeitos.

Nesta secção são apresentadas as definições de características da madeira, singularidades e defeitos que se relacionam directamente ou indirectamente com o comportamento mecânico da madeira. Para as características mais relevantes é feita uma breve discussão sobre as suas implicações práticas.

2.5.1 Fio da madeira

Este termo tem vários significados, segundo diferentes autores, mas neste trabalho designaremos o fio da madeira como um conceito geométrico relativo à direcção preferencial das fibras.

As sub-divisões mais marcantes são as seguintes:

* fio recto ou fio direito, quando os elementos fibrosos se dispõem mais ou menos rectilíneamente em direcções paralelas entre si e às arestas da peça de madeira;

* fio entrecruzado, quando os elementos fibrosos, orientados numa dada direcção em certa camada de crescimento, mudam bruscamente de direcção na camada seguinte. Este fio origina madeiras mais resistentes mecanicamente, mas de laboração e acabamento difícil nas faces radiais;

* fio espiraldado, quando os elementos fibrosos se distribuem em espiral, ou mais propriamente em hélice, em relação ao eixo da árvore. Esta característica do fio torna a laboração extremamente difícil e originando empenos acentuados;

* fio diagonal, não tem já a ver com o lenho em si, mas sim com a conversão . Trata-se de um desvio de direcção entre os elementos fibrosos e as faces da peça. É um defeito de laboração que muito vem a prejudicar o comportamento da peça, tanto em operações de acabamento, como na estabilidade de forma e resistência mecânica.

2.5.2 Nós

Os nós são o resultado da presença de antigos ramos que foram englobados na massa do lenho durante o crescimento deste, revelando-se nas superfícies das peças com uma coloração muito mais escura e uma forma e dimensão dependentes da orientação dos planos que os seccionam e do seu grau de desenvolvimento no local da secção. Podendo apresentar-se circulares, elípticos, parabólicos e de contornos rectos, caso o plano de seccionamento seja paralelo ao seu eixo. O material que constitui os nós tem aspecto e características bem distintas do lenho circundante, inserindo-se neste de uma forma sensivelmente cónica com o vértice apontado para a medula e fazendo um ângulo mais ou menos recto com o eixo do tronco. Trata-se de um material de características bem distintas, com elevada densidade, orientação das fibras segundo o seu próprio eixo, elevada dureza, elevado teor em extractivos, entre outros.

A presença dos nós na madeira quando esta se destina a fins estruturais representa sempre um defeito, mais ou menos acentuado e grave conforme as suas características e a exigência que se faz na peça de madeira e do tipo de esforço aplicado. Durante a laboração, os nós dão origem a desgaste das ferramentas, desvios nos cortes, arrancamentos de material, entre outros.

Durante a secagem, as diferenças de retracção entre os nós e o material que os rodeia, faz acentuar a sua não aderência ao lenho circundante, podendo mesmo provocar o seu destacamento. A perturbação causada pela presença de um nó vai bastante além dos seus limites, pois existem sempre desvios da direcção do fio, que na sua continuidade tende a contornar os nós, o que provoca uma diminuição da resistência mecânica da madeira, arrancamentos de material durante as operações de laboração de superfícies e prejudica também o aspecto estético.

Nas espécies com muitos nós como pinheiros, pseudotsuga, abeto, espruce, criptoméria e outras, a presença de nós faz-se sentir mais ou menos acentuadamente conforme as condições de formação da árvore. Os nós concentram-se em intervalos mais ou menos regulares, que nas árvores que tiveram um desenvolvimento rápido são mais espaçados do que nas árvores que tiveram um desenvolvimento lento. Também o grau de desenvolvimento e dimensões de um nó depende das técnicas culturais, sendo menos desenvolvidos nas árvores que crescem em povoamentos e com desrames naturais ou artificiais, e de maiores dimensões em árvores que crescem em campo aberto em que os ramos tiveram condições para um desenvolvimento acentuado.

Nas madeiras tropicais e também nalgumas espécies bem nossas conhecidas como os castanhos, carvalhos, choupos e eucaliptos a incidência de nós é menos acentuada ou estão totalmente ausentes por grandes espaços, permitindo tirar destas madeiras peças limpas, largas ou compridas, sem perturbações no comportamento mecânico e ainda fazer-se o desenrolamento e corte plano para extracção de folha de madeira, matériaprima de base para contraplacados e laminados colados (ex. LVL – Laminated Veneer Lumber).

2.5.3 Lenho juvenil

O material lenhoso primeiramente formado numa dada secção do tronco, portanto o que se encontra mais próximo do seu eixo, rodeando a medula, apresenta uma estrutura celular e propriedades diferentes do lenho formado mais tarde. Este lenho formado sob a influência directa da copa tem o nome de lenho juvenil e apresenta menor massa volúmica, menor percentagem de lenho tardio (Outono), maior distância entre anéis de crescimento, e maiores retracções na direcção axial.

Além das diferenças apontadas aparecem outras com grande importância nas utilizações da madeira, concretamente, piores características mecânicas: menor resistência; menor dureza; menor valor do módulo de elasticidade; maior fragilidade. Os valores mais elevados da retracção axial comparativamente ao lenho circundante, tornam as peças com incorporação de lenho juvenil especialmente susceptíveis aos empenos.

Embora haja rigorosa informação sobre as diferenças de calibre e comprimento das células, orientação das microfibrilas, composição química, e outras entre o lenho juvenil e o lenho adulto, os limites do lenho juvenil numa secção são difíceis de definir com precisão, também pelo facto da própria transição ser mais ou menos gradual. Para efeitos práticos pode ser

determinada a macroscopicamente através da observação do ritmo de crescimento, largura dos anéis e percentagem de lenho tardio.

O início de formação de lenho adulto em seguimento ao lenho juvenil dá-se ao fim de um determinado tempo que é muito variável com a espécie e as condições de desenvolvimento da árvore, sendo de 5 a 10 anos os valores mais frequentes para as nossas espécies.

Resumindo, para utilizações da madeira em carpintaria e mobiliário, a madeira de lenho juvenil apresenta alguns inconvenientes, como sejam, empenos mais acentuados devido a maior retracção axial, menor durabilidade natural e menor resistência mecânica. Não obstante estes inconvenientes em muitos casos tem de se aceitar este tipo de material, reconhecendo e aprendendo a solucionar os seus defeitos, pois com tendência para rotações mais curtas na exploração florestal, cada vez aparecerá em maior quantidade. Desde que não tenha ainda um teor em extractivos elevado, apresenta boa aptidão à colagem e a receber produtos de acabamentos, e não tendo fendas presta-se, à fabricação de certos componentes para mobiliário. Deve tentar-se não incorporar nas peças fabricadas a medula.

Estudos levados a cabo por investigadores chineses incidiram muito especificamente nas diferenças de propriedades entre o lenho juvenil e o lenho adulto (F.C.Bao *et al.*, 2001).

Segundo este estudo as diferenças entre o lenho juvenil e o lenho adulto são pequenas ao nível da composição química, mas significativas ao nível morfológico e com grande influência nas propriedades físico-mecânicas. Em geral as diferenças são menores para as Folhosas do que para as Resinosas. O comprimento das fibras e traqueídeos, assim como o seu diâmetro tangencial e radial, são menores no lenho juvenil do que no lenho adulto. As densidades são também menores no lenho juvenil. Todos estes factores fazem com a que a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas sejam afectadas negativamente, segundo aquele estudo.

A perda de propriedades mecânicas na direcção axial, deve-se mais a uma acentuada inclinação da direcção das fibras em relação ao eixo do toro, do que à variação de densidade. Estudo de (Tomás Mateus, 1962), relativos a ensaios de compressão paralela à fibras em pinho bravo de todas as qualidades, demonstraram que a madeira da zona circundante da medula apresentou valores médios significativamente mais baixos de resistência, mesmo inferiores a provetes afectados por grandes nós.

2.5.4 Cerne e borne

O lenho, através dos seus componentes básicos, desempenha durante o crescimento de uma árvore, funções de suporte, de condução de líquidos e de armazenagem de substâncias de reserva,

além de outras funções vitais. No entanto, após um período de tempo não rigorosamente definido, muito variável de espécie para espécie e dependente das condições de desenvolvimento, as células que ainda se mantenham vivas (células de parênquima), vão morrendo e algumas modificações complexas vão dando origem à obstrução progressiva dos seus espaços vazios, traqueídeos (Resinosas) e fibras e vasos (Folhosas), dando-se com a acumulação de substâncias, formação de compostos pigmentados. A este material mais antigo, com o processo de transformação terminado, dá-se o nome de cerne e ao formado mais recentemente dá-se o nome de borne. A transição de borne para cerne não se dá bruscamente e nas espécies em que não haja alteração de cor torna-se por vezes difícil de os distinguir visualmente, havendo necessidade de recorrer a outros indicadores, como a presença em muito maior quantidade de substâncias extractivas e maior massa volúmica no cerne do que no borne. Um processo expedito confirmado pelo autor desta tese consiste em colocar um pingo de água na zona suposta tratar-se de cerne e um pingo na zona que não haja dúvida tratar-se de borne. Se os pingos estiverem verdadeiramente em zonas diferentes, a velocidade da sua absorção pela madeira é acentuadamente diferente.

A presença de elevado teor em extractivos no cerne reduz fortemente a permeabilidade aos gases e aos líquidos, o que dificulta por sua vez os fenómenos da colagem, impregnação profunda de produtos preservadores e recepção de produtos de acabamento superficial.

Embora a durabilidade natural seja muito superior no cerne do que no borne, para mobiliário a usar no interior de habitações, os fabricantes preferem madeira sem cerne pelas vantagens relativas que apresenta e ainda pelo melhor aspecto estético (menos contraste) e maior facilidade de permitir aplicação de diferentes tons de cor.

(em branco)

Capítulo III

Mecânica da Madeira. Revisão bibliográfica.

3.1 Introdução

As propriedades mecânicas e elásticas de muitos materiais homogêneos, também designados isotrópicos, são avaliadas normalmente em ensaios de tracção. No caso da madeira, mesmo tratando-se de amostras sem defeitos, tem de se ter presente que esta é formada, não só por sobreposição sucessiva de camadas curvas concêntricas de dois componentes de densidades diferentes, assim como formada por fibras orientadas numa direcção preferencial. A orientação axial, também designada longitudinal ou paralela às fibras, não é na realidade perfeitamente paralela ao eixo de simetria representado pelo eixo do tronco. O perfil do fuste de uma árvore é em maior ou menor grau um tronco de cone, portanto há uma certa convergência da direcção das fibras em lados opostos da simetria axial. Tendo em conta o que foi referido anteriormente, a informação sobre o comportamento à tracção na direcção paralela às fibras é apenas uma parte da informação total necessária para caracterização mecânica da madeira. A madeira é um exemplo bem representativo de um material anisotrópico.

A nível macroscópico as características físicas e mecânicas da madeira variam regularmente do centro geométrico do tronco para a sua periferia. Para diferentes amostras há a registar a sua diferente massa volúmica que depende em grande parte da proporção relativa das duas diferentes camadas (lenho inicial e lenho final).

Ao caracterizar a madeira de uma forma genérica, para utilização corrente, pode ser suficiente uma avaliação média das suas propriedades recorrendo a ensaios de um elevado número de amostras de dimensões normalizadas. Também os ensaios de provetes com elevada dimensão são satisfatórios a nível de aplicação industrial, pois as variações localizadas à escala microscópica ficam distribuídas aleatoriamente, perdendo importância relativa. Para cálculo em projecto estrutural os valores das propriedades da madeira são obtidos por tratamentos estatísticos com vista a determinar os valores dentro da segurança máxima, como são os chamados “valores característicos”. Estes valores são determinados como sendo os correspondentes ao quinto percentil de uma distribuição normal, como se define na norma europeia EN

Para uma compreensão mais rigorosa do comportamento mecânico da madeira, mesmo da madeira sem defeitos, e para definir os modelos de comportamento, é necessário encontrar as razões pontuais da inevitável variabilidade. Como primeiro passo para elaboração dos modelos devem considerar-se pelo menos três grupos de variáveis: a variação mais ou menos regular devida ao afastamento do centro geométrico das camadas de crescimento, incluindo células diferentes desde o lenho juvenil até ao lenho adulto; o seu raio de curvatura das sucessivas camadas, o que condiciona uma certa distribuição das tensões mecânicas; a espessura relativa de cada uma das camadas. Nos parágrafos seguintes faz-se uma avaliação teórica do efeito da anisotropia da madeira relativamente ao seu comportamento segundo diferentes esforços mecânicos, tanto na direcção paralela às fibras, como nas direcções perpendiculares às fibras. A madeira é um compósito natural, não só no ponto de vista microscópico, considerando os componentes básicos celulose e lenhina, mas também no ponto de vista macroscópico, onde há acentuadas diferenças de propriedades entre o lenho inicial e o final, que conferem à madeira o verdadeiro significado de um compósito ou bi-material, fortes diferenças segundo a direcção de ensaio e ainda diferenças se os esforços forem de tracção ou de compressão, mesmo para uma mesma amostra individual.

Segundo David W. Green *et al.* (1999) para caracterizar uma única propriedade elástica da madeira são teoricamente necessárias 12 constantes, Tabela 3.1, das quais nove são independentes.

Tabela 3.1 – Constantes necessárias para definir as propriedades elásticas da madeira segundo (David *et al.* 1999).

Módulo de elasticidade na direcção paralela às fibras E_0	Módulo de elasticidade na direcção tangencial $E_{90,tang.}$	Módulo de elasticidade na direcção radial $E_{90,rad.}$
Módulo de corte $G_{axial / tang.}$	Módulo de corte $G_{axial / rad.}$	Módulo de corte $G_{tang / rad.}$
Coefficiente de Poisson $CP_{tang / axial}$	Coefficiente de Poisson $CP_{rad. / axial}$	Coefficiente de Poisson $CP_{tang / rad.}$
Coefficiente de Poisson $CP_{axial / tang.}$	Coefficiente de Poisson $CP_{axial / rad.}$	Coefficiente de Poisson $CP_{rad. / tang.}$

Para além do que afirmam os autores da tabela anterior é constatação corrente a diferença que existe entre os módulos de elasticidade à tracção e à compressão, o mesmo acontecendo com os módulos de corte e coeficientes de Poisson. No desenvolvimento experimental, cujos resultados se apresentam mais adiante nesta tese, foram quantificadas as diferenças destes valores à tracção e à compressão, que revelaram alguma variabilidade dentro do mesmo grupo, o que aumenta ainda mais a complexidade de interpretação.

Para estudos de um modelo de comportamento mecânico de materiais ortotrópicos, especificamente aplicado à madeira (Vidal-Sallé, E. e Chassagne, P., 2007) partiram dos

parâmetros mínimos para a definição do modelo tridimensional através do tensor de tensões, que se segue,

$$\text{Tensor} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.2 Mecânica ao nível microscópico

Segundo Mascia (1991), na hipótese de não se considerar nenhuma simplificação nem simetria de um material, o comportamento exacto desse material não é fácil de simular por métodos matemáticos, pois o seu modelo elástico necessitaria da definição de um tensor dependente de 81 constantes, o que em termos práticos é obviamente inviável. Para análise em engenharia é considerada satisfatória a simplificação para nove constantes, no caso de um material ortotrópico e ainda uma maior simplificação para três constantes (E , ν e G), no caso de materiais isotrópicos.

3.3 Elementos micro-estruturais da madeira

Tendo em conta o que foi dito anteriormente, numa abordagem teórico-prática seria já bastante satisfatório considerar nove constantes elásticas para modelizar o comportamento estrutural da madeira, mas na realidade a madeira, com uma simetria circular, apresenta-se como um material composto por uma infinidade de micro-elementos não exactamente iguais entre si, e não exactamente iguais entre diferentes origens, idades, condições de produção e de transformação.

Na madeira há que contar sempre com uma razoável dispersão dos valores medidos para as suas características, devido não só à natural variabilidade genética, mas também à presença mais ou menos aleatória de singularidades e defeitos, dependentes de factores climáticos, bióticos e acidentais.

Como anteriormente referido, um dos elementos predominantes na microestrutura da madeira são as moléculas de celulose, que constituem o principal componente das paredes celulares. A celulose é um polímero linear, que conjuntamente com a hemicelulose, forma as

fibrilas elementares, com cerca de 50 a 80 moléculas de celulose (Bodig, 1982). As fibrilas elementares agregam-se por meio de pontes de hidrogénio em unidades maiores que tomam a designação de microfibrilas, com dimensões entre 3,5 e 10 nm (Bodig, 1982). Pela sua reduzida dimensão as microfibrilas apenas podem ser observadas por meio de microscópio electrónico.

Todos os estudos levam a crer que as microfibrilas desempenham o principal papel na resistência à tracção paralela às fibras, pois estas orientam-se longitudinalmente nas paredes celulares dos lúmens (Resinosas) e das fibras e vasos (Folhosas), segundo uma orientação mais ou menos em hélice alternadamente variável em sucessivas camadas. A aglomeração das microfibrilas e a lamela média entre sucessivas células é constituída essencialmente por um polímero amorfo que é a lenhina, que assim desempenha o principal papel na resistência à compressão paralela e provavelmente um importante papel nas propriedades de coesão transversal.

O elemento macroscópico elementar estrutural da madeira são as células com a designação de lúmens nas Resinosas, e das fibras nas Folhosas. Tanto os lúmens como as fibras orientam-se na direcção do eixo da árvore, ou seja na direcção chamada axial, longitudinal, ou mais propriamente, paralela às fibras, consolidando assim a ideia de uma orientação preferencial e material orientado do ponto de vista da mecânica estrutural.

3.4 Estado de tensão num ponto

A madeira, sendo um material orientado e revelando uma característica marcadamente ortotrópica das suas propriedades mecânicas, obriga a uma aplicação quase sem simplificações das leis teóricas da mecânica dos materiais. Muitas das equações para análise do estado de tensões apresentam-se na sua forma mais complexa. Em todas as análises têm de ser consideradas as direcções principais da madeira, como são a direcção axial (paralela às fibras da madeira), e as direcções transversais (radial e tangencial). Nos esforços de compressão e de tracção puros o modelo do estado de tensões ainda é relativamente simples, mas no caso particular da flexão, a análise das tensões revela-se com bastante complexidade, pois coexistem e interrelacionam-se mutuamente tensões de compressão, de tracção e de corte, com padrões de variação ao longo de um eixo transversal.

Por ser a flexão uma das formas de solitação estrutural mais importantes da madeira, tirando partido da sua natureza fibrosa orientada na direcção longitudinal (paralela às fibras), são os modelos do estado de tensão do ponto, um dos temas mais desenvolvidos ao longo do presente trabalho.

O estado de tensão num ponto pode ser definido por uma matriz do conjunto de tensões que estão presentes, normais e de corte, sendo necessário definir, como foi dito anteriormente, as suas direcções e localização tridimensional na amostra. A simples mudança de direcção a considerar na análise traz como consequência uma alteração dos valores do estado de tensão.

O estado de tensão pode ser representado num elemento de dimensão infinitesimal como se representa na Figura 3.1. Qualquer análise elementar de tensões, nomeadamente no domínio elástico, requer o equilíbrio de tensões, para que não ocorra o seu movimento, dito de outra forma, a resultante de todas as tensões tem de ter valor nulo.

Esta análise da mecânica dos materiais tem, no caso da madeira, uma utilidade bem determinada, pois permite explicar uma parte da variabilidade do comportamento mecânico da madeira, tanto das porções isentas de defeitos, como das zonas na proximidade de nós, fendas, variações locais de densidade e das espessuras das camadas de crescimento, entre outras alterações.

O volume elementar a considerar, por simplicidade de análise e sempre que seja feita uma aproximação ao modelo real, é orientado segundo as direcções principais, Figura 3.1. Mais adiante neste trabalho passar-se-á a associar, para diferentes análises, as direcções principais teóricas da mecânica dos materiais às chamadas direcções principais da madeira (axial, tangencial e radial).

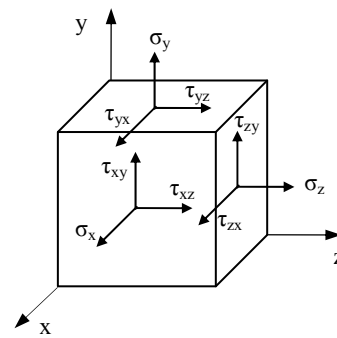


Figura 3.1 – Volume elementar representado por um prisma orientado segundo as direcções principais (Adaptado de Branco, 1985).

Para considerar este volume elementar como sujeito a um estado de tensões não nulo, temos de considerar que as restantes três faces ocultas estão sujeitas a tensões de sinal contrário, por uma questão de equilíbrio espacial, como referido anteriormente. Todas as forças e momentos num corpo em carga, mas em equilíbrio estático, se anulam entre si em cada ponto.

Nesta análise podemos ainda considerar as tensões normais σ como positivas para as tracções, e negativas para as compressões. Para as tensões de corte τ não se torna necessário, para já, definir uma convenção quanto ao seu sinal, positivo ou negativo.

Perante o que foi dito anteriormente, o estado de tensão num ponto genérico no domínio elástico e para um sistema de eixos cartesiano $oxyz$, define-se pela matriz,

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Considerando o equilíbrio das tensões de corte relativamente ao eixo do zz teremos,

$$\tau_{yx} d_x d_z d_y = \tau_{xy} d_y d_z d_x \quad (3.3)$$

que simplificada dá, $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ como era de esperar, e do mesmo modo,

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} , \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} , \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (3.4)$$

ficando as componentes do estado de tensões reduzidas a seis. Esta mesma conclusão é obtida por resolução de uma equação desenvolvida por (Branco, 1985), tendo como partida o equilíbrio de momentos em relação a cada um dos eixos, no caso tridimensional.

No caso de uma viga em flexão num plano yz as componentes em xx ficam anuladas pelo que a matriz do estado de tensões se simplifica para 3 parâmetros, uma vez que $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

$$\left\{ \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{zy} & \sigma_z \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

Considere-se agora a necessidade de determinar as tensões em qualquer direcção do volume elementar, que será sempre possível desde que se conheçam as 6 tensões da matriz (3.2) simplificada, ou para a flexão num plano as 3 tensões da matriz (3.5). Teríamos portanto, a partir da Figura 3.1, e considerando apenas as componentes de tensão no plano yz , a inclusão de um plano com um qualquer ângulo α , como representado na Figura 3.2.

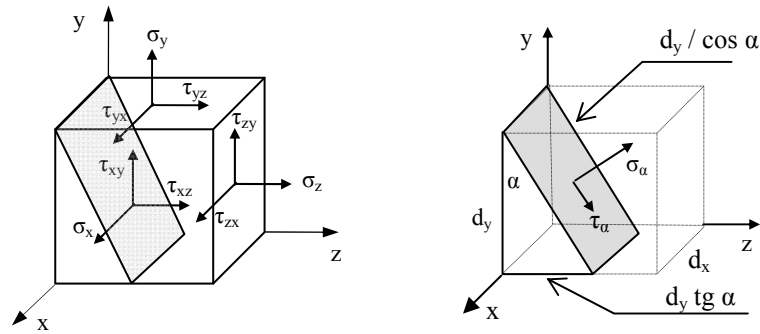


Figura 3.2 – Tensões num plano inclinado em relação ao prisma elementar.

Transformando as tensões do plano inclinado α em forças, Figura 3.2, e projectando estas nas direcções zz e yy , aqui consideradas principais, temos, por exigências de equilíbrio,

$$\sigma_{\alpha} dx \frac{dy}{\cos \alpha} = \sigma_z \cdot dx \cdot dy \cdot \cos \alpha + \sigma_y \cdot dx \cdot dy \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (3.6)$$

e,

$$\tau_{\alpha} dx \frac{dy}{\cos \alpha} = \sigma_z \cdot dx \cdot dy \cdot \operatorname{sen} \alpha - \sigma_y \cdot dx \cdot dy \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha \quad (3.7)$$

depois de simplificadas, estas equações dão,

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_z \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_y \cdot \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (3.8)$$

e,

$$\tau_{\alpha} = (\sigma_z - \sigma_y) \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \alpha \quad (3.9)$$

Após tratamento deste sistema de equações é possível tê-lo na forma da equação de uma circunferência com centro num ponto $(\sigma_z + \sigma_y)/2$ da origem, conforme representado graficamente na Figura 3.3. Esta representação é o diagrama circular do estado plano de tensão, mais conhecido pelo círculo de Mohr.

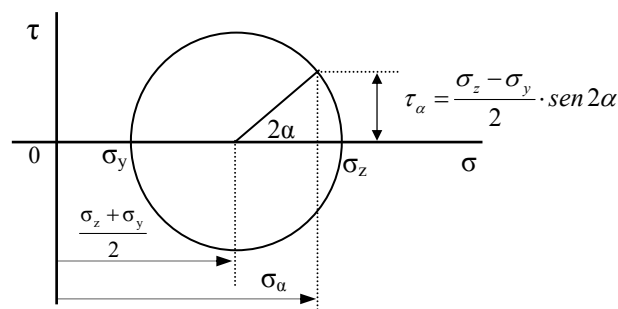


Figura 3.3 – Diagrama circular do estado plano de tensões.

Como se pode verificar pela representação da Figura 3.3 a tensão de corte máxima ocorre para um ângulo $\alpha=45^\circ$, sendo este valor de,

$$\tau_{\max} = \tau_{45} = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \quad (3.10)$$

3.5 Relações matemáticas entre propriedades elásticas

Numa fase inicial do projecto estrutural existe uma necessidade de conhecer os limites de resistência dos materiais aos vários esforços, mas na utilização prática dos materiais o que está permanentemente em jogo são as propriedades elásticas, pois é dentro destes limites que se encontra a optimização e utilização segura dos materiais.

Os modelos matemáticos necessitam, para sua aplicação prática, do conhecimento de várias propriedades dos materiais. Na prática, a validação dos modelos matemáticos tem de passar pela utilização de todas as variáveis, independentes ou dependentes, que provenham de dados experimentais das diferentes solicitações mecânicas em todas as direcções ortogonais. No caso dos materiais isotrópicos muitos dos parâmetros se simplificam, sendo apenas necessário um reduzido número de ensaios mecânicos laboratoriais, obtendo-se os restantes por relações matemáticas e equivalências.

Para definir as características elásticas dos materiais isotrópicos há três constantes que têm uma importância fundamental para a modelação do comportamento mecânico e conseqüentemente para o cálculo em projecto, nomeadamente em elementos finitos, que são o módulo de elasticidade (E), o módulo de corte (G) e o coeficiente de Poisson (ν). O módulo de corte pode ser relacionado com E e ν , ver Tabela 3.2. Por outro lado estas constantes encontram-se matematicamente relacionadas com outras duas propriedades elásticas, o módulo de elasticidade volumétrico (K), “bulk modulus” na bibliografia de língua inglesa, e a constante de Lamé (λ), como se pode também ver na Tabela 3.2. Para os materiais isotrópicos estas constantes, estão bem estudadas e documentados os seus valores na bibliografia da mecânica dos materiais.

Tabela 3.2 – Relação entre as cinco constantes elásticas dos materiais isotrópicos.

Dados de entrada	Dados de saída				
	Módulo de elasticidade E	Coefficiente de Poisson ν	Módulo de corte G	Módulo de elasticidade volumétrico K	Constante de Lamé λ
E, ν	-		$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E}{3(1+2\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
E, G	-	$\frac{E-2G}{2G}$	-	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	$\frac{G(K-2G)}{3G-E}$
E, K	-	$\frac{3K-E}{6K}$	$\frac{3KE}{9K-E}$	-	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$
E, λ	-	$\frac{2\lambda}{E+\lambda+R}$	$\frac{E-3\lambda+R}{4}$	$\frac{E+3\lambda+R}{6}$	-
ν , G	$2G(1+\nu)$	-	-	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$
ν , K	$3K(1-2\nu)$	-	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	-	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$
ν , λ	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	-	$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$	$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	-
G, K	$\frac{9KG}{3K+G}$	$\frac{3K-2G}{6K+2G}$	-	-	$\frac{3K-2G}{3}$
G, λ	$\frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	-	$\frac{3\lambda+2G}{3}$	-
K, λ	$\frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda}$	$\frac{\lambda}{3K-\lambda}$	$\frac{3(K-\lambda)}{2}$	-	-

Fontes: (Beer, 1992); e (Branco, 1985).

Naturalmente que no caso da madeira, que não é um material isotrópico as relações ou modelos matemáticos acima descritos não podem ser aplicados com rigor, embora se recorra a estes dados se não houver outra fonte de informação ou falta de dados experimentais.

Tendo em conta que G, K e λ têm de ter valores superiores a zero e menores do que infinito, deduz-se das equações,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.11)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.12)$$

e

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.13)$$

então terá de verificar-se,

$$-1 < \nu \leq \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

3.6 Tracção paralela às fibras

A tracção paralela às fibras é a característica que confere maior potencial de utilização da madeira para finalidades estruturais, desde uma grande estrutura de construção civil até aos mais pequenos objectos, desde que a resistência a esforços mecânicos seja uma exigência.

A madeira é um material orientado, onde quase todos os elementos constituintes se orientam na chamada direcção paralela às fibras, que é a direcção do eixo do tronco das árvores e também dos seus ramos.

Para avaliação desta característica as normas nacionais e internacionais definem dimensões e desenhos de provetes, mais ou menos elaborados, pelo facto de ser difícil conseguir a ruptura por tracção antes que esta ocorra devido a outros tipos de esforços a que a madeira é marcadamente sensível e que aparecem inevitavelmente nos pontos de amarração. Mesmo as tentativas de estreitamento da secção na zona preferencial de ruptura nem sempre são bem sucedidas quanto ao seu objectivo para espécies com valores de resistência muito elevados.

A norma ASTM D 143 define para o ensaio de tracção paralela um provete com um elevado comprimento total para permitir transmitir toda a força de tracção a uma pequena zona de ensaio de secção rectangular de $9,5 \times 4,8 \text{ mm}^2$, num comprimento de 63,5 mm, Figura 3.4. Nesta zona são medidas com rigor as dimensões e são colocados extensómetros de precisão de modo a chegar-se às determinações das características elásticas, módulo de elasticidade, tensão limite de elasticidade, tensão de cedência ou de ruptura, entre outros. As reduzidas secção e comprimento de referência limitam o estudo quanto à influência conjunta de lenho inicial, final e inclusão de defeitos, aumentando a variabilidade dos resultados. Nesta norma exige-se uma precisão dos instrumentos de medição da extensão de 0,002 mm, com a carga de tracção aplicada correspondente a uma velocidade de 1 mm por minuto.

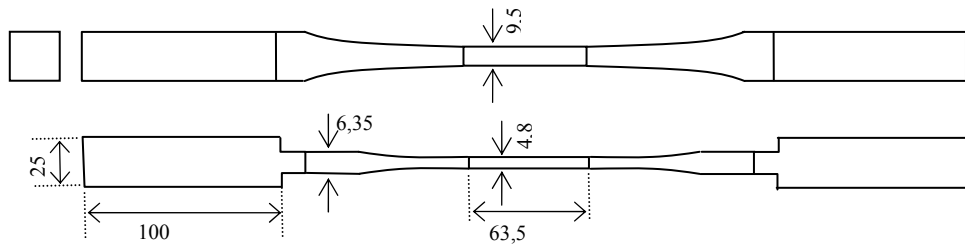


Figura 3.4 – Geometria e dimensões em milímetros, do provete de tração paralela às fibra da norma ASTM D 143.

A norma EN 408:2003 está especialmente vocacionada para determinação das características de madeiras para estruturas e componentes estruturais em dimensão real. Nesta norma não estão definidas dimensões específicas para o ensaio de tração paralela, mas antes dá-se a indicação de que os componentes e amostras devem ser ensaiados na sua dimensão real. Este facto levanta enormes dificuldades em encontrar sistemas adequados de amarração e a disponibilidade de forças para ensaio de fortes secções. O sistema de amarração sugerido assemelha-se a uma dupla cunha de aperto ligada ao sistema de tração, de modo que quanto maior for a tração maior a força de aperto transversal. A própria norma deixa ao critério de cada laboratório a liberdade de encontrar o sistema de amarração mais adequado com a única exigência de este ser claramente identificado e descrito no relatório de resultados. A precisão exigida para a carga é de 1 % da carga máxima necessária para terminar o ensaio. Para a determinação do módulo de elasticidade a precisão da medição da deformação deve ser menor do que 1 % da deformação de ensaio, ou de 0,02 mm para deformações menores do que 2 mm e a velocidade de aplicação de carga não deve ser superior a 0,00005 mm por cada mm de comprimento, em cada segundo (do que resultaria uma velocidade de metade da velocidade definida pela norma ASTM, se aplicado ao provete desta norma). Para determinação da tensão de ruptura à tração a norma europeia define que o ensaio até à ruptura tem de ter lugar entre 300 ± 120 segundos.

Para cálculo quer do módulo de elasticidade quer para a tensão de ruptura são seguidos em todas as normas as definições teóricas, em que o módulo de elasticidade corresponde à relação entre a tensão e a deformação relativa correspondente, na zona de proporcionalidade, e a tensão de ruptura sendo o quociente entre a força máxima aplicada e a área inicial da secção resistente, muitas vezes designado de secção nominal.

A dificuldade em encontrar uma forma fácil e eficaz de realizar o ensaio de tração paralelo às fibras da madeira ajuda a justificar a falta de dados na bibliografia consultada e nas

fichas tecnológicas das madeiras, relativamente a esta propriedade. Em face do que foi referido anteriormente também neste trabalho se deu uma particular ênfase ao ensaio de tracção, com a proposta de uma nova metodologia que se encontra detalhadamente explicado no capítulo dedicado ao desenvolvimento experimental.

3.7 Tracção transversal

A tracção transversal é a característica das madeiras que apresenta valores mais baixos de resistência, razão pela qual deve merecer uma atenção especial durante a fase de cálculo de estruturas. É uma característica relativamente simples de avaliar em laboratório e, tal com outras, teve em diferentes normas diferentes abordagens quanto à geometria dos provetes de ensaio.

Os procedimentos descritos em diferentes normas sobre o ensaio de tracção transversal têm sempre como finalidade encontrar uma superfície onde seja transmitida uma tensão uniformemente distribuída, na direcção perpendicular às fibras, aumentando-se gradualmente a tensão até ruptura do material. Para conseguir avaliar a tensão máxima desta característica foram pensadas diferentes abordagens, nomeadamente através de diferentes geometrias dos provetes. A norma ASTM D143 estabelece um provete com base num paralelepípedo de $5 \times 5 \times 5,5 \text{ mm}^3$, no qual são abertos dois furos que atingem duas faces laterais e que se destinam a permitir a colocação dos acessórios metálicos que aplicam a força de tracção, Figura 3.5.

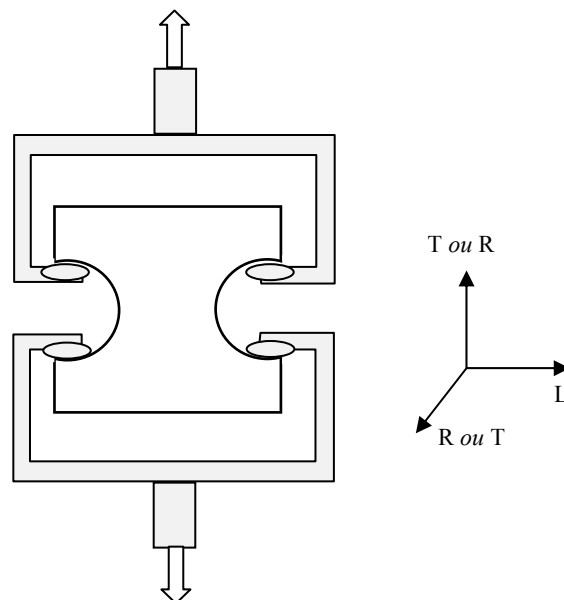


Figura 3.5 - Forma do provete e acessório de ensaio, para a determinação da resistência à tracção transversal da madeira, segundo a norma ASTM D143.

A norma portuguesa e outras normas nacionais (francesa e espanhola entre outras), recomendam a realização do ensaio de tracção transversal e de fendimento com um tipo de provete muito elaborado, difícil e demorado de preparar, Figura 3.6. Neste provete a área da secção à tracção transversal às fibras é de $20 \times 20 \text{ mm}^2$, sendo fabricado através de uma barra de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ de secção, material acessível através de pranchas finas ou amostras de pequenas dimensões.

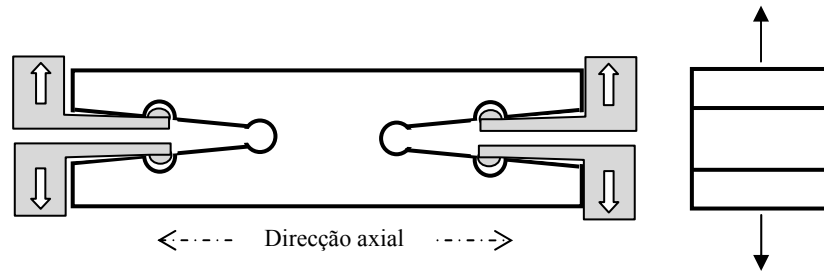


Figura 3.6 - Forma do provete de tracção transversal às fibras, segundo a norma NP-621.

Estas formas anteriormente descritas, que permitem o encaixe de acessórios para aplicar a tracção, têm a vantagem de permitirem a realizar os ensaios de imediato após corte dos provetes e a utilização de um único acessório, possibilitando a realização de ensaios em sequência. Embora o largo raio de curvatura dos encaixes cilíndricos interiores na norma ASTM tenda a reduzir o efeito de concentração de tensões, o formato estrangulado mantém o inconveniente de quase imposição da ruptura se dar na zona de menor secção. Na norma portuguesa e outras, Figura 3. , os furos no extremo da área a considerar para a tensão de tracção são de pequeno diâmetro, pelo que os efeitos perturbadores das concentrações tensões deverão fazer-se sentir mais acentuadamente.

Para determinação das propriedades elásticas ambos procedimentos apresentados revelam grandes limitações ao nível da medição da extensão no sentido da tracção e das deformações transversais à direcção da força aplicada.

A norma europeia EN 408:2003 estabelece um provete com forma geométrica simples de 6 faces planas, o que se torna bastante fácil de fabricar em série e em qualquer direcção relativa das fibras. Para amarração a norma europeia recomenda a colagem, em duas faces opostas, a acessórios metálicos, com uma cola suficientemente forte para que a ruptura se dê pela madeira. Tal é quase totalmente conseguido com uma boa preparação das superfícies e escolha adequada da cola. Nos ensaios em que a cedência se dê pela interface madeira – acessório, estes resultados não são considerados para o tratamento estatístico. Esta norma não dá qualquer informação relativa à forma e dimensões dos acessórios auxiliares, assim como é deixada alguma liberdade

para escolher as dimensões do provetes de madeira de acordo com as necessidades específicas de cada estudo. Para elementos estruturais são definidas as dimensões de $45 \times 70 \text{ mm}^2$ (o lado maior na direcção das fibras) e altura do provete de 180 mm. Esta última dimensão permite a aplicação de sistemas de medição da deformação (extensómetros), mas os pontos de contacto com a madeira não devem estar a uma distância dos extremos do provete, inferior a um valor correspondente a $1/3$ da menor largura da secção. Esta exigência tem a ver com a necessidade de se medirem a deformações na zona de tensão uniformemente distribuída, segundo o princípio de Saint Venant.

Para a norma europeia EN 408:2003, vocacionada para o ensaio de componentes estruturais em madeira, a dimensão do provete corresponde a uma secção rectangular de $70 \times 45 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 180 mm, sugerindo-se para fixação à máquina de ensaio, a colagem dos lados do provete de madeira a acessórios metálicos, que de forma mais simples se ligam aos barramentos da máquina de ensaio, Figura 3.7. Para avaliação das características elásticas define-se a aplicação de um equipamento de avaliação da força com uma precisão de pelo menos 1 % da carga máxima. A deformação deve ser avaliada com uma precisão de 1 % da deformação média esperada, numa distância de referência de 60 % da altura do provete e lateralmente nunca a menos de $1/3$ da dimensão do menor lado da secção rectangular.

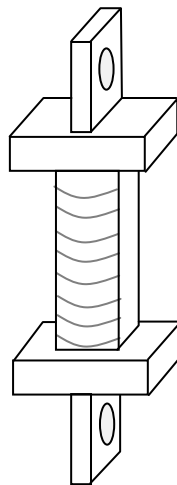


Figura 3.7 - Forma do provete de tracção transversal às fibras, segundo a norma EN 408:2003.

3.8 Compressão paralela

A norma ASTM D 143 define dimensões preferenciais para os ensaios de compressão axial ou compressão paralela às fibras, como sendo $50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$ ou $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}^3$, dimensões da secção e comprimento, respectivamente. O ensaio com secções muito fortes como é o caso de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ é útil a nível estrutural para retirar valores práticos para a engenharia de projecto,

pois contemplam normalmente madeira no seu estado natural, incluindo portanto pequenos defeitos e singularidades como nós, desvios do fio, pequenas fendas e materiais diversos não especificados como cerne, borne, lenho juvenil e medula. Estes ensaios com grandes provetes não são bons para o estudo das propriedades a nível de conhecimento detalhado das propriedades da madeira. Para tal são mais úteis os ensaios com provetes de menores dimensões, por exemplo 25 x 25 x 100 mm³ ou mesmo menores. As normas Europeias mais recentes, como a norma EN 408:2003, relativamente ao ensaio de compressão, entre outros, não define uma dimensão bem determinada, deixando ao critério de tipo de estudo em curso, mas define a geometria básica dos provetes e dimensões relativas entre a secção e o comprimento. Especificamente para o ensaio de compressão define-se a secção quadrada e um comprimento de 6 vezes o lado da secção. Desta forma o provete não é suficientemente esbelto para se criar o efeito da encurvadura, mas é suficiente longo para aplicar extensómetros fora da zona de influência dos topos, pois pelo critério de Saint Venant a zona de tensões uniformemente distribuídas em toda a secção acontece a partir de uma distância de 1,5 a largura da secção, em relação aos apoios.

Outro aspecto importante também focado nas normas é a necessidade de paralelismo tão rigoroso quanto possível entre as duas superfícies dos topos e a perpendicularidade com as superfícies longitudinais. Uma forma de contornar algum pequeno desvio de paralelismo e assim facilitar uma distribuição uniforme de pressão é usar um acessório metálico de cabeça semi-esférica, aplicado a um dos topos. Na norma europeia EN 408:2003 estabelece-se que este dispositivo seja imobilizado à rotação após uma primeira fase de adaptação à superfície do provete.

A velocidade de aplicação da carga também influencia o resultado das deformações relativamente ao valor da força aplicada. Deste modo as normas regulamentam velocidade, que para a norma ASTM D 143 é de 3/1000 mm por cada 1 mm de comprimento, em cada minuto, ou seja, para um provete de 100 mm de comprimento uma velocidade de 0,3 mm por minuto. A norma Europeia define que a carga máxima deve ser atingida entre 300 ±120 segundos. Na prática estas regras estabelecem que a tensão máxima não é atingida antes dos 3 minutos, o que garante contemplar a forte contribuição da deformação visco elástica deste material, mas não entrar no domínio da fluência.

Sabendo-se que o teor em água interfere nas propriedades mecânicas, este parâmetro deve ser controlado e registado. Embora as normas não obriguem que os ensaios sejam realizados a valores bem definidos do teor em água, está implícito que caso não haja necessidade de outras condições, deverão prevalecer os valores padrão de 12 % ± 2 %.

Dos ensaios de compressão paralela às fibras obtêm-se os valores da tensão máxima ou de cedência, o módulo de elasticidade, o limite máximo de elasticidade e a deformação máxima até ao limite elástico ou até à tensão máxima.

A ruptura por compressão não se dá por uma separação em duas partes do provete, mas acontece na grande maioria dos casos um enrolamento das fibras sobre si próprias como se de um fio se tratasse. A superfície por onde acontece a cedência, a sua forma, orientação e posição são indicativas das próprias propriedades ou defeitos da madeira em estudo.

A norma ASTM D 143 faz uma detalhada análise da forma de ruptura por compressão Figura 3.8, definindo os casos mais expressivos e dando uma explicação para as causas. São assim definidas como: a) esmagamento - quando o enrugamento das fibras se dá num plano paralelo aos topos e afastado destes; b) em cunha – quando um ou dois planos são inclinados e por vezes em direcções preferenciais quer tangencial quer radial; c) por corte – quando o plano ou planos se apresentam com ângulo superior a 45°; d) fendilhado – quando aparece uma grande fenda de separação entre as fibras; e) compressão e corte; f) em escova ou enrolamento superficial – quando as fibras se dobram na superfície de contacto.

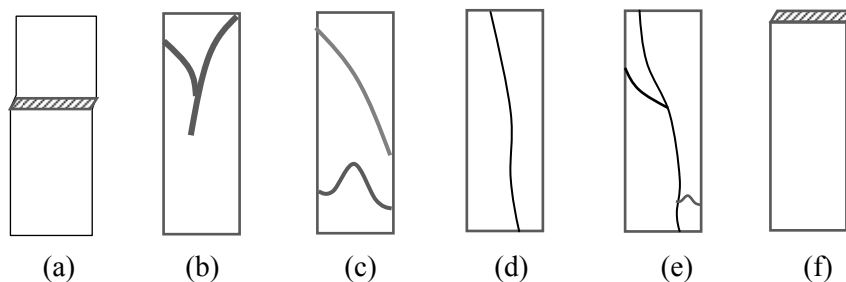


Figura 3.8 - Padrões da falha por compressão paralela às fibras, segundo a norma ASTM D 143.

3.9 Compressão transversal

A compressão transversal tem semelhanças com o procedimento de ensaio da tracção transversal.

A norma europeia EN 408:2003 define um provete de dimensões 70 x 45 mm² de secção e 90 mm de altura. A precisão da medição da intensidade da carga de compressão recomendada é de 1 % da carga máxima e de 0,1 % para cargas menores do que 10 % da carga máxima. A velocidade de progressão da carga deve ser de modo a que seja atingido o valor máximo entre 300 ± 120 segundos. Estes valores de ensaio são determinados em ensaios preliminares para cada espécie de madeira.

O ensaio de compressão transversal tem uma dificuldade que é determinar com precisão qual o valor a tomar como tensão máxima, uma vez que à medida que vai decorrendo a compressão a madeira se vai deformando aumentando a área da secção e compactando cada vez mais o material. Na prática acontece que não há um momento claro para registar a carga máxima e antes pelo contrário a carga tem uma tendência para aumentar lentamente enquanto a deformação progride muito rapidamente. Para resolver este problema a norma europeia definiu um procedimento com base numa análise gráfica dos ensaios preliminares, Figura 3.9, considerando-se a carga máxima aquela que corresponde ao ponto de encontro da linha de carga deformação com uma recta paralela à sua zona proporcional e que parte da abcissa correspondente a 1% da altura de referência do provete (h_0).

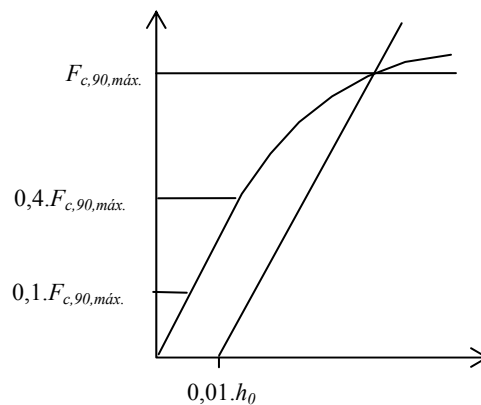


Figura 3.9 - Forma de encontrar o valor da carga máxima para compressão transversal, segundo o definido na norma EN 408:2003.

Outras normas definem procedimentos ligeiramente diferentes, como são os exemplos das normas Americanas e Britânicas.

Segundo a norma Inglesa B.S. 373:1957 o ensaio de compressão transversal é efectuado sobre um provete que é um cubo de 50 mm de lado. A aplicação de carga é feita através de dois acessórios metálicos aplicados em duas faces opostas do cubo, uns ensaios comprimindo as faces radiais, ou seja, a direcção da força é na direcção tangencial, e outros ensaios com aplicação da carga nas faces tangenciais, ou seja, com as forças na direcção radial. A carga é aplicada a uma velocidade de constante de 0,0635 mm/min. A curva de carga deformação deve ser traçada até uma deformação de 0,25 mm. Qualquer carga máxima atingida antes da deformação de 0,25 mm deve ser considerada como carga de ensaio.

Devem ser registados os seguintes parâmetros, alguns através da representação gráfica:

- área da secção sujeita à compressão (A)
- direcção da compressão (radial ou tangencial)

- carga no limite de proporcionalidade (P')
- carga correspondente à deformação de 2,54 mm (P'')
- carga máxima, se atingida antes da deformação de 2,54 mm (P)

Os cálculos da tensão de ruptura efectuam-se dividindo a carga máxima pela área à compressão. Os cálculos das propriedades elásticas efectuam-se dividindo a força no limite de proporcionalidade (fim da zona recta), pela área à compressão.

Segundo a norma ASTM D143 o ensaio de compressão transversal é efectuado num provete de 50 x 50 x 150 mm³. A força de compressão transversal é aplicada através um acessório metálico de 50 mm de largura, colocado transversalmente à direcção das fibras da madeira, a igual distância dos dois topos. Tendo em conta que o comprimento de 150 mm está na posição horizontal e o aplicador da compressão tem uma largura de 50 mm, a área à compressão é o cruzamento destas duas medidas, seja 50x50 mm², exercida numa parte central do provete. A face onde é aplicada a força é num plano radial, ou seja, a força é aplicada paralelamente à direcção tangencial das camadas de crescimento. A velocidade de ensaio é de 0,305 mm/min. Deve ser traçada uma curva carga-deformação até um valor de deformação de 2,5 mm, medidos entre os acessórios de aplicação, seja, uma deformação de 5 %. A tensão de compressão é tomada como sendo o cociente entre a força de esmagamento e a área de contacto do acessório metálico com a face da madeira (seja a largura do aplicador vezes a largura do provete).

3.10 Fendimento

O fendimento tem semelhanças com a tracção transversal conjugado com a influência da concentração de tensões. Existem procedimentos definidos em várias normas menos recentes para o ensaio de fendimento, mas na prática do cálculo estrutural actual não é dado um tratamento independente a esta característica. A relação entre o fendimento com a concentração de tensões é desenvolvida na secção 3.25 deste trabalho.

3.11 Corte paralelo

O corte paralelo é o que resulta da acção de uma força na direcção paralela às fibras da madeira e sobre um plano também paralelo à direcção das fibras. No caso da madeira este plano poderá apresentar-se tangente às camadas de crescimento, resultando um corte sobre uma grande parte de uma camada de crescimento, quer seja de lenho inicial, quer seja de lenho final. Se o plano se apresentar de modo a passar pelo eixo geométrico do toro, então a superfície de corte atravessa

diferentes camadas de crescimento. O corte paralelo é o responsável por um grande número de fracturas da madeira, quer no ensaio de flexão, quer no ensaio de compressão axial.

As tensões de corte devem-se a tendência para deslizamento entre diferentes planos, o que pode ser provocado por tensões de compressão ou tracção de sentidos opostos e actuando em planos afastados entre si (a) e (b), Figura 3.10. Também se criam tensões de corte com tensões de compressão ou tensões de tracção no mesmo sentido, quando há uma variação de intensidade de resistência do material nos diferentes planos (c). Por exemplo, no caso da madeira, quando um mesmo provete apresenta na zona de referência largas e distintas camadas de lenho inicial e final.

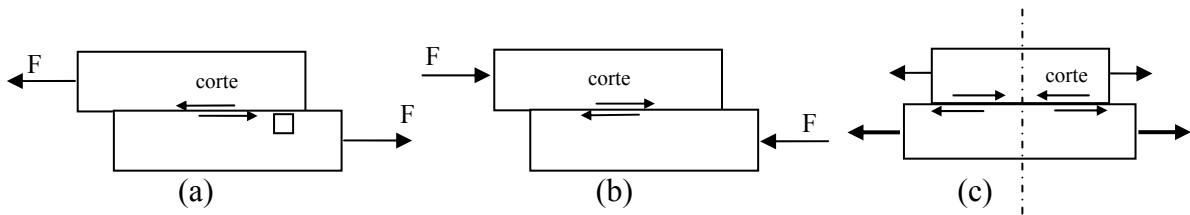


Figura 3.10 – Origem das tensões de corte. (a) Tracção em planos paralelos; (b) Compressão em planos paralelos; (c) Diferentes forças não colineares.

As tensões de corte correspondentes aos modelos (a) e (b) da Figura 3.10 são definidas pela expressão (3.15), mas as correspondentes ao desenho (c) são mais difíceis de definir uma vez que têm intensidade diferente em função da distância ao centro geométrico do modelo mas o seu valor médio será dado pela expressão (3.16),

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (3.15)$$

$$\tau = \frac{\Delta F \times 2}{S} \quad (3.16)$$

onde F é a força aplicada, S a superfície da secção resistente e ΔF a diferença de forças na hipótese (c) da Figura 3.10.

As tensões de corte têm uma componente na mesma direcção das tensões de compressão ou de tracção que lhes dão origem, como se pode observar na Figura 3.10 (a), (b) e (c)., ma por um princípio de equilíbrio terão outra componente no plano perpendicular, como representado na Figura 3.11 e também discutido nas secções 3.4 e 3.13.



Figura 3.11 – Equilíbrio das tensões de corte em direcções perpendiculares.

O corte paralelo é o que resulta da acção de forças opostas não colineares na direcção paralela às fibras da madeira e sobre um plano também paralelo à direcção das fibras. Este plano poderá apresentar-se tangente às camadas de crescimento, resultando um corte sobre uma grande parte de uma camada de crescimento, quer seja de lenho inicial, quer seja de lenho final. Se o plano se apresentar de modo a passar pelo eixo geométrico do toro, então a superfície de corte atravessa diferentes camadas de crescimento. O corte paralelo é o responsável por um grande número de fracturas da madeira, quer no ensaio de flexão, quer no ensaio de compressão axial.

O corte paralelo, assim como o módulo de corte são propriedades difíceis de quantificar em ensaios experimentais, pelas numerosas interferências que as forças de corte mantêm com outros esforços mecânicos (tracções e compressões em planos perpendiculares). Pode dizer-se que um esforço de corte puro é um conceito quase ideal. No caso da madeira, tratando-se, como se tem vindo a afirmar, de um material orientado com grande anisotropia nas suas propriedades, e tendo em conta as fragilidades da madeira relativamente às tensões de tracção e de compressão transversais, esta análise e previsão de comportamento real tornam-se bastante complexos.

Algumas normas Europeias e Americanas usam há muitos anos um procedimento de medição da tensão de rotura ao corte paralelo baseado num dispositivos suporte e gaveta deslizante, que prende uma parte do provete de madeira e permite o deslizamento por corte de uma parte do provete relativamente a outra. Este tipo de ensaio tem dificuldades, que serão discutidas no capítulo V dedicado aos modelos e com base no trabalho experimental desenvolvido no capítulo IV.

Como se disse anteriormente, no ensaio de corte pelas normas nacionais de alguns países Europeus, nomeadamente B.S. 373:1957, NP 618, e ainda a norma Americana ASTM D 143, usam o acessório metálico do tipo do mostrado na Figura 3.12.

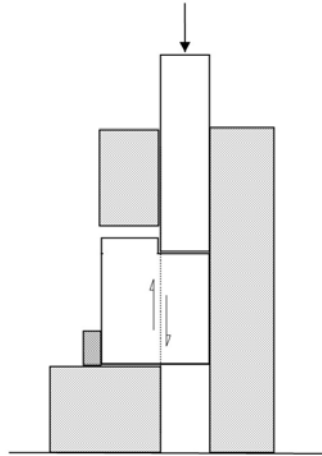


Figura 3.12 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo Normas nacionais de países europeus e por uma norma americana.

O procedimento anteriormente descrito baseado no chamado “ensaio do bloco de corte” permite determinar a tensão de rotura ao corte, dividindo a força máxima aplicada pela área inicial sujeita ao corte paralelo. Pela razão do corte ser induzido por tensões de compressão numa das meias faces do provete e por haver criação de tensões transversais (para contrariar a tendência de rotação do provete), torna-se impossível por este método fazer a determinação do módulo de corte.

A norma europeia EN 408:2003 indica um procedimento para a determinação da tensão de rotura ao corte, com base na colagem de duas placas metálicas a duas faces opostas de um provete de madeira, Figura 3.13, e fazendo aplicação das forças através destas peças metálicas que se encarregam de distribuir a tensão de corte mais regularmente do que no ensaio cujo esquema se apresentou na Figura 3.12. Embora não elimine as tensões normais de compressão este procedimento tem em vista claramente eliminar a tendência de rotação do provete.

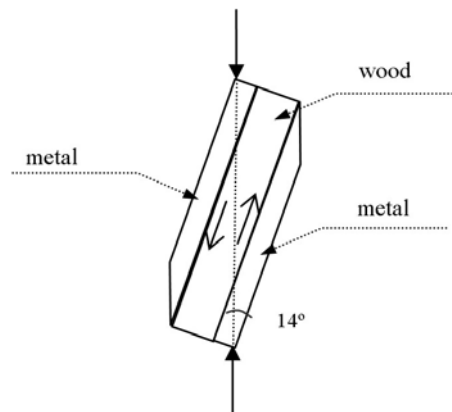


Figura 3.13 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo a norma Europeia EN 408-2003.

Esta norma define a determinação da tensão máxima ao corte paralelo através da expressão,

$$\tau_L = \frac{F_{m\acute{a}x.} \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b} \quad (3.17)$$

onde l é o comprimento da secção ao corte, b a largura e $F_{m\acute{a}x.}$ a força correspondente à ruptura.

Embora seja feita a correcção da força aplicada pela sua projecção na direcção do plano de corte, há uma componente de compressão transversal que eventualmente fará aumentar o valor encontrado por este procedimento experimental, relativamente ao valor real, por entre outras, surgir uma força de atrito entre as camadas sujeitas ao corte, que se aparece somada à força necessária para calcular a tensão efectiva ao corte.

Outros autores tentaram outras soluções para o problema como é descrito pelos japoneses (Yoshihara e Matsumoto, 2005). Para estes autores a determinação da tensão de corte é feita num provete de pequena secção, com dois furos e dois rasgos simétricos, sendo a força aplicada uma força de tracção, Figura 3.14.

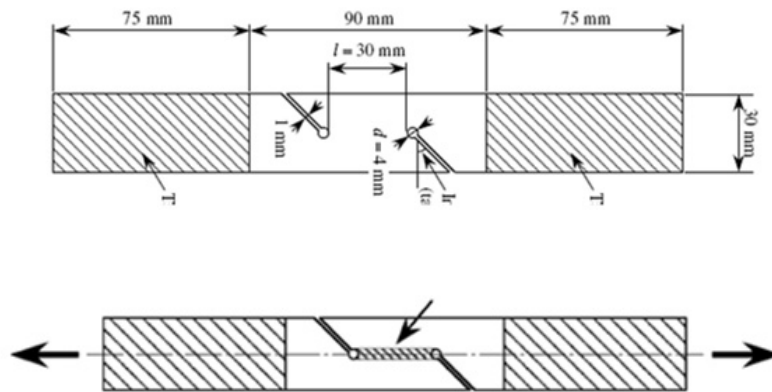


Figura 3.14 – Dispositivo para ensaio de corte paralelo para madeira, segundo (Hiroshi Yoshihara e Akira Matsumoto, 2005).

Embora este método seja muito interessante para determinações localizadas da tensão de corte não deixa de conter alguma imprecisão, associada ao facto de na vizinhança dos furos se dar uma concentração de tensões, que faz com que a tensão de ruptura ao corte apareça com valores inferiores ao esperado pela teoria geral, pois os cálculos tomam como base uma tensão de tracção média na meia secção entre o furo e a superfície, equação (3.18). A tensão de corte real não é homogénea em toda a secção sujeita a corte, sendo superior na proximidade dos furos, por efeito de deformação axial por tracção em cada uma das metades de ligação.

$$\tau_{xy} = \frac{P}{t \cdot l} \quad (3.18)$$

onde P é a força aplicada em tracção, t a largura do provete e l a distância entre os bordos interiores dos dois furos.

Segundo a opinião de vários autores o método mais rigoroso para determinação das propriedades ao corte e o que mais se aproxima do corte puro é o do Iosipescu, provete da Figura 3.15. Embora também não isento de inconvenientes, nomeadamente o de necessitar um acessório metálico auxiliar que limita a dimensão dos provetes, é um método muito usado, nomeadamente para polímeros artificiais. Vários estudos têm demonstrado a utilidade deste método também para a madeira como Marcelo (2004), para o pinho bravo.

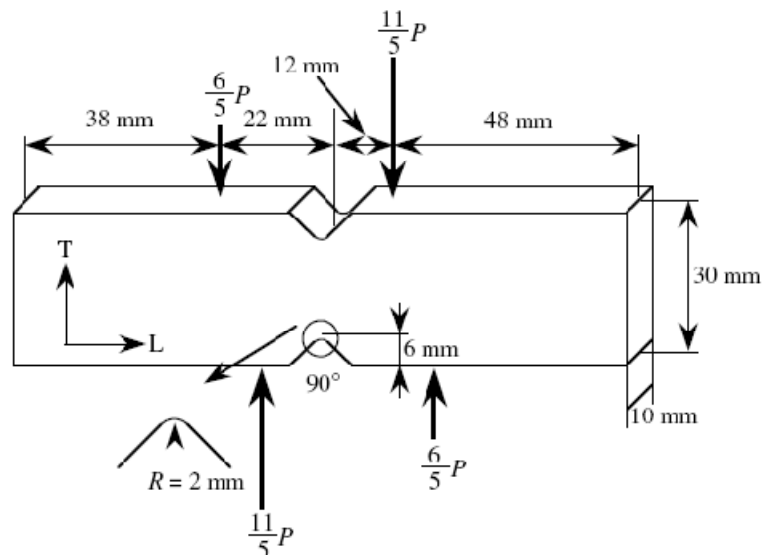


Figura 3.15 – Dimensões do provete de Iosipescu para ensaio de corte paralelo de madeira, (Liu, 1995).

A secção 3.15 desta tese é dedicada à análise do módulo de corte que constitui a continuação do estudo das propriedades ao corte, mas nesse caso particular integrado nas propriedades elásticas. Todos os métodos de ensaio para avaliação do módulo de corte permitem obter valores da tensão de ruptura ao corte, mas nem todos os métodos de ensaio para determinação da tensão de ruptura ao corte permitem avaliar o módulo de corte.

3.12 Corte transversal

O corte transversal é o que resulta da acção de uma força numa direcção perpendicular à direcção das fibras. Geometricamente é possível que o plano de corte seja paralelo ou perpendicular às

fibras. No primeiro caso temos forças na direcção transversal mas num plano de corte paralelo às fibras, Figura 3.16 (a) é o esforço designado na bibliografia em língua inglesa como “rolling shear”. É uma característica mecânica que, embora não seja responsável por grande risco e responsável por ocorrências de fracturas, é possível de acontecer. Relativamente à outra hipótese de forças na direcção transversal e um plano de corte também transversal, Figura 3.16 (b), teremos uma situação em que nunca acontece rotura, porque se atingem outros limites de resistência, nomeadamente a compressão transversal, muito antes da cedência por corte. Em todo o caso é possível avaliar estas características, tirando partido de provetes de ensaio adaptados em que é reduzida a área da superfície ao corte, de modo a não se atingirem as tensões limites devidas a outros esforços.

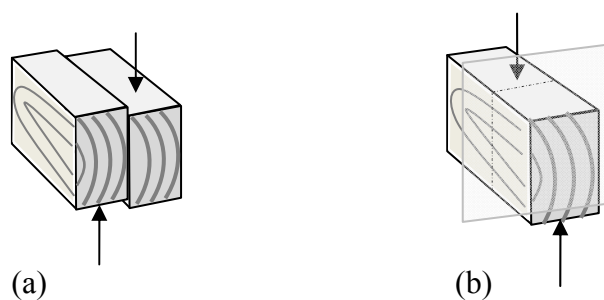


Figura 3.16 – Corte transversal. (a) – Paralelo às fibras;
(b) – Transversal às fibras.

É muito escassa a informação disponível na bibliografia sobre esta característica mecânica da madeira, incluindo nas normas em vigor para cálculo estrutural. No capítulo de desenvolvimento experimental é feita descrição e apresentados os resultados do estudo de provetes específicos para estes ensaios, incluindo nova geometria e procedimento de ensaio.

3.13 Flexão

A resistência à flexão é uma das características mais exigentes para materiais estruturais, pois as aplicações estruturais em que está presente são as mais diversas como acontece em coberturas de edifícios, em suportes de pisos, em pontes, entre muitas mais, sempre que se tem de vencer a força da gravidade e se dispor de uma área livre debaixo de apoios pontuais. O paradoxo com que se depara a flexão nas suas mais variadas aplicações, é a relação entre as cargas a suportar e o peso próprio do material estrutural, pois os componentes em serviço têm de se suportar a si próprios mais a cargas aplicadas. Neste sentido a análise tem de ser feita procurando a maior capacidade de suporte com menos material ou material mais leve, pois esta relação vai ter importância no peso total sobre a estrutura de apoio e nos respectivos custos. Para uma reflexão

tendo em conta os aspectos anteriormente referidos, a madeira tem um papel de eleição, pois sendo dos materiais mais antigos para vencer vãos horizontais sobre situações de carga, é, também, um dos que apresenta melhor relação entre capacidade de suportar carga e o seu peso próprio, mesmo em comparação com materiais de engenharia modernos.

A flexão é um fenómeno complexo, pois tem componentes de quase todos os outros tipos de esforços puros, tracções, compressões em diferentes direcções e corte também em diferentes direcções. Na prática as flexões aparecem por aplicação de situações de carga muito diversas, como sejam, cargas uniformemente distribuídas, uma ou várias cargas pontuais (de valores iguais ou de valores diferentes), ou combinações com outros esforços. Em sùmula, a flexão engloba uma grande parte de toda a ciência estrutural.

Para estudo e caracterização dos materiais e posterior obtenção de dados para cálculo e projecto, os ensaios laboratoriais de flexão estão concentrados num número reduzido de procedimentos.

Flexão a quatro pontos

Na Figura 3.17 mostra-se de forma esquemática a distribuição de esforços e de tensões como as de tracção e de compressão na direcção paralela às fibras e de corte nas direcções paralela e transversal.

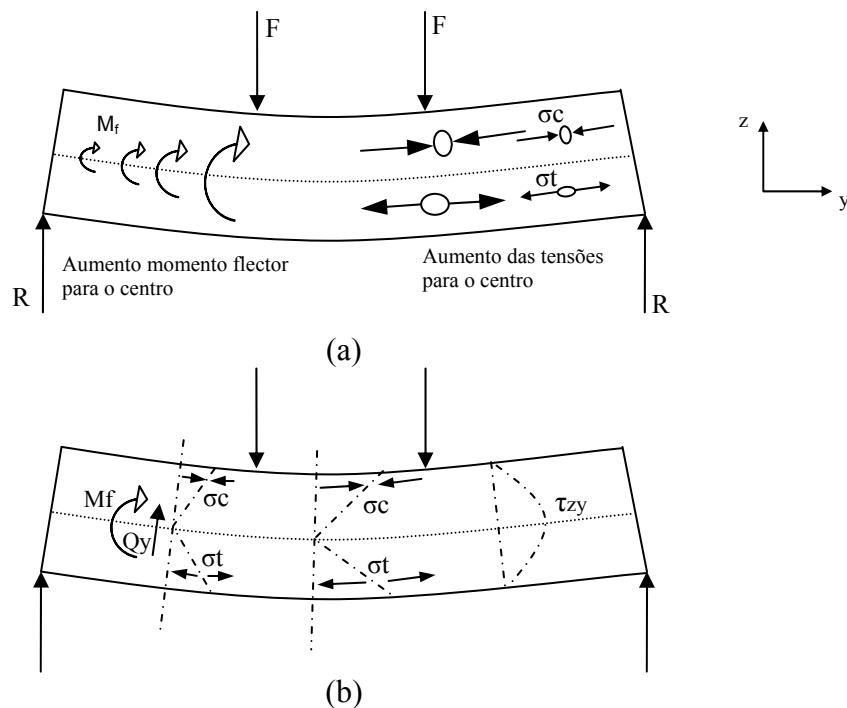


Figura 3.17 – Distribuição dos esforços, dos momentos e das tensões durante a flexão: tracções, compressões e corte paralelo e transversal. (a) representação física; (b)- modelo das tensões.

Nas regiões laterais do modelo da Figura 3.17, entre as reacções nos apoios R e as forças aplicadas F , designadas de região de flexão simples, o momento flector M_f não é constante, aumentando gradualmente desde a localização de R (onde é zero), até um máximo na direcção de F , ocorrendo também o chamado esforço transversal Q_y . Neste caso o tensor de das tensões incorpora, para além da tensão de flexão, a tensão de corte transversal τ_{zy} , com uma distribuição parabólica como a representada na Figura 3.17.

As deformações e tensões na zona de flexão pura ocorrem na zona entre as duas cargas F , tendo esta designação devido à ausência de esforço transversal e ao facto do momento flector se manter constante entre estes limites. Na Figura 3.18 faz-se uma representação da zona de flexão pura e uma representação da sua gradual repartição até provetes elementares de comprimento d .

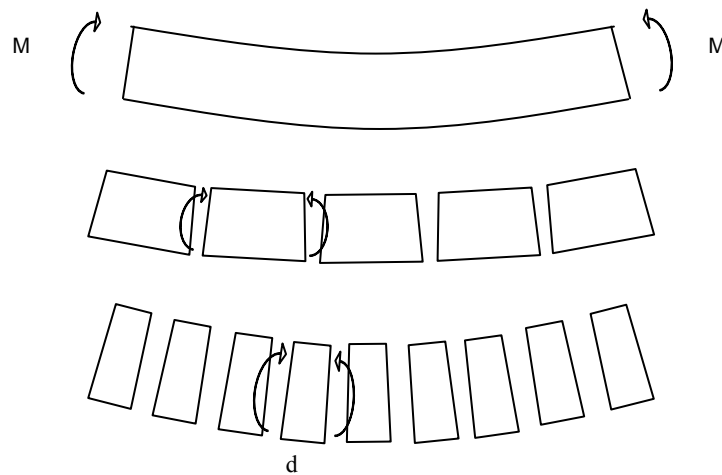


Figura 3.18 – Decomposição dos momentos flectores na zona de flexão pura.

Na zona de flexão pura, que ocorre quando o momento flector é constante, as secções deformam-se por uma rotação relativa de cada secção elementar, mas as superfícies das secções mantêm-se planas, excepto na zona próxima do limite do corte puro, devido ao princípio de Saint-Venant, que defende que as tensões só são uniformes e se encontram estabilizadas a uma certa distância dos pontos de aplicação de cargas ou alterações de secção. Próximo dos pontos de aplicação das cargas ou da reacção dos apoios, o estado de tensão é ainda mais complexo, com forte componente de tensões na mesma direcção da carga, para além de tensões muito elevadas devido ao efeito de concentração de tensão. Nos topos, por se tratar a de zona de fronteira, sem continuidade e para equilíbrio de tensões, as superfícies não são planas, tal como representado mais adiante na Figura 3.25.

Na Figura 3.19 faz-se uma análise geométrica de uma secção elementar. Pela semelhança de triângulos tem-se que,

$$\frac{y}{d_z} = \frac{r}{d} \quad (3.19)$$

mas, como o alongamento relativo da secção elementar é dado por,

$$\varepsilon = \frac{d_z}{d} \quad (3.20)$$

resulta que,

$$y = \varepsilon \cdot r \quad (3.21)$$

Aplicando a lei de Hooke,

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = E \cdot \frac{y}{r} \quad (3.22)$$

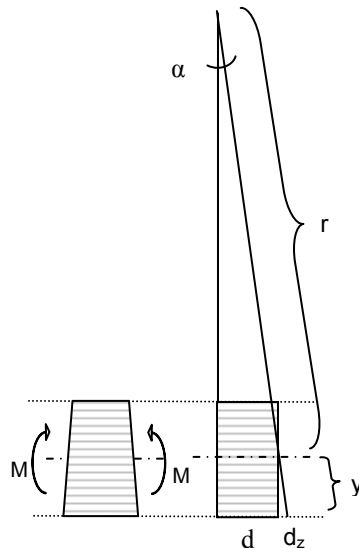


Figura 3.19 – Efeito da flexão numa secção elementar.

Desta forma se conclui que na flexão pura e numa análise elementar da resistência dos materiais a distribuição das deformações e correspondentemente a distribuição das tensões, segundo diferentes alturas na secção, se fazem segundo uma lei linear. As deformações e as tensões são máximas nos extremos das secções e anulam-se no ponto de $y=0$, que é o da linha neutra. Também na zona de flexão pura, para cada valor do momento flector o raio de curvatura da deformação é constante.

Representando em esquema na Figura 3.20 uma secção rectangular de uma viga em flexão pura,

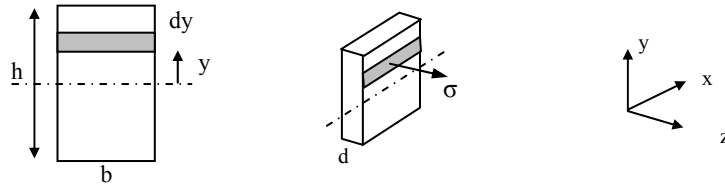


Figura 3.20 – Tensão longitudinal numa secção elementar.

por questões de equilíbrio, a soma dos momentos correspondentes às tensões σ devem igualar o momento flector M_f (momento flector na secção devido aos esforços aplicados). Assim, temos que a soma das tensões em cada ponto de cota y , com a área $b \cdot dy$, é representado por,

$$\int \sigma y b dy = M \quad (3.23)$$

mas, tendo em conta a equação (3.22),

$$\int_s \frac{E y^2}{r} b dy = M \quad (3.24)$$

$$\frac{E}{r} \int_s y^2 b dy = M \quad (3.25)$$

e ainda, como o momento de inércia é definido como sendo o produto da área elementar pelo quadrado da sua distância ao eixo neutro, relativo a toda a área da secção transversal, ou seja,

$$I_{yy} = \int_s y^2 ds \quad (3.26)$$

então, as equações (3.22) e (3.25) simplificam-se no caso da secção rectangular para,

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_{yy}} \quad (3.27)$$

ou, finalmente, a tensão máxima é dada por,

$$\sigma_{\max.} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad (3.28)$$

Das leis da geometria tem-se a relação entre o raio de curvatura e um arco de circunferência, Figura 3.21.

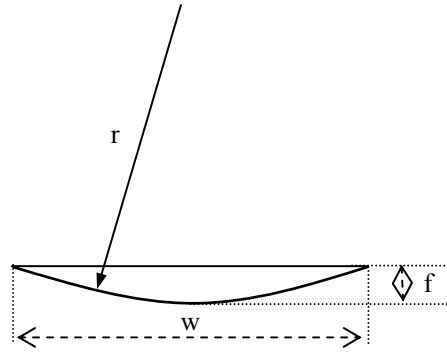


Figura 3.21 – Relações geométricas elementares para relacionamento de tensões.

$$f = r - \sqrt{r^2 - \frac{w^2}{4}} \quad (3.29)$$

onde w corresponde à zona de raio de curvatura constante.

Pode-se deduzir das (expressões 3.22, 3.28 e 3.29) uma relação entre a tensão aplicada e a flecha de deformação correspondente, na zona de momento flector puro, e dentro dos limites da zona elástica, vem dada por,

$$f_M = \frac{Eb h^3}{12M} - \sqrt{\frac{E^2 b^2 h^6}{12^2 M^2} - \frac{w^2}{4}} \quad (3.30)$$

A flecha total proposta pela norma europeia EN 408:2003 para uma flexão a quatro pontos e confirmada experimentalmente, é dada por,

$$f_t = \frac{L^3 F}{E b h^3} \cdot \left[\frac{3a}{4L} - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right] \quad (3.31)$$

sendo f_t a flecha total medida no centro da viga, a distância entre o apoio e a força F do mesmo lado, b e h a largura e altura da secção respectivamente, L a distância entre apoios e E o módulo de elasticidade à flexão.

Nos ensaios experimentais é usual a máquina de ensaios fornecer o deslocamento do aplicador de carga, portanto uma deformação f_m (flecha da máquina). Com os dados existentes é fácil verificar a relação,

$$f_t = f_M + f_m \quad (3.32)$$

em que f_t é a flecha total, f_m a flecha nos pontos de aplicação da carga e f_M a flecha da zona de momento flector puro.

Modelo do estado de tensões de tracção e de compressão na zona de momento flector simples, combinado com as tensões do esforço transversal, representados na Figura 3.19 é avaliado sob o ponto de vista de um ponto em equilíbrio na Figura 3.20, tendo em conta a decomposição da Figura 3.18.

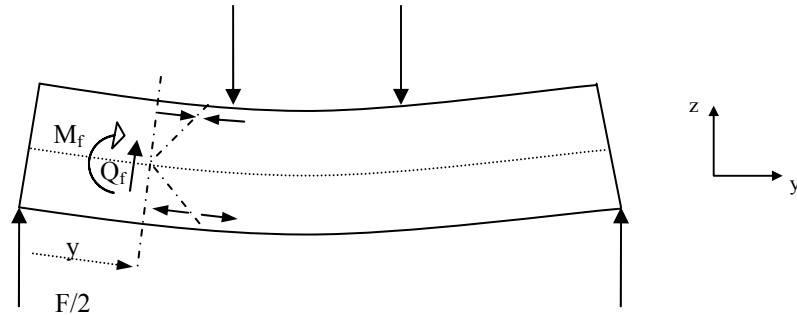


Figura 3.22 – Momento flector e tensões a partir de um extremo.

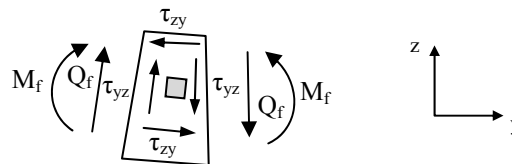


Figura 3.23 – Decomposição das tensões de uma secção elemental.

Na zona entre o apoio e aplicação da carga existe o esforço transversal Q_f devido à força vertical na zona de apoio da barra, e um momento flector M_f resultante das tensão de tracção e compressão paralelas às fibras da madeira, dados pelas seguintes expressões,

$$Q = \int_S \tau_{yz} \, ds \quad (3.33)$$

e o momento flector M_f dado por,

$$M = \frac{F}{2} \cdot y \quad (3.34)$$

Nesta zona da barra, compressão, uma porção elemental “ponto”, sombreado na Figura 3.23, fica sujeita às tensões representadas na Figura 3.24.

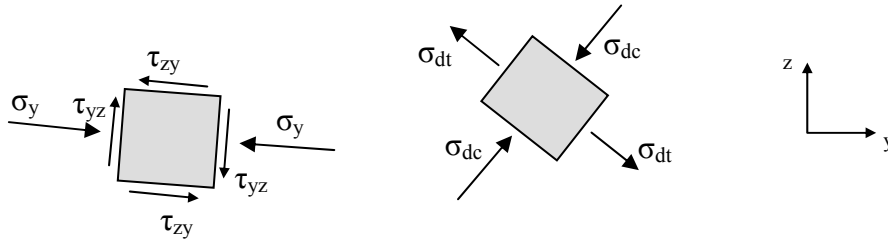


Figura 3.24 – Equivalência de tensões no ponto elementar, na zona de compressão.

Por razões de equilíbrio, para impedimento de rotação do ponto elementar, provocada pelas tensões de corte verticais τ_{yz} , têm de estar presentes as tensões de corte horizontais τ_{zy} . Se o ponto elementar estiver na metade superior, à distância y da linha neutra, as resultantes das tensões presentes σ_d , num ângulo bem determinado α , apresentam-se segundo o modelo mostrado na Figura 3.24. Por equivalência de estado de tensão de um ponto dado pelo círculo de Mohr é possível encontrar um sistema de eixos para o qual o estado de tensão é o estado principal de tensão, ou seja, só existem tensões normais, sendo nulas as tensões de corte. As intensidades das tensões principais, e o ângulo em que ocorrem, dependem do estado de tensão do ponto e do seu referencial relativamente à geometria da amostra. Na figura 3.24 estas tensões são identificadas como: σ_{dt} - tensão de tracção; e σ_{dc} - tensão de compressão.

Como resultado da análise anterior as secções na zona de momento flector e tensões de corte, as secções planas transversais tendem a deformar-se perto das zonas de fronteira na zona de flexão simples, segundo o modelo mostrado na Figura 3.25.

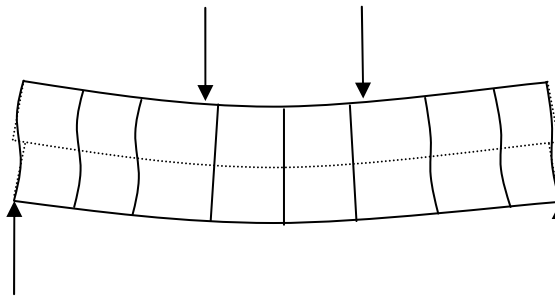


Figura 3.25 – Deformações das superfícies planas transversais nas zonas fronteira da flexão simples.

Nos modelos apresentados são excluídas as zonas nas proximidades da aplicação de cargas ou suportes, porque nestes locais o estado de tensão é muito mais complexo.

Coefficiente de Poisson traduz a relação entre a deformação na direcção transversal em resultado de aplicação de esforços numa outra direcção de referência a 90° , e tem, em regra, um valor negativo (diminuição de dimensão) quando a tensão actuante é positiva (tracção) e um valor

positivo (aumento de dimensão) quando a tensão actuante é negativa (compressão). Na flexão representada nas figuras anteriores existem tensões de compressão paralela na metade superior do provete e tensões de tracção na metade inferior do provete, pelo que haverá uma resposta de deformação transversal da secção com tendência ao aumento de largura da secção na zona superior e tendência para diminuição da largura na zona inferior, tal como representado na Figura 3.26, já com a terminologia aplicável às madeiras: L – longitudinal ou paralela às fibras; R – transversal na direcção radial; e T – transversal na direcção tangencial.

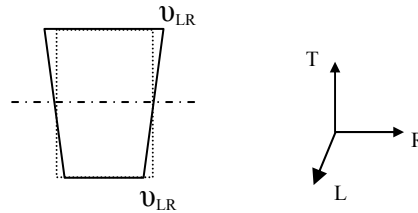


Figura 3.26 – Deformação da geometria da secção na zona central da flexão pura, por efeito do coeficiente de Poisson.

3.13.1 Módulo de elasticidade à flexão

Entende-se como elasticidade de um modo lato, a propriedade que os materiais apresentam, em maior ou menor grau, de se deformarem dentro de certos limites, por efeito de uma acção exterior de flexão e recuperarem a sua forma ou dimensões iniciais quando essa acção exterior cessa.

Todos os materiais estruturais, e muito particularmente a madeira, apresentam um certo grau de elasticidade, característica muito vantajosa no que diz respeito ao seu comportamento em serviço, uma vez que, se aproveitada neste sentido, permite uma redistribuição de cargas por todos os elementos de um conjunto estrutural e além disso a própria deformação pode ser um bom indicador do estado de esforço de um componente ou de toda a estrutura.

Sendo uma propriedade importante há necessidade de a quantificar com precisão. Os modelos matemáticos encontrados nem sempre correspondem com o rigor ao comportamento real, especialmente para madeira. O parâmetro mais usual para representar a elasticidade é o módulo de elasticidade. O conhecimento quantificado desta característica permite calcular matematicamente qual a deformação esperada para certas condições de solitação mecânica exterior, utilizando-se conhecimentos gerais da Resistência dos Materiais.

Em resumo, a importância do módulo de elasticidade é fundamental na caracterização de um determinado material, permitindo fazer os cálculos que definem a forma e as dimensões das peças para satisfazer pré-determinadas condições de utilização.

Outro aspecto importante da informação prestada pela determinação experimental do módulo de elasticidade resulta do facto de permitir avaliar o comportamento do material como método não destrutivo, utilizando-se assim como método de previsão do seu comportamento, ou ainda como valiosa ferramenta de técnicas de controlo da qualidade. Há uma correlação razoavelmente segura entre o valor do módulo de elasticidade e a tensão de rotura.

Teoricamente o módulo de elasticidade define-se como a relação entre a tensão e a deformação unitária ($\Delta l/l_0$), que lhe corresponde dentro da chamada zona de proporcionalidade. (E - módulo de elasticidade; σ - tensão; ϵ - deformação unitária).

A utilidade prática mostra-se assim evidente, pois o módulo de elasticidade, dentro dos seus limites, é uma constante que vai permitir fazer cálculos relacionando a deformação do material com os esforços sobre ele aplicados.

O módulo de elasticidade pode ser medido em relação a vários tipos de esforços, compressão, tracção, flexão, torção, em diferentes direcções para materiais orientados como a madeira, com valores não necessariamente iguais para cada caso. O mais usual é o módulo de elasticidade em flexão, pois é o que tem um efeito mais visível e importante no comportamento de uma peça estrutural em madeira. A madeira apresenta um comportamento elástico quase perfeito até tensões relativamente elevadas, desde que o tempo de actuação seja curto, pois caso contrário começa a revelar-se um novo fenómeno que é o do comportamento visco-elástico, ao que se segue ainda o comportamento visco-plástico.

A avaliação do módulo de elasticidade determinado para uma dada espécie de madeira, em condições bem determinadas (presença de defeitos, humidade, massa volúmica, etc.) passa a representar uma referência que pode ser usada para prever a presença, mesmo que oculta, de algumas anomalias.

3.13.2 Teoria geral para o cálculo do módulo de elasticidade em flexão

Embora o ensaio prático de flexão seja relativamente simples de realizar, já a explicação e a compreensão do que se passa realmente dentro do material é bastante complexo, pois uma simples flexão cria um estado tridimensional de tensões, distribuídas por zonas, umas predominantemente em compressão, outras em tracção e ainda zonas sujeitas predominantemente a tensões de corte.

O módulo de elasticidade à flexão é determinado pelo ensaio de flexão estática (assim chamado por ser realizado com pequenos acréscimos de carga). Registam-se ao longo do ensaio, em intervalos pequenos, os pares de valores correspondentes à carga aplicada e correspondente

flecha. Uma representação gráfica para a madeira e derivados, apresenta no caso mais geral, a configuração da Figura 3.27.

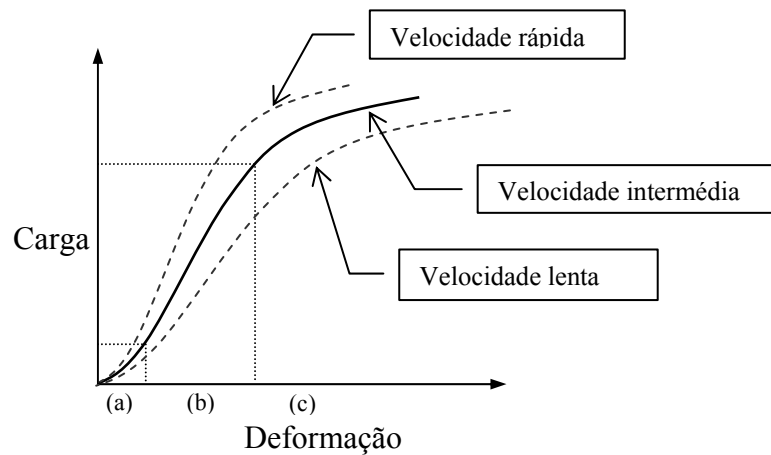


Figura 3.27 - Curva característica relacionando carga/deformação, num ensaio de flexão estática em madeira ou derivados.

No início da deformação, zona (a) da Figura 3.27, existe uma relação de não proporcionalidade entre a carga e a deformação correspondente. Na zona (b) a linha é praticamente recta, o que significa que para iguais acréscimos de carga resultam iguais acréscimos de deformação, existindo proporcionalidade entre as duas variáveis. Na zona (c) foi já ultrapassado o limite de proporcionalidade, regista-se um acréscimo de deformação cada vez maior e não proporcional ao acréscimo de carga.

A explicação mais provável para o comportamento na zona (a) da Figura 3.27 é, por um lado, a falta de contacto contínuo entre as superfícies da madeira e a dos acessórios de carregamento, Figura 3.28, devidas à rugosidade da madeira, mas também dos outros materiais, e por outro lado a pequenos empenos, defeito de planeza no corte, ou ainda a tensões internas da madeira de sinal contrário ao das forças de ensaio. O início de contacto em superfície de menor área provoca tensões locais muito elevadas que levam ao esmagamento desses pontos mais salientes e ao desempenho dos elementos, até se atingir uma zona de equilíbrio e uniforme distribuição de tensões, correspondendo à zona proporcional de deformação.

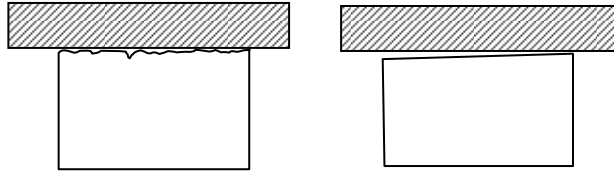


Figura 3.28 – Modelos de pormenor das superfícies de contacto entre a madeira e os acessórios de aplicação de carga.

De registar ainda que há sempre uma influência da velocidade de aplicação da carga. Este último aspecto, sobre a incidência das deformações visco-plásticas será desenvolvido na secção correspondente aos fenómenos de fluência. Graficamente o módulo de elasticidade é uma constante que caracteriza a inclinação da curva tensão-deformação. Um valor mais elevado do módulo de elasticidade dá uma parte recta com maior valor de coeficiente angular ou declive, o que na prática quer dizer que para um mesmo acréscimo de carga a deformação resultante é menor para o material de módulo de elasticidade mais elevado.

Como ordem de grandeza dos valores refira-se que o módulo de elasticidade do pinho bravo é cerca de uma vez e meia superior a um pinho do norte da Europa ou um espruce, sendo o do eucalipto comum cerca de 1,6 vezes superior à do pinho bravo. O aço de construção tem valores do módulo de elasticidade cerca de 17,5 vezes superior à do pinho bravo, mas a massa volúmica do aço é 12 vezes superior.

Para as madeiras há um bom coeficiente de correlação entre o valor do módulo de elasticidade e a massa volúmica.

3.13.3 Discussão sobre a aplicação de uma ou duas cargas de flexão

O ensaio para avaliação do módulo de elasticidade pode ser basicamente efectuado por flexão, pelo método baseado na aplicação de uma carga central, ou no método com dois pontos de carga entre os apoios, Figura 3.29. Na norma B.S.373 esta discussão é feita nos seguintes moldes: para caracterização comparativa de diferentes espécies de madeira, ou com outros materiais, o método da aplicação da força central é suficientemente preciso, sendo de mais fácil execução e cálculo. Quando for necessário uma maior aproximação às condições reais torna-se recomendável ir para o método baseado na aplicação de duas cargas centrais. Neste último método, a zona entre as duas cargas está submetida a um momento flector constante, flexão pura (sem esforço transversal), e também a zona em estudo é mais representativa do conjunto da peça no caso de materiais com heterogeneidades e defeitos, como é o da madeira.

Na norma ASTM D 143 esta discussão também é levantada, optando-se por designar o módulo de elasticidade determinado por apenas um ponto de carga central como o módulo aparente de elasticidade, abreviadamente representado por MOE. Permanece ainda este método como o mais prático para caracterização de um material.

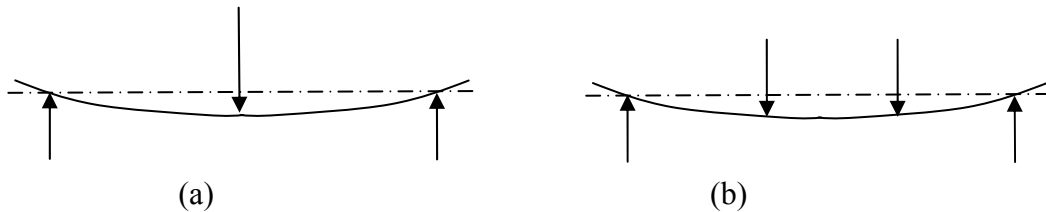


Figura 3.29. – Esquema do ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade. (a) flexão a três pontos; (b) flexão a quatro pontos.

3.13.4 Normas mais usuais para determinação experimental do módulo de elasticidade à flexão

Nesta discussão vai ser também considerada uma norma específica para materiais derivados da madeira, na convicção de que haverá a maior vantagem em harmonizar dentro do possível as normas para madeira maciça e seus derivados (contraplacados, aglomerados de partículas e fibras), de modo a poderem comparar-se os resultados e caracterizar materiais estruturais dentro de um mesmo critério.

ASTM D 143

O módulo aparente de elasticidade, MOE, como definido nas normas ASTM D143, vem dado pela expressão seguinte, tendo como referência a Figura 3.27.

$$MOE = \frac{P_{lp} \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta_{lp}} \quad (3.35)$$

MOE - módulo aparente de elasticidade [lb./sq.in.] ; [N/mm²]

P_{lp} - carga aplicada correspondente ao limite de proporcionalidade [lbf]; [N]

L - distância entre os apoios [in]; [mm]

b - largura do provete em ensaio [in]; [mm]

h - espessura do provete em ensaio [in]; [mm]

Δ_{lp} - flecha no limite de proporcionalidade, medida no plano neutro [in]; [mm]

As dimensões dos provetes são de 2x2x30 in.³, seja 50x50x760 mm³, ou em alternativa, quando não seja possível obter desta dimensão: 1x1x16 in.³, seja 25x25x410 mm³.

A dificuldade deste método pode nalguns casos encontrar-se na definição exacta do ponto correspondente ao limite de proporcionalidade, concretamente se houver irregularidade da curva

de carga / deformação, mesmo que pequena, ou se a passagem da zona recta para a zona curva propriamente dita for muito gradual.

A velocidade de ensaio é definida como 0,10 in./min ou seja 2,5 mm/min, sendo os intervalos de medição da flecha de 2,5 mm, medidos com uma precisão não inferior a 0,2 mm. Distância entre apoios deve ser $L=710$ mm para os provetes de maior secção, e $L=360$ mm para os de menor secção, mantendo-se a relação de 14 vezes a espessura do provete.

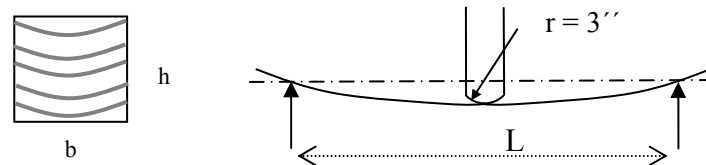


Figura 3.30 - Esquema do ensaio de flexão pela norma ASTM D 143.

Para os provetes de secção $25 \times 25 \text{ mm}^2$ o raio de curvatura do aplicador de carga passa a ser $1\frac{1}{2}$ (38 mm), Figura 3.30.

Carga uniformemente distribuída: A expressão que relaciona o módulo de elasticidade com a flecha total na situação de carga uniformemente distribuída ao longo de todo comprimento entre apoios extremos, é dada por,

$$E = \frac{5 \cdot P_{lp} \cdot L^3}{384 \cdot f_{lp} \cdot I} \quad (3.36)$$

que para o mais habitual perfil rectangular da secção transversal se transforma em,

$$E = \frac{5 \cdot P_{lp} \cdot L^3}{32 \cdot f_{lp} \cdot b \cdot h^3} \quad (3.37)$$

sendo,

P_{lp} – valor total da carga uniformemente distribuída no limite de proporcionalidade [N]

f_{lp} – a flecha de deformação total no limite de proporcionalidade [m]

L – vão total entre apoios [m]

b – largura da secção [m]

h – altura da secção [m]

I – $(bh^3/12)$, momento de inércia [m⁴]

B.S. 373:1957

Esta norma Britânica destina-se exclusivamente a madeira maciça em provetes de pequenas dimensões e sem defeitos. Prevê dois métodos para a realização do ensaio de flexão:

- o "método a", baseado na aplicação da carga superior num único ponto; e o "método b", definindo o ensaio para a aplicação da carga superior em dois pontos.

B.S.373 "Método a"

Neste método a configuração do ensaio é semelhante à que se encontra esquematizada na Figura 3.30, sendo os parâmetros definidos como se segue:

$$E_f = \frac{P' \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta^2} \quad (3.38)$$

E - módulo de elasticidade [lb/sq.in.] ; [N/mm²]
 P' - carga aplicada correspondente ao limite de proporcionalidade [lbf]; [N]
 L - distância entre os apoios [in]; [mm]
 b - largura do provete em ensaio [in]; [mm]
 h - espessura do provete em ensaio [in]; [mm]
 Δ - flecha no limite de proporcionalidade [in]; [mm]

As dimensões dos provetes são de 2x2x30 in.³, 50 x 50 x 760 mm³. É também dada a hipótese de um provete de menor secção e dimensões em centímetros 2x2x30 cm³. A velocidade de ensaio recomendada para o primeiro provete referido é de 0,1 in/min (2,5 mm/min), enquanto que para o provete mais estreito é de 0,26 in./min (6 mm/min). A distância entre apoios é igual a 28 in. para os provetes de 2 in. de espessura e de 28 cm para os de 2 cm, mantendo-se sempre constante a relação de distância entre apoios igual a 14 vezes a espessura.

Este método é muito semelhante ao definido na norma ASTM, Figura 3.30, com a diferença no raio do aplicador de carga superior, que é aqui ligeiramente menor (r=30mm). O ponto sensível deste método, tal como o da norma ASTM, é o da escolha exacta do limite de proporcionalidade.

B.S.373 "Método b"

Este segundo método define a determinação do módulo de elasticidade em flexão com aplicação de duas cargas superiormente, como esquematizado na Figura 3.31.

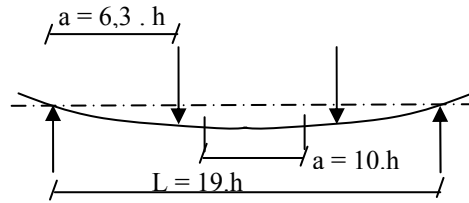


Figura 3.31 - "Método b" da norma B.S.373 para determinação do módulo de elasticidade à flexão.

A expressão de cálculo para o "método b" é a seguinte:

$$E = \frac{3 P' a L^2}{4 \Delta' b h^3} \quad (3.39)$$

- E - módulo de elasticidade [lb/sq.in.] ; [N/mm²]
 P' - carga aplicada correspondente ao limite de proporcionalidade [lbf]; [N]
 a - distância entre apoios e os pontos de carga [in]; [mm]
 L - distância entre pontos base para medição da flecha [in]; [mm]
 Δ' - flecha no limite de proporcionalidade na zona indicada na figura [in]; [mm]
 b - largura do provete em ensaio [in]; [mm]
 h - espessura do provete em ensaio [in]; [mm]

sendo as dimensões dos provetes 2x2 in.², ou 50x50 mm². A distância entre apoios inferiores é de 38 in., que corresponde a 19 vezes a espessura dos provetes. A consideração dos valores de carga e deformação para cálculo, são entre o zero e o limite de proporcionalidade.

NF B 51-016

Esta norma francesa destina-se, tal como a B.S. à determinação do módulo de elasticidade em provetes de pequenas dimensões sem defeitos, Figura 3.32.

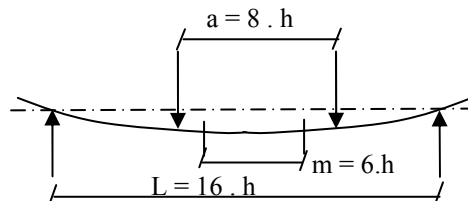


Figura 3.32 – Montagem para ensaio de determinação do módulo de elasticidade à flexão pela norma NF B 51-016.

$$E_{LH} = \frac{3 P (L - a) m^2}{8 b h^3 f} \quad (3.40)$$

- E_{LV} - módulo de elasticidade [N/mm²]
 P - carga total de flexão, igual à média das diferenças entre as cargas máxima P1 e mínima P2, aplicadas ao fim de três ciclos [N]
 L - distância entre os suportes de apoio do provete [mm]
 a - distância entre os dois pontos de carga [mm]
 m - distância entre os pontos de apoio do sistema de medição da flecha [mm]
 b - largura do provete em ensaio [mm]
 h - espessura do provete em ensaio [mm]
 f - flecha na zona de flexão pura, igual à média das diferenças entre as flechas máxima f1 e mínima f2, ao fim dos três ciclos [mm].

sendo o raio de curvatura dos cutelos de aplicação de carga e apoios $r = 30 \text{ mm}$, e a dimensão dos provetes $20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$. A distância entre apoios é de 320 mm, seja 16 vezes a espessura dos provetes. A velocidade de ensaio de modo a atingir a carga de 600 N, aplicada em cerca de 30 s.

Procedimento de ensaio:

Efectua-se um ensaio preliminar para verificar se no intervalo das cargas a aplicar ($P_1=600\text{N}$ e $P_2=200\text{N}$) a curva "carga-deformação" é ou não linear. Caso não seja, corrigir aqueles valores para as condições convenientes e utilizá-los nos ensaios.

Aplica-se a carga $P_1=600\text{N}$ a velocidade constante e depois diminui-se até ao valor $P_2=200\text{N}$; repetir duas vezes este ciclo. Registam-se as flechas máxima e mínima f_1 e f_2 nos pontos de carga P_1 e P_2 correspondentes e ao fim de cada ciclo.

ISO 3349

Esta norma tem por objectivo a determinação do valor do módulo de elasticidade em flexão estática para madeira. Baseia-se no princípio da avaliação da deformação em função da carga aplicada na zona de flexão pura, seja, pelo esquema com duas cargas superiores representado na Figura 3.29.

Há ainda duas hipóteses a considerar que se prendem com a distância entre as duas cargas superiores, podendo ser de 1/3 da distância entre apoios ou de 1/2 desta distância.

As expressões matemáticas de cálculo em função da distância das cargas superiores são as seguintes:

$$E_w = \frac{P L^3}{36 b h^3 f} \quad (\text{apoios a } L/3) \quad (3.41)$$

$$E_w = \frac{3 P L^3}{64 b h^3 f} \quad (\text{apoios a } L/2) \quad (3.42)$$

sendo,

E_w - módulo de elasticidade em [Giga Pascal; GPa]
 P - valor em Newton, igual à diferença entre as médias aritméticas dos limites superiores e inferiores de carga aplicada,
 L - distância entre os apoios [cm],
 b, h - largura e altura da secção do provete [mm],
 f - valor da flecha na zona de flexão pura e igual à diferença das médias aritmética resultantes das cargas superiores e inferiores em [milímetros; mm].

A distância entre apoios é de 240 a 320 mm, ou seja, 12 a 16 vezes a espessura dos provetes, o raio de curvatura dos cutelos de aplicação de carga e apoios deverá ser $r = 30$ mm, e a dimensão dos provetes $20 \times 20 \times 300$ a 380 mm³. A velocidade de ensaio deve ser de modo a atingir a carga de 18 MPa em cerca de 30 s.

As cargas superiores e inferiores correspondem aos extremos da zona rectilínea do gráfico "carga - deformação". Estes valores são atingidos sucessivamente quatro vezes, verificando-se se se mantém a proporcionalidade, registando todos os valores.

EN 310 - Módulo de Elasticidade em Flexão para Aglomerados

Não existe actualmente uma norma europeia para a determinação do módulo de elasticidade em provetes de madeira maciça de pequenas dimensões. Assim, vamos descrever os princípios gerais do projecto de norma que se encontra em discussão para produtos derivados da madeira.

Esta norma europeia destina-se à determinação do módulo de elasticidade em aglomerados de madeira. É um procedimento baseado na aplicação de uma única carga superior pelo que representa de facto o módulo aparente de elasticidade, pois estão presentes na zona de ensaio esforço transverso. Para o cálculo procura-se a zona de proporcionalidade, tomando os pontos de carga a 40% e a 10% da carga de rotura como aproximações aos limites superior e inferior da zona recta da curva "carga-deformação", Figura 3.33.

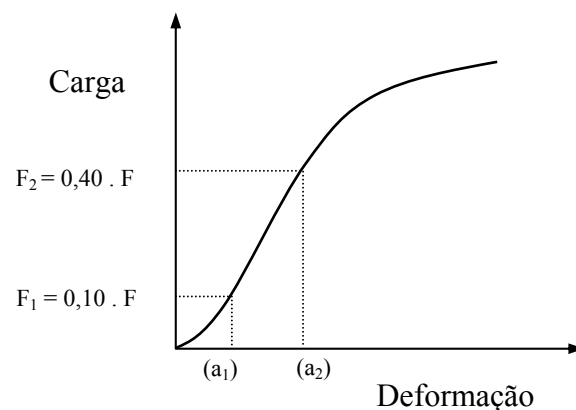


Figura 3.33 - Esquema da curva carga-deformação, e pontos de referência para as cargas e flechas.

A expressão matemática de cálculo é a seguinte:

$$E_m = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad (3.43)$$

onde,

- E_m - módulo de elasticidade à flexão [N/mm²]
- l - distância entre apoios [mm]
- b - largura do provete [mm]
- h - espessura do provete [mm]
- F_1 - força aplicada correspondente a 10% da força de rotura [N]
- F_2 - força aplicada correspondente a 40% da força de rotura [N]
- a_1 - flecha correspondente à força igual a 10% da força de rotura [mm]
- a_2 - flecha correspondente à força igual a 40% da força de rotura [mm]

O procedimento de ensaio é baseado na aplicação de uma força central com uma superfície cilíndrica de 30 mm de diâmetro, apoios cilíndricos de 15 mm de diâmetro. A distância entre apoios deverá ser de 20 vezes a espessura, sendo a largura do provete 50 mm.

Norma Europeia EN 408:2003

A norma Europeia EN 408:2003 faz uma abordagem prática sobre os principais procedimentos laboratoriais que permitem realizar ensaios de caracterização física e mecânica da madeira e lamelados colados de madeira, com vista à utilização dos dados obtidos em cálculo estrutural. Na introdução desta norma é referido expressamente que, por motivo da complexidade estrutural interna da madeira, muitas das características são de algum modo influenciadas pelo método de ensaio utilizado. Daqui a necessidade de compreender os diferentes procedimentos e procurar formas e dimensões de provetes que melhor traduzam o real comportamento da madeira.

Nesta norma é patente a tendência para evitar definir as dimensões dos provetes de ensaio, optando-se sim por definir relações entre dimensões e relações entre as dimensões e as montagens de ensaio (por exemplo, as distâncias entre apoios dependentes da espessura, e outras). Deste modo deixa-se mais liberdade para estudos de caracterização da madeira, desde as pequenas dimensões com madeira sem defeitos, até componentes de dimensão estrutural real.

Também nesta norma são dadas várias possibilidades de ensaio para a mesma característica como é o caso da flexão estática. São dadas possibilidades de ensaio e três e a quatro pontos e ainda diferentes possibilidades de medição da flecha de deformação, tendo em conta ao compromisso entre o rigor científico e a realização prática dos ensaios em laboratório e os meios mais usuais de medição de dimensões lineares.

O módulo de elasticidade local é definido como um ensaio de flexão a quatro pontos, com uma distância entre apoios de 18 vezes a espessura do provete, a distância entre as duas cargas

aplicadas de 6 vezes a espessura e a distância de referência para medição da flecha 5 vezes a espessura, numa zona centrada em relação à montagem de ensaio. A velocidade de aplicação da carga não deve exceder as 0,003 vezes a espessura do provete em cada segundo. A força máxima não deve exceder os 40% da carga máxima prevista em ensaios preliminares de 10 provetes de características semelhantes. O módulo de elasticidade local é calculado pela expressão,

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (3.44)$$

sendo, a a distância entre o apoio e carga do mesmo lado de simetria, l_1 a distância de referência para avaliação da flecha, F_2 e F_1 as forças aplicadas correspondentes a 40 % e 10 % da carga máxima prevista, e w_2 e w_1 as flechas correspondentes.

Neste método de cálculo o módulo de elasticidade tem um bom suporte teórico, pois a avaliação da flecha faz-se exclusivamente na zona de momento flector puro, onde a deformada é um arco de circunferência e longe da influência de outros esforços. No entanto, a realização prática dos ensaios em provetes de pequenas dimensões (por exemplo, até cerca de 30 mm de espessura), depara-se com uma dificuldade acrescida na medição da flecha, por ser uma distância muito curta devido ao comprimento do arco ser também reduzido, mas acresce ainda a dificuldade de o ponto base de medição se deslocar com o próprio provete.

Outra forma de calcular o módulo de elasticidade à flexão, segundo a norma EN 408:2203 é o módulo de elasticidade global à flexão, que tem por base uma flexão a 4 pontos, e em que as bases de referência para avaliação da flecha de deformação são os pontos de apoio fixos do provete e a flecha máxima a meio vão. Além da flecha aparecer ampliada em relação à medida para o módulo de elasticidade local, o medidor de deformação pode estar fixo no mesmo conjunto dos apoios.

A expressão definida na norma para cálculo do módulo de elasticidade global à flexão é o seguinte:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (3.45)$$

onde $E_{m,g}$ é o módulo global de elasticidade, b e h as dimensões da secção, l a distância entre apoios, a a distância entre o apoio e a carga de um dos lados do provete e F_2 e F_1 as forças aplicadas, e w_2 e w_1 as flechas correspondentes

A flecha de deformação é medida entre o ponto central de maior deslocamento e os apoios fixos; l – distância entre apoios; e $w_2 - w_1$ a diferença de flecha entre o ponto 2 e o ponto 1.

Ainda na norma EN 408:2003 se define o módulo de elasticidade aparente à flexão, que consiste no ensaio a 3 pontos, sendo calculado pela expressão,

$$E_{m,app} = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4 b h^3 (w_2 - w_1)} \quad (3.46)$$

onde, l_1 é a distancia entre apoios, F_2 e F_1 a força em dois pontos da zona de proporcionalidade, aplicada a meio vão, e w_2 e w_1 as respectiva flechas de deformação, medida no ponto de aplicação da carga. A flecha é a flecha total e l_1 a distância entre os apoios $a = l_1 = L/2$.

Discussão geral dos vários métodos

Na Figura 3.34 é dada a explicação experimental da razão de se definirem em todas as normas uma distância entre apoios, relacionada com a altura da secção do provete. Para distâncias inferiores a 16 vezes a altura do provete (flexão a quatro pontos), as forças do esforço transversal, que originam tensões de corte, são muito significativas relativamente às tensões longitudinais de compressão e de tracção, pelo que as fórmulas aplicadas deixam de representar o modelo real. Por outro lado, distâncias entre apoios maiores do que 25 vezes a altura do provete, começam também a não ser representadas as fórmulas de cálculo tal como apresentadas anteriormente, também porque começa a ser significativa a influência do peso próprio relativamente à carga aplicada, com contribuição para a flecha de deformação.

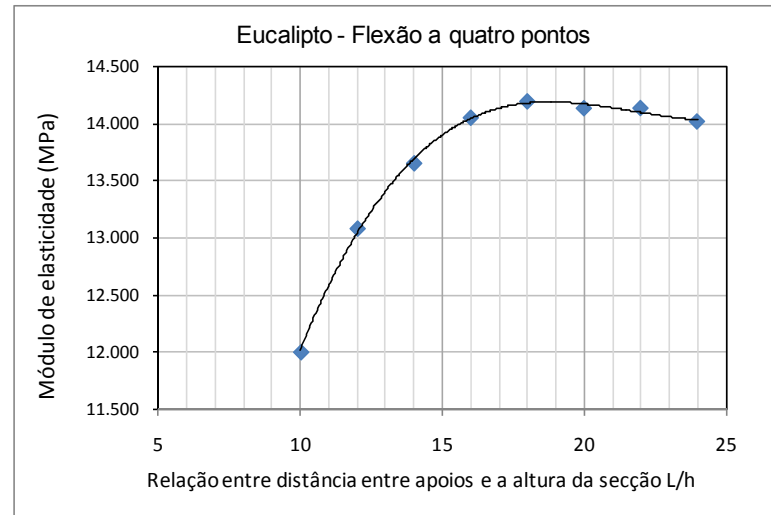


Figura 3.34 - Influência da distância entre apoios, no valor do módulo de elasticidade à flexão.

Mais uma vez fica confirmado que a decisão das normas de caracterização escolherem a distância entre apoios de 14 vezes a altura da secção (ensaio a 3 pontos) e de 18 vezes a altura da secção (ensaio a 4 pontos), é um compromisso aceitável, no sentido de facilitar os ensaios em laboratório, mas deve ter-se em atenção que em situações reais de cálculo estrutural, com distâncias entre apoios mais elevadas do que a proporção definida, a flecha total deve resultar de uma análise onde seja incluída a componente devida ao peso próprio, veja-se o exemplo do resultado experimental representado na Figura 3.35.

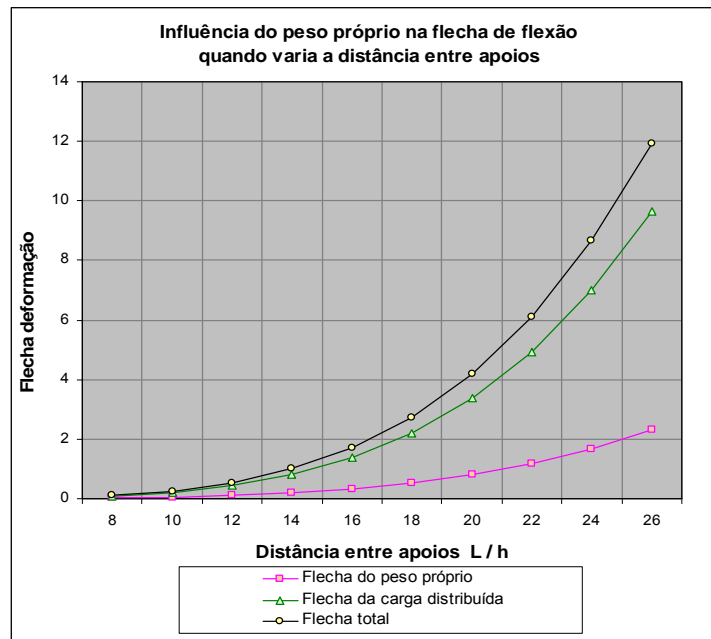


Figura 3.35 – Flecha de deformação devida ao peso próprio da viga e devida à carga aplicada.

Relativamente à aplicação de carga num ou dois pontos, considera-se o seguinte: para caracterização de um material ou das suas propriedades mecânicas, os métodos baseados na aplicação de apenas uma carga (ensaio de flexão a três pontos), apresenta-se como um bom compromisso tendo em conta que é suficientemente preciso e de mais fácil execução e cálculo. No entanto, há que ter em atenção alguns inconvenientes, pois uma carga concentrada num ponto provoca um pico do momento flector no ponto de aplicação de carga, podendo coincidir ou afastar-se de defeitos ou mesmo pequenas heterogeneidades invisíveis. Pode esperar-se portanto maior dispersão de resultados por este método. Os provetes para todos os métodos de ensaio têm de ser escolhidos de madeira sem defeitos, devendo registar-se e tentar dar explicação a qualquer anomalia não esperada.

Outro aspecto encarado de diferentes modos nas normas analisadas é a tomada de valores de carga e deformação a introduzir na expressão matemática de cálculo. As normas (ASTM e BS) servem-se daqueles valores no limite de proporcionalidade. Este ponto nem sempre é nítido ou fácil de estabelecer, sobretudo quando a curva carga-deformação apresenta irregularidades. Por outro lado, a zona rectilínea da curva real tem uma inclinação superior ou inferior ao pressuposto pela união do ponto do limite de proporcionalidade com a origem (a) na Figura 3.36.

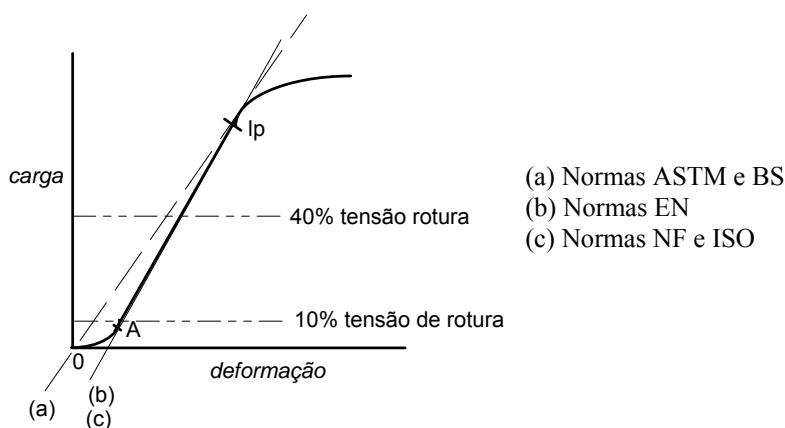


Figura 3.36 - Estudo da curva "carga-deformação" para determinação do módulo de elasticidade (ponto A - início da zona recta ou de proporcionalidade).

As normas (NF e ISO) tomam as médias de sucessivas aplicações de carga e respectivas deformações, após vários ciclos. As intensidades das cargas aplicadas estão pré-estabelecidas, mas com alguma liberdade de serem modificadas para aproximação à zona recta do gráfico. Ora isto provoca uma aparente duplicação de trabalho porque afinal temos de fazer sempre a determinação e estudo da curva de deformação. A norma ISO mede a flecha de deformação na zona de flexão pura, entre os pontos de carga, o que torna a execução mais simples do que a

norma francesa e também na B.S. - "método b", que medem a flecha entre pontos mais próximos que os de aplicação de carga. Os resultados práticos foram iguais ou muito semelhantes.

Uma outra tentativa de rodear os problemas referidos é expressa na norma europeia EN 310 para derivados da madeira, em que se tomam como valores de referência os pontos de carga a 40% e 10% da carga de rotura (esperada ou efectiva), e as correspondentes deformações. O inconveniente é que assim se tem necessidade de levar sempre o provete à rotura.

Para cálculo, o tomar a proporcionalidade perfeita, seja, a parte recta do gráfico, ou a linha de união do limite de proporcionalidade com a origem, dá variações de, mais ou menos 2%.

As diferenças mais marcantes entre as várias normas aparecem entre os métodos baseados na aplicação da carga num ponto (MOE - módulo aparente de elasticidade) e os que se baseiam na aplicação da carga em dois pontos.

Nos restantes aspectos, verificou-se que as normas diferem em pequenos pormenores, tais como a distância entre apoios de carga, dimensões dos provetes e procedimento de ensaio, mas as diferenças dos valores encontrados são muito pequenas e com um desvio não regular (aleatório quando se tratar de séries de pequeno número de ensaios).

3.14 Coeficiente de Poisson

No estudo da teoria da elasticidade constata-se um comportamento dos materiais que ao deformar-se elasticamente tendem a manter o seu volume. Neste sentido, a uma expansão no sentido da tracção segundo um eixo, corresponde a uma contracção de dimensão linear, pelo menos numa das direcções que lhe são perpendiculares, mesmo não tendo havido nenhuma tensão aplicada nesta direcção. Para materiais com elasticidade linear, homogéneos e isotrópicos, esta relação entre a expansão numa direcção e as contracções relativas em direcções perpendiculares é uma constante do material e chama-se efeito de Poisson. O significado físico deste comportamento diz-nos que a maioria dos materiais resiste mais à variação de volume do que à variação de forma. Este facto compreende-se pelo raciocínio da menor energia, pois em geral a energia para variar o volume é superior à energia para mudar de forma. Assim, nas condições simplificadas da lei de Hooke generalizada para materiais homogéneos e isotrópicos, teremos uma constante elástica chamada coeficiente de Poisson que se define matematicamente por,

$$\nu_{xy} = - \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} \quad (3.47)$$

sendo ε_{xx} a deformação unitária na direcção perpendicular à da aplicação da carga e ε_{yy} a deformação unitária na direcção da aplicação da carga. A explicação gráfica é a apresentada na Figura 3.37.

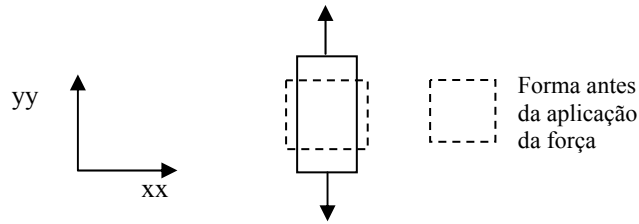


Figura 3.37 – Esquema da deformação correspondente ao coeficiente de Poisson.

Esta característica elástica é fundamental para definir modelos através de métodos de cálculo computacional, entre outros nomeadamente pelo método dos elementos finitos, pelo que são determinados experimentalmente para diversos materiais.

Embora o significado físico indique que para a maioria dos materiais uma expansão numa direcção corresponde a uma diminuição de dimensão nas direcções transversais, para estes materiais o coeficiente de Poisson é dado com um valor positivo, pela razão da sua definição incluir o produto pela constante (-1). Segundo (Lakes, 1993) os materiais com coeficiente de Poisson negativo são aqueles em que se dá uma expansão transversal ao mesmo tempo de uma expansão longitudinal por efeito de uma força também longitudinal. Estes materiais pelo seu comportamento não convencional tomam designações de “anti-borracha” ou materiais “auxéticos”. Este comportamento aparentemente estranho deve-se a um arranjo muito particular da sua estrutura, com ligações em forma de favo com interiores vazios (espumas), o que de certo modo acontece também com as madeiras, que apresentam notórias perturbações relativamente a esta propriedade.

Deduções encontradas na bibliografia (Beer, 1962) permitem definir relações matemáticas que respondem à determinação da deformação numa direcção quando um elemento é sujeito a um estado de tensão tridimensional (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz}), como sendo,

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (3.48)$$

e expressões correspondentes para as outras direcções.

Teoricamente seria possível considerar a existência de coeficientes de Poisson em diferentes combinações de alinhamentos direccionais, tal como apresentado na matriz,

$$\begin{pmatrix} \nu_{xx} & \nu_{xy} & \nu_{xz} \\ \nu_{yx} & \nu_{yy} & \nu_{yz} \\ \nu_{zx} & \nu_{zy} & \nu_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

já sem falar da possibilidade de estes valores serem diferentes na tracção e na compressão, para as mesmas direcções, uma vez que nenhuma informação sobre esta possibilidade foi encontrada na bibliografia consultada.

Algumas das possibilidades apresentadas na matriz são simplificadas por terem valores fixos ($\nu_{xx}=1$; $\nu_{yy}=1$; $\nu_{zz}=1$), restando assim seis possibilidades. No caso de materiais isotrópicos e por via de várias simplificações, acaba por se chegar a um único valor do coeficiente de Poisson para caracterizar o material, mesmo que solicitado as diferentes direcções ortogonais de aplicação de tensões uniaxiais.

Para os materiais ortotrópicos, como é o exemplo da madeira, das seis possibilidades apresentadas admite-se por razões de simetria as seguintes simplificações,

$$\begin{aligned} \nu_{xy} &= \nu_{yx} \\ \nu_{xz} &= \nu_{zx} \\ \nu_{yz} &= \nu_{zy} \end{aligned} \quad (3.50)$$

ficando um número mínimo de três os valores do Coeficiente de Poisson que é necessário considerar, e determinar experimentalmente, para caracterização destes materiais pelas leis da mecânica dos materiais.

Na Tabela 3.3 apresentam-se os valores de referência dos Coeficientes de Poisson para alguns materiais mais conhecidos e na Tabela 3.4 para algumas espécies de madeira.

Tabela 3.3 – Valores indicativos do Coeficiente de Poisson de alguns materiais.

Material	Sem unidades
Limite máximo para os materiais isotrópicos	0,50
Borracha	0,48
Ferro	0,29
Aço inox	0,30
Cobre	0,37
Alumínio	0,35
Vidro	0,24
Cortiça natural	$\simeq 0$
Limite mínimo para materiais isotrópicos	- 1

(Fonte: confirmado diferentes tabelas técnicas).

Como definido nos modelos matemáticos, secção 3.5, o coeficiente de Poisson só pode ter valores entre (-1) e (1/2).

Tabela 3.4 – Valores indicativos do Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras americanas, a 12 % teor em água (David W. Green, 1999).

Espécie	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}
Carvalho branco	0,37	0,43	0,62
Mogno africano	0,30	0,64	0,60
Pinho Ponderosa	0,34	0,40	0,43
Espruce de Sitka	0,37	0,47	0,44

O conhecimento do coeficiente de Poisson permite assim determinar a variação dimensional transversal, num material isotrópico submetido a uma carga axial pela relação,

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\frac{\nu \sigma_x}{E} \quad (3.51)$$

O facto do coeficiente de Poisson da cortiça ser perto de zero torna-a ideal para a sua maior utilização que é ser utilizada como vedante no gargalo de uma garrafa, pois no momento da aplicação é comprimida axialmente mas não expande lateralmente o que facilita a introdução no gargalo. Se se tratasse de uma borracha com um valor de coeficiente de Poisson perto de 0,48 o engrossamento dificultava imenso ou impedia a introdução, pois cada vez a força seria maior e maior a expansão lateral. Na madeira como veremos mais adiante o coeficiente de Poisson é uma característica difícil de determinar, por ser um material acentuadamente ortotrópico e orientado. Os valores de comportamento mecânico semelhante ao efeito de Poisson podem ser manipulados em materiais construídos, através da introdução de alvéolos, fibras, ninhos de abelha, espumas, bi-materiais, entre outros.

Quando um provete de madeira é solicitado mecanicamente numa dada direcção é de esperar uma deformação nessa mesma direcção, proporcional ou não, dependendo da intensidade da tensão aplicada e da própria característica do material. Neste mesmo raciocínio pode perguntar-se o que acontece às dimensões do corpo sólido solicitado, na direcção ou direcções perpendiculares à da força aplicada e respectiva deformação. Há três hipóteses, ou a dimensão transversal não se altera, ou se altera para maior dimensão, ou se altera para menor dimensão. A resposta a esta questão é dada por uma característica elástica dos materiais que relaciona a deformação na direcção transversal, resultante da deformação na direcção de aplicação da tensão, que tem o nome de coeficiente de Poisson, modelo físico apresentado na Figura 3.34, mas que para madeira terá de ter uma diferente abordagem, pois trata-se de um material orientado e alveolado.

Considerando um material perfeitamente incompressível (semelhante a um líquido viscoso), sujeito a pequenas tensões dentro do limite elástico, o coeficiente de Poisson seria por dedução matemática exactamente igual a 0,5. Como exemplo de vários materiais cita-se que a cortiça pode ter coeficiente de Poisson muito próximo de zero, enquanto que uma borracha tem valores muito próximos de 0,5. Algumas espumas de polímeros podem apresentar um coeficiente de Poisson aparente (no volume exterior do corpo sólido) inferiores a 1, o que se deve a um realinhamento da posição dos alvéolos interiores.

Para materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira, para pequenas deformações na zona elástica, e por razão de manutenção do volume, estabelecem-se algumas relações (David W. Green, 1999);

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} ; \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x} ; \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (3.52)$$

Nas aplicações em madeira os eixos xx, yy e zz transformam-se por convenção de utilidade prática em (L – direcção paralela às fibras; T – direcção tangencial às camadas de crescimento; e R – direcção paralela aos raios medulares).

Uma equipa de investigadores (Baer, et al 2007), realizaram estudos para determinação do módulo de elasticidade, módulo de corte e coeficiente de Poisson em materiais orientados (fibra de carbono com resinas), através de um método não destrutivo baseado na frequência própria do material, designado por método “resonalyser”. Esta técnica deu resultados com uma aproximação de cerca de 10% em relação ao ensaio uniaxial, para um material com um valor muito baixo de coeficiente de Poisson. O método “resonalyser” consiste numa combinação entre os métodos numéricos e o método experimental para determinar as constantes elásticas de matérias ortotrópicos industriais, através de determinação das frequências próprias do provete rectangulares livremente suspensos. É necessário determinar a três primeiras frequências de ressonância de uma placa rectangular e as duas primeiras frequências de ressonância de uma barra, uma das barras com a direcção longitudinal paralela às fibras e outra com a direcção longitudinal perpendicular à direcção das fibras.

Um dos aspectos mais importante a destacar dos estudos de Baer, *et al* (2007) é o que se encontra representado na Figura 3.38, para o compósito de fibra de carbono com resina “polyphenylene sulphide” (PPS), comercialmente designado por ® CETEX. Registou-se um comportamento tal que o valor do coeficiente de Poisson determinado experimentalmente varia com a tensão aplicada, o que curiosamente também se veio a verificar nos ensaios de determinação dos coeficientes de Poisson da madeira por métodos estáticos uniaxiais, como se verá no capítulo de desenvolvimento experimental.

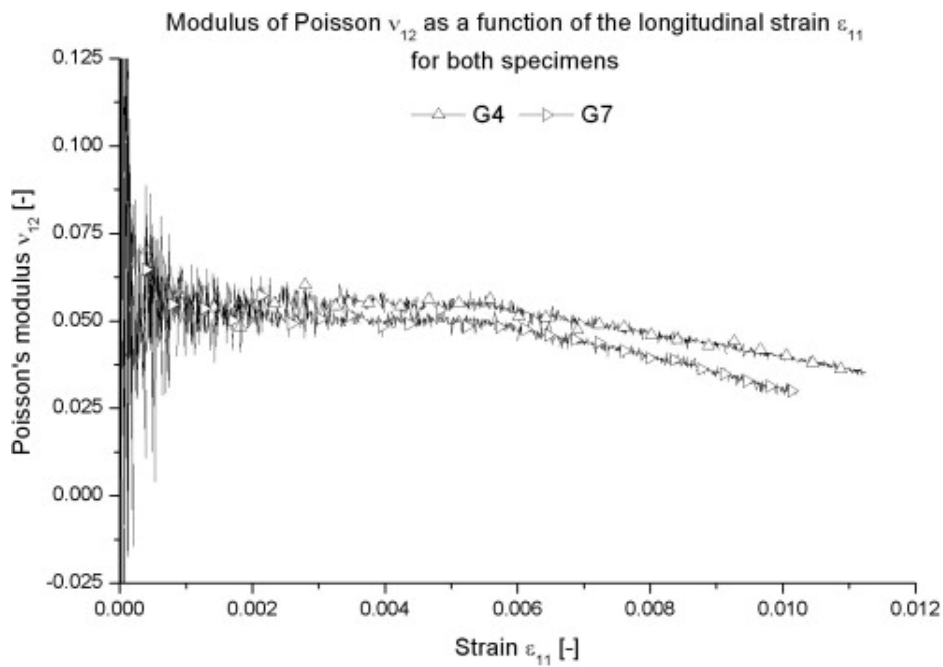


Figura 3.38 – Evolução dos valores experimentais do coeficiente de Poisson para materiais compósitos industriais com acentuada anisotropia. (Baer, 2007).

3.15 Módulo de corte

3.15.1 Análise no plano

Considere-se que num corpo à tracção se pretende analisar a distribuição local de tensões numa figura elementar infinitesimal, constituída por um pequeno quadrado (representativo do ponto), com os seus lados orientados a 45° relativamente à direcção da força de tracção, conforme representado na Figura 3.39 (a).

Por definição o tensor de tensões de qualquer ponto de uma peça pode ser obtido através do círculo de Mohr, Figura 3.39. Segundo o diagrama de equivalência entre as tensões de tracção / compressão e as tensões de corte (círculo de Mohr), temos a deformação do quadrado representado na Figura 3.40 (b).

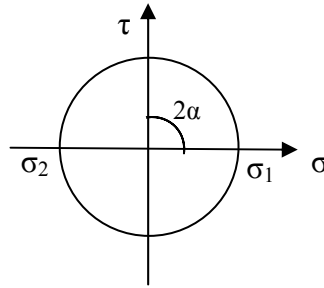


Figura 3.39 – Representação das tensões pelo círculo de Mohr.

Sendo a peça elementar sujeita a um esforço de tracção F_1 e de compressão F_2 , nas superfícies A_1 e A_2 , de tal modo que $\sigma_1 = \sigma_2$, temos a situação do estado de tensão da Figura 3.40, representada no círculo de Mohr da Figura 3.39.

Tendo em conta a situação de partida anteriormente referida, se considerarmos uma rotação de eixos da Figura 3.40 (b) num ângulo de $\alpha = 45^\circ$, resulta pela equivalência definida pelo círculo de Mohr, que as tensões normais,

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \tag{3.53}$$

e as tensões de corte atingem o seu valor máximo,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_{\text{máx.}} \tag{3.54}$$

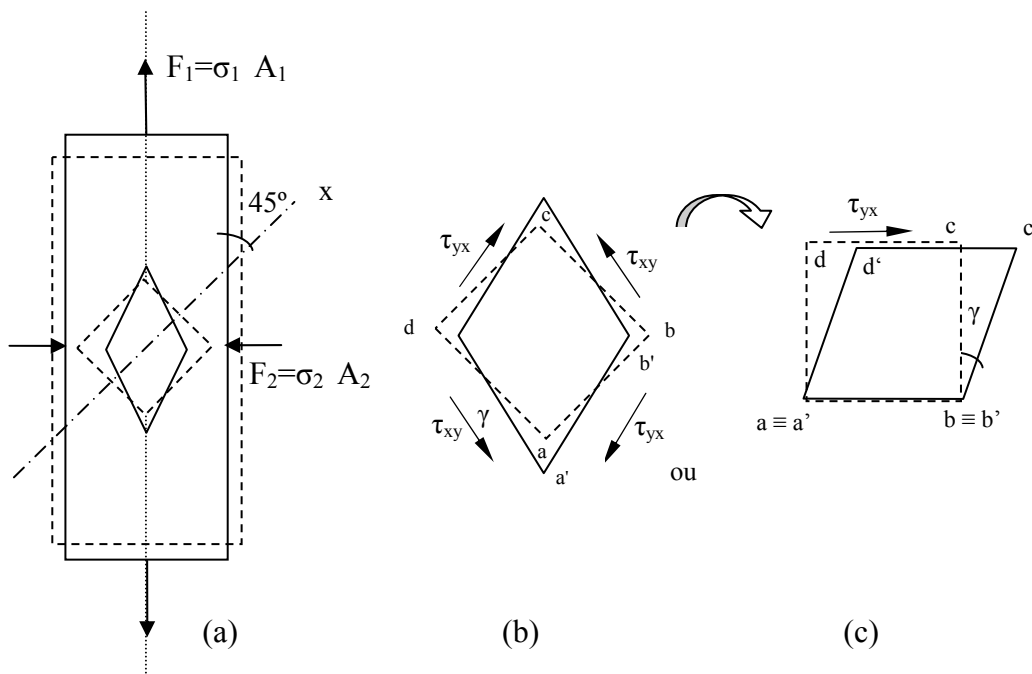


Figura 3.40 – Representação da equivalência de tensões e deformações de um ponto: (a) forças sobre o elemento; (b) deformação e tensões de corte equivalentes; (c) reorientação do elemento com as tensões de corte. (Desenho do autor).

Na Figura 3.40 (c) temos o mesmo elemento da Figura 3.40 (b), mas adaptado de modo a coincidirem os desenhos a traço interrompido e traço cheio (antes e depois da deformação), o lado ab com o lado $a'b'$, admitindo que o seu comprimento não variou.

Se o material em estudo obedece à lei de Hooke (no domínio elástico) então haverá uma relação directa entre a intensidade da tensão de corte τ_{yx} e a deformação angular γ (τ_{yx} daqui em diante representada apenas por τ), o que vem representado matematicamente pela expressão,

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (3.55)$$

Na Figura 3.41 voltamos a analisar as deformações do modelo elementar, retirando as seguintes relações: o crescimento da diagonal ac para $a'c'$ tem a ver com a extensão na direcção e sentido da tensão de tracção; e a diminuição da diagonal bd para $b'd'$ está dependente da extensão negativa na direcção e sentido da tensão de compressão, com as seguintes representações,

$$a'c' = ac + ac \cdot \varepsilon_x \quad a'c' = ac (1 + \varepsilon_x) \quad (3.56)$$

$$b'd' = bd + bd \cdot \varepsilon_y \quad b'd' = bd (1 + \varepsilon_y) \quad (3.57)$$

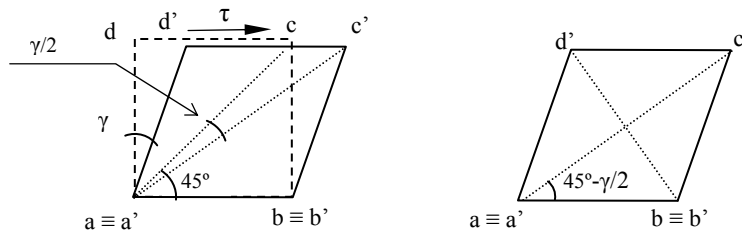


Figura 3.41 - Relação entre a deformação elementar e os ângulos em duas figuras simplificadas da Figura 3.37.

Utilizando relações de ângulos e os lados da Figura elementar deformada, a partir da trigonometria, e no sentido de relacionar os ângulos com a variação de comprimento das diagonais (dada pelas extensões), temos,

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{\frac{b'd'}{2}}{\frac{a'c'}{2}} = \frac{b'd'}{a'c'} \quad (3.58)$$

substituindo as relações (3.55) e (3.56) temos,

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{bd \cdot (1 + \varepsilon_y)}{ac \cdot (1 + \varepsilon_x)} \quad (3.59)$$

e considerando a figura elementar com a forma de quadrado, como foi dito anteriormente, onde $ac = bd$, vem,

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{(1 + \varepsilon_y)}{(1 + \varepsilon_x)} \quad (3.60)$$

a primeira parte da equação pode por sua vez ser apresentada da forma,

$$\operatorname{tg}\left(45 - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{\operatorname{tg}45 - \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2}}{1 + \operatorname{tg}45 \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2}} \quad (3.61)$$

mas, para ângulos γ muito pequenos (como acontece no domínio elástico das deformações de um ponto do material, pode-se admitir, sem grande erro, que,

$$\operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} \cong \frac{\gamma}{2} \quad (3.62)$$

(exemplo, $\operatorname{tg} 2^\circ = \operatorname{tg} 2\pi/180 = \underline{0,03492077}$ e $2\pi/180 = \underline{0,03490667}$),

o que vem simplificar a equação (3.61) para,

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{1 - \frac{\gamma}{2}}{1 + \frac{\gamma}{2}} \quad (3.63)$$

igualando as equações (3.60) e (3.63) fica,

$$\frac{1 + \varepsilon_y}{1 + \varepsilon_x} = \frac{1 - \frac{\gamma}{2}}{1 + \frac{\gamma}{2}} \quad (3.64)$$

Mas, na situação considerada de corte puro com o elemento orientado a 45° , a extensão na direcção 1 é dependente da tensão σ_x nessa mesma direcção mais a contribuição da extensão σ_y na direcção perpendicular afectada por definição pelo coeficiente de Poisson ν ,

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.65)$$

e no caso considerado de corte puro o círculo de Mohr permite as simplificações,

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{máx} \quad (3.66)$$

sendo $\sigma_1 = \sigma_x$ e $\sigma_2 = \sigma_y$, chega-se a,

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y = \frac{\sigma_x (1+\nu)}{E} = \frac{\tau (1-\nu)}{E} \quad (3.67)$$

sendo ε_x a extensão unitária na direcção do eixo 1 da Figura 3.37, ε_y a extensão unitária na direcção do eixo 2 Figura 3.37 e ν o respectivo coeficiente de Poisson, que relaciona estas duas extensões em duas direcção perpendiculares.

Substituindo os ε_x e ε_y da equação (3.66) na equação (3.63), vem,

$$\frac{1 - \frac{\tau(1+\nu)}{E}}{1 + \frac{\tau(1+\nu)}{E}} = \frac{1 - \frac{\gamma}{2}}{1 + \frac{\gamma}{2}} \quad (3.68)$$

que depois de simplificada resulta em,

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\tau(1+\nu)}{E} \quad (3.69)$$

No entanto, sabendo pela relação (3.54) que $\gamma = \tau/G$, ficamos finalmente com a conhecida expressão que relaciona o módulo de elasticidade à tracção e compressão, com o módulo de elasticidade transversal ou módulo de distorção, que é, tal como o módulo de elasticidade, uma constante do material, (deduções adaptadas com maior detalhe a partir de Timoshenko (1976).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \quad (3.70)$$

Tomando em consideração o que foi dito anteriormente e a representação do quadrado elementar da Figura 37, há uma relação bem definida entre a força de tracção segundo o comprimento do elemento, a força de compressão na direcção perpendicular, o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade linear e o ângulo de deformação do quadrado. Esta relação é dada pela constante característica dos materiais que é o módulo de corte, ou também chamado por alguns autores módulo de distorção G .

O módulo de corte representa fisicamente a rigidez à deformação angular e à torção. Exemplos de valores do módulo de corte para materiais isotrópicos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Módulos de corte de alguns materiais isotrópicos.

Material	MPa
Borracha	0,30
Aço	79 300
Cobre	63 400
Alumínio	25 500
Vidro	26 200

Fonte: (Moura Branco, 1985).

Na realidade, para materiais isotrópicos o módulo de corte é definido como a relação entre a tensão pura de corte e a deformação unitária de corte, o que segundo alguns autores vem representado por,

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx}} = \frac{\tau_{xy}}{2 \cdot \varepsilon_{xy}} \quad (3.71)$$

mas, tendo em conta as simplificações, vem dar na mesma expressão já deduzida anteriormente,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.72)$$

O senso comum e a 2ª lei da termodinâmica exigem que a uma tensão positiva corresponda uma deformação positiva, o que também obriga a que o módulo de corte também seja positivo. Considerando que também o módulo de elasticidade é positivo, da expressão (3.72), deve concluir-se que em nenhuma situação o coeficiente de Poisson pode ser inferior a (-1).

Do ponto de vista físico a forma mais evidente da presença do módulo de corte é num cilindro sujeito a um momento de torção centrado no mesmo eixo do cilindro, aparecendo o módulo de distorção como a “elasticidade” à deformação angular, seguindo a lei de Hooke, equação (3.73) já apresentada anteriormente, correspondendo ao modelo da Figura 3.42.

$$\tau_{xy} = \gamma \cdot G \quad (3.73)$$

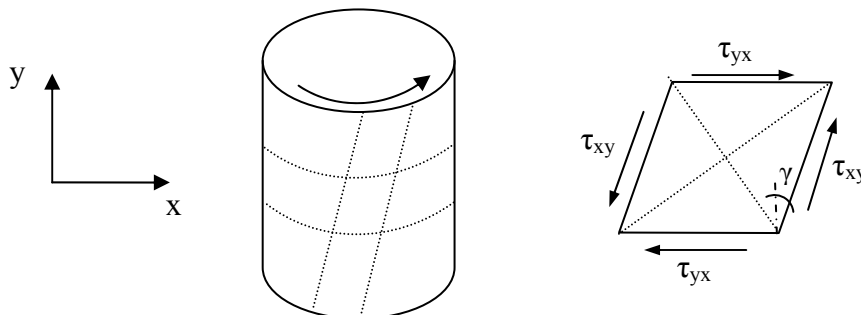


Figura 3.42 – Condição ideal de criação de tensão de corte puro à superfície de um cilindro em torção.

No entanto esta constante dos materiais G está presente em outras solicitações, nomeadamente sempre que estejam presentes tensões de corte, em qualquer direcção que estas apareçam.

A tensão de corte à superfície do cilindro, nos lados do quadrado elementar viria dada por,

$$\tau_{yx} = \frac{M_t r}{I_p} \quad (3.74)$$

sendo M_t o momento torçor, r o raio do cilindro e I_p o momento polar de inércia da secção cilíndrica.

Segundo Morozov (2003), o módulo de corte de materiais ortotrópicos pode ser determinado por um ensaio de tracção não paralelo ao eixo principal de resistência designado por eixo 1 (ensaios conhecidos pela designação inglesa “off-axis”). Este investigador realizou ensaios de comprovação da sua teoria em materiais compósitos orientados, formados por fibras paralelas coladas com resinas artificiais. O esquema de ensaio de Morozov é o indicado na Figura 3.43.

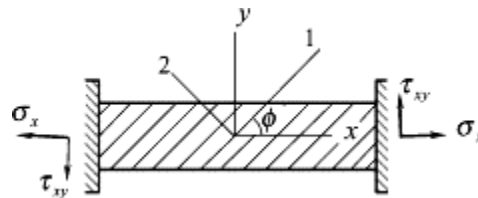


Figura 3.43 - Ensaio “off-axis” de um material ortotrópico para determinação experimental do módulo de corte, segundo Morozov (2003).

Na Figura 3.43 o eixo 1 corresponde à direcção paralela às fibras e o eixo 2 a direcção perpendicular às fibras. O eixo de ensaio xx faz um ângulo ϕ com o eixo principal 1.

Ainda segundo Morozov (2003), o comportamento do modelo estudado necessita para ser caracterizado mecanicamente, de quatro constantes elásticas, como sejam, os módulos de elasticidade nas direcções 1 e 2, (E_1 e E_2), um coeficientes de Poisson, ν_{12} ou ν_{21} e do módulo de corte G_{12} . A afirmação de ser necessário um dos coeficientes de Poisson ν_{12} ou ν_{21} , deriva da condição de simetria,

$$\nu_{12} E_1 = \nu_{21} E_2 \quad (3.75)$$

Várias deduções desenvolvidas por Morozov e Vasiliev (2003) permitem chegar à relação (3.75) que permitiria determinar experimentalmente o módulo de corte a partir de um ensaio de tracção “off-axis”.

$$G_{12} = \frac{\text{sen}^2 \phi \cdot \text{cos}^2 \phi}{\frac{1}{E_x} - \frac{\text{cos} \phi}{E_1} - \frac{\text{sen} \phi}{E_2} + \left(\frac{\nu_{21}}{E_1} + \frac{\nu_{12}}{E_2} \right) \text{sen}^2 \phi \cdot \text{cos}^2 \phi} \quad (3.76)$$

No entanto, o ensaio de tracção é perturbado pelo aparecimento de tensões de corte τ_{xy} , com mostrado na Figura 3.43, dependendo do facto inevitável das amarrações da máquina de ensaios não se deslocarem lateralmente, este facto acaba por impor condições ao apresentado anteriormente, resultando,

$$G_{12} \geq \frac{E_1}{2(1+\nu_{21})} \quad (3.77)$$

e,

$$G_{12} \leq \frac{E_2}{2(1+\nu_{12})} \quad (3.78)$$

O cumprimento destas duas condições é conseguido para um valor ϕ_0 que verifique,

$$\text{sen}^2 \phi_0 = \frac{e_1}{e_2} \quad (3.79)$$

sendo,

$$e_1 = \frac{1+\nu_{21}}{E_1} - \frac{1}{2G_{12}} \quad e_2 = \frac{1+\nu_{21}}{E_1} + \frac{1+\nu_{12}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \quad (3.80)$$

O que torna o problema difícil de resolver, pois aparece um intervalo, que condiciona o valor determinado experimentalmente. Estabeleceram ainda aqueles investigadores que o módulo de corte dos materiais orientados estudados no ensaio “off-axis” depende do ângulo de ensaio, conforme resultados do gráfico da Figura 3.44.

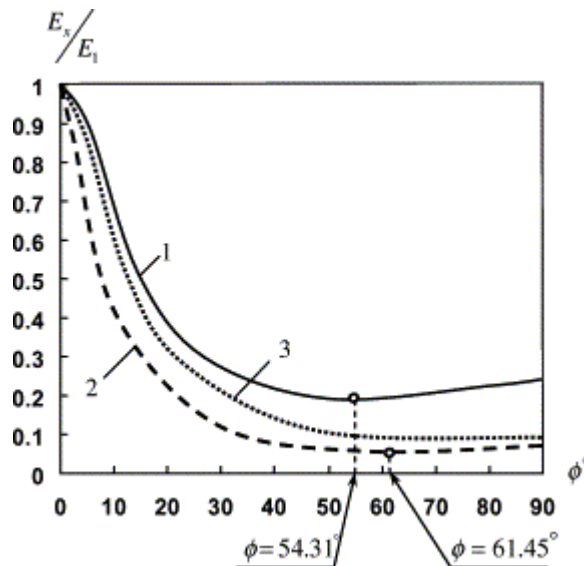


Figura 3.44-. Resultados experimentais de dependência da relação E_x/E_1 com o ângulo ϕ , para diferentes materiais compósitos de resina epoxídica, com: (1) fibra de vidro; (2) fibra de aramida (® Kevlar); e (3) fibra de carbono. (Morosov, 2003).

Em conclusão, dos estudos de Morosov (2003), para encontrar G_{12} , têm de ser realizados vários ensaios para vários valores de ϕ , achar os valores de G_{12} na vizinhança do valor do ângulo de ensaio, até encontrar o valor ϕ_0 , para assim seleccionar o valor correcto do G_{12} , que satisfaça simultaneamente as equações (3.76) e (3.77).

3.15.2 Significado físico do Módulo de corte para a madeira

No caso particular da madeira, muitas das simplificações usadas para obter as equações anteriormente apresentadas, nomeadamente a expressão (3.69), não são possíveis. Temos de ter em conta que a madeira é um material orientado, acentuadamente ortotrópico, e constituído por uma organização interna baseada num arranjo estrutural em tubos justapostos. Para melhor compreender a influência que o arranjo geométrico tem no comportamento físico e mecânico recorremos ao modelo da Figura 3.45.

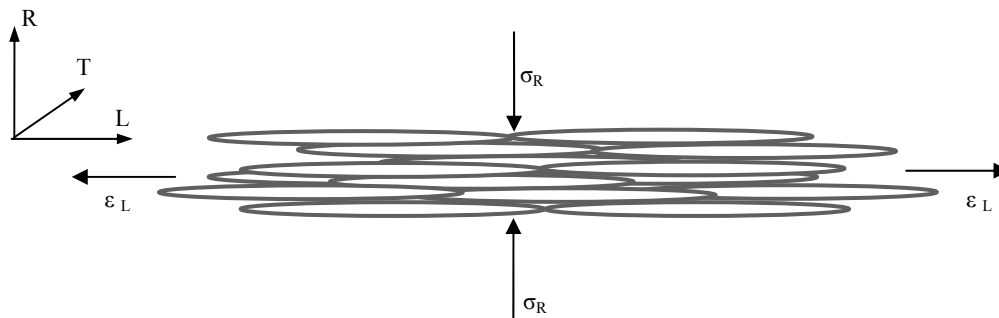


Figura 3.45 - Relação entre a deformação por compressão transversal e a extensão longitudinal. (Desenho do autor).

O facto de ter células ocas orientadas no sentido longitudinal faz com que uma compressão transversal tenha uma muito fraca resposta na extensão longitudinal, mas caso se tratasse de compressão longitudinal a expansão numa das direcções, tangencial ou radial, seria enorme.

Partindo da definição teórica explorada anteriormente e aplicando a um modelo real em madeira, teremos que o módulo de corte tem um significado físico associado a uma deformação angular da geometria do provete, tal como representado na Figura 3.46, quando este é solicitado por duas forças de sinal contrário, mas não alinhadas, $F1$ e $F2$.

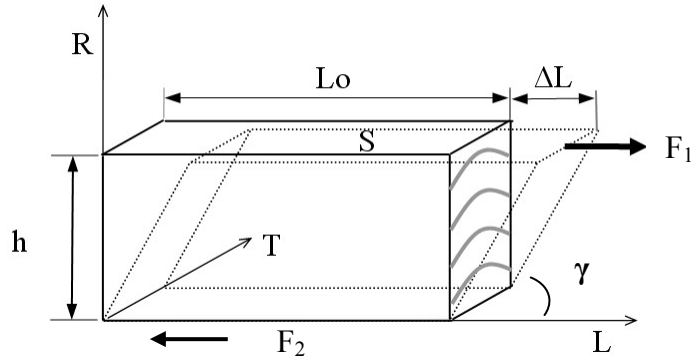


Figura 3.46 – Representação da deformação que aparece associada à definição do módulo de distorção, na deformação por corte paralelo às fibras da madeira.

Para materiais ortotrópicos, como é claramente a madeira, o módulo de distorção G_{xy} vem dado pela expressão validada experimentalmente e usada em muitos códigos de elementos finitos no plano xy , (Zienkiewicz, 1977).

$$G_{xy} = \frac{E_x \cdot E_y}{E_x \cdot E_y + 2\nu_{xy} \cdot E_x} \quad (3.81)$$

onde E_x e E_y são os módulos de elasticidade em direcções perpendiculares e ν_{xy} o respectivo coeficiente de Poisson entre essas duas direcções.

A utilização desta expressão permite relacionar os módulos de distorção nas várias direcções ortogonais com os módulos de elasticidade e com os coeficientes de Poisson. Para as diferentes direcções – longitudinal, radial e tangencial – fazem-se rodar os índices xy em conformidade com as respectivas direcções.

Relativamente à representação gráfica da Figura 46, a força F é designada por força de corte uma vez que induz tensões de corte directas e uma deformação angular característica das tensões de corte.

Segundo as demonstrações de (Bodig, 1982), a tensão de corte paralela às fibras τ_{LR} e num plano radial (LR), é dada pela expressão semelhante à dos restantes materiais, apenas com os necessários índices de referencia às direcções a que dizem respeito,

$$\tau_{LR} = \frac{F}{S} \quad (3.82)$$

onde F é a força na direcção paralela ao plano de corte e S a superfície sujeita a corte.

A deformação angular γ definida na Figura 3.40, se for pequena resulta que ($\text{tg } \gamma \approx \gamma$), em radianos), tal como anteriormente demonstrado, portanto,

$$\gamma = \frac{\Delta L}{h} \quad (3.83)$$

sendo γ uma grandeza adimensional tal como ε na deformação por tracção pura.

Considerando válida a lei de Hooke, a deformação ΔL é proporcional à força aplicada F , sob a relação $F = \text{const.} \Delta L$, que depois de substituídas F e ΔL tiradas das equações (3.82) e (3.83) temos,

$$\tau_{LR} = \frac{\text{const.} \cdot h}{S} \cdot \gamma \quad (3.84)$$

mas $\frac{\text{const.} \cdot h}{S}$ é uma constante independente da tensão de corte e da deformação angular, tomando o nome de módulo de corte ou de distorção e sendo representado por G ,

$$G_{LR} = \frac{\tau_{LR}}{\gamma} \quad (3.85)$$

que é a mesma expressão apresentada em (3.73) para materiais isotrópicos. Reportando a uma representação gráfica à semelhança da tensão–deformação linear, também na representação gráfica tensão de corte deformação angular relativa o coeficiente angular da zona proporcional representa uma constante do material, que neste último caso é o módulo de distorção.

3.15.3 Avaliação do módulo de corte segundo a EN 408:2003

Segundo a norma EN 408:2003 é reconhecida a dificuldade em obter valores experimentais em componentes reais de dimensão estrutural. Mesmo assim esta norma define duas possibilidades de realizar os ensaios. No primeiro procedimento começa-se por determinar o chamado módulo de elasticidade local, o que corresponde ao módulo de elasticidade medindo a flecha apenas numa zona de momento flector puro, com base na flexão a quatro pontos. No mesmo provete, segue-se o procedimento desta mesma norma, na opção de determinação do módulo de elasticidade aparente, ou seja, um procedimento de flexão a três pontos.

A primeira das expressões para estes cálculos, para secções quadradas ou rectangulares, é a expressão (3.86) baseada em ensaios de flexão simples a três pontos.

$$G = \frac{1,2 \cdot h^2}{l_1^2 \cdot \left(\frac{1}{E_{m,app}} - \frac{1}{E_{m,l}} \right)} \quad (3.86)$$

G – módulo de corte [MPa]

l_1 – distância entre apoios na determinação do módulo de elasticidade aparente [mm]

h – altura da secção transversal do provete [mm]

$E_{m,app}$ – módulo de elasticidade aparente [MPa]

$E_{m,l}$ – módulo de elasticidade local [MPa]

As formas de cálculo do módulo de elasticidade aparente e do módulo de elasticidade local são apresentados na secção , relativa aos módulos de elasticidade.

Outra possibilidade permitida pela norma EN 408:2003 tem por base vários ensaios de flexão a três pontos, com diferentes distâncias entre apoios até um valor de 21 vezes a altura da secção rectangular ou quadrada. As distâncias entre apoios são incrementadas de valores aproximados de $\left(\frac{h}{l}\right)^2$ dentro de limites entre 0,0025 e 0,035.

O módulo de distorção é calculado pela expressão,

$$G = \frac{k_G}{K_1} \quad (3.87)$$

ou,

$$K_1 = \frac{\Delta \cdot \frac{1}{E_{m,app}}}{\Delta \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (3.88)$$

com,

K_1 – coeficiente angular da recta definida no gráfico da Figura (3.47)

$k_G = 1,2$ para secções quadradas ou rectangulares

Δ – valores dos incrementos correspondentes a cada parcela da expressão respectivamente

Em todos os ensaios de flexão devem ser utilizadas placas metálicas planas de comprimento ligeiramente superior à largura do provete e largura não superior a metade da altura da secção, tendo como função evitar a indentação na madeira dos pontos de aplicação das cargas e dos suportes. A velocidade de ensaio para a determinação do módulo de distorção não pode exceder a valor calculado pela expressão (3.88).

$$velocidade = 5 \cdot \frac{10^{-5} \cdot l^2}{6 \cdot h} [mm/s] \quad (3.89)$$

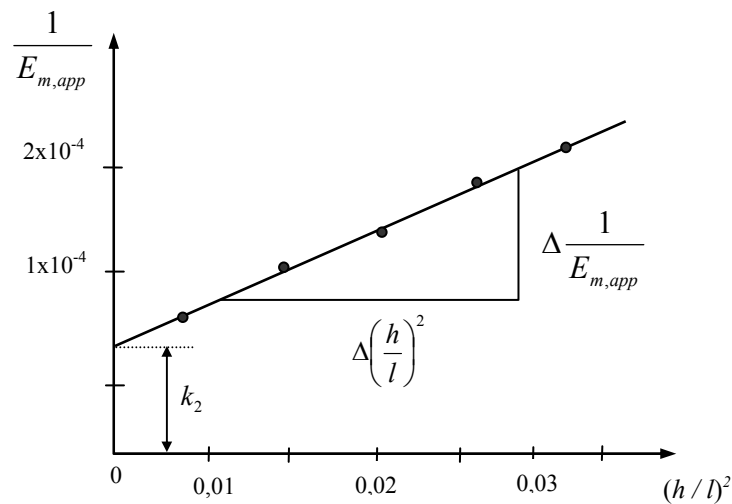


Figura 3.47 – Determinação do módulo de distorção pelo método do vão variável. (Adaptado de EN 408:2003).

A carga máxima a aplicar não pode exceder a carga no limite de proporcionalidade, nem provocar nenhum tipo de dano tal como esmagamento ou micro rupturas.

São referenciados na bibliografia diferentes métodos para determinação das propriedades ao corte, tensões de ruptura e constantes elásticas, sendo bem documentados, para além do tradicional ensaio do provete de bloco, os métodos de Iosipescu, de Arcan e “off-axis”, descritos mais adiante neste trabalho. Este facto deve-se à insatisfação de resultados obtidos por qualquer dos métodos tradicionais conhecidos, como os identificados nas principais normas sobre caracterização da madeira, nomeadamente a EN 408:2003, a algumas normas nacionais ASTM D 143:1994, ASTM D 198 (2002), BS, NP 623, etc. Estas normas eram satisfatórias para a avaliação da tensão de ruptura ao corte, mas dificilmente permitem uma avaliação das propriedades elásticas, nomeadamente o módulo de corte nos diferentes planos ortogonais.

3.15.4 Método Iosipescu

Alguns autores têm utilizado o método de Iosipescu para estudar as propriedades ao corte (Xavier *et al.* 2003), tendo sido realizados ensaios para determinação do módulo de corte em amostras de pinho bravo.

O método Iosipescu consiste em utilizar um provete com uma geometria particular, como seja, a partir de um paralelepípedo rectangular de pequena dimensão são cortadas centralmente duas incisões em V com o vértice apontado para o centro de geometria central, utilizando depois um dispositivo metálico que induz tensões de corte (quase puro) num plano bem determinado.

Este plano pode assim ser escolhido segundo os planos desejados para os estudos, como sejam, LT-longitudinal/tangencial, LR-Longitudinal/radial, ou mesmo TR-tangencial/radia, Figura 3.48. A zona de estreitamento central tem por finalidade concentrar as tensões de corte, diminuindo relativamente a influência de alguma flexão, tracção e compressão.

O método permite ainda a medição rigorosa das deformações, quer com aplicação de extensómetros colados (operação difícil, dispendiosa e demorada), ou através de medições de deslocamentos nos acessórios com transdutores de precisão, embora neste caso com alguma perda de precisão (influência dos esmagamentos nos pontos de carga).

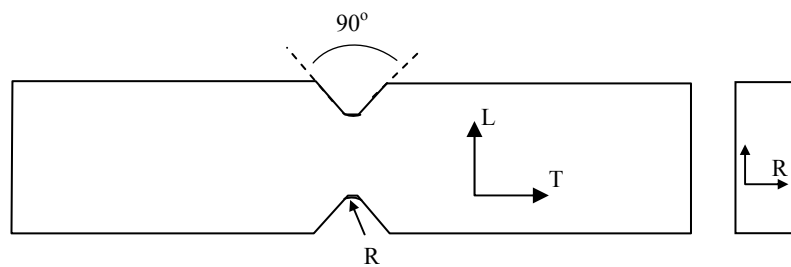


Figura 3.48 – Geometria do provete Iosipescu para ensaios de corte.

O dispositivo de ensaio tem por princípio básico um sistema de fixação imóvel de uma metade do provete e outra parte deslizante sobre uma guia com pouco atrito, que se desloca na direcção do corte, onde está firmemente fixada a outra metade do provete. Há dispositivos comerciais vendidos por fabricantes de equipamentos de ensaios, Figura 3.46, mas também há diversas referências bibliográficas sobre modificações ao dispositivo mais clássico.



(Fonte: www.instron.com/acc_images/2505-010_P.jpg)

Figura 3.49 - Acessório Iosipescu comercial.

Na realidade o que acontece no ensaio de Iosipescu pode ser representado pelo modelo da Figura 3.50. Aparentemente trata-se de uma aproximação muito boa ao estado de corte puro, como se pode ver pelo diagrama de esforços de corte representado na Figura 3.50-c, onde os esforços na zona central são muito superiores, quando comparados com os das zonas laterais. Mas no entanto os esforços laterais não são nulos.

O método Iosipescu foi inicialmente concebido para o estudo de propriedades de metais, mas foi utilizado e adaptado por diversos investigadores para o estudo de outros materiais, incluindo a madeira, como aparece nalguma bibliografia (Dumail J-F. *et al.* 2000) e (Yoshihara H. *et al.*, 2001).

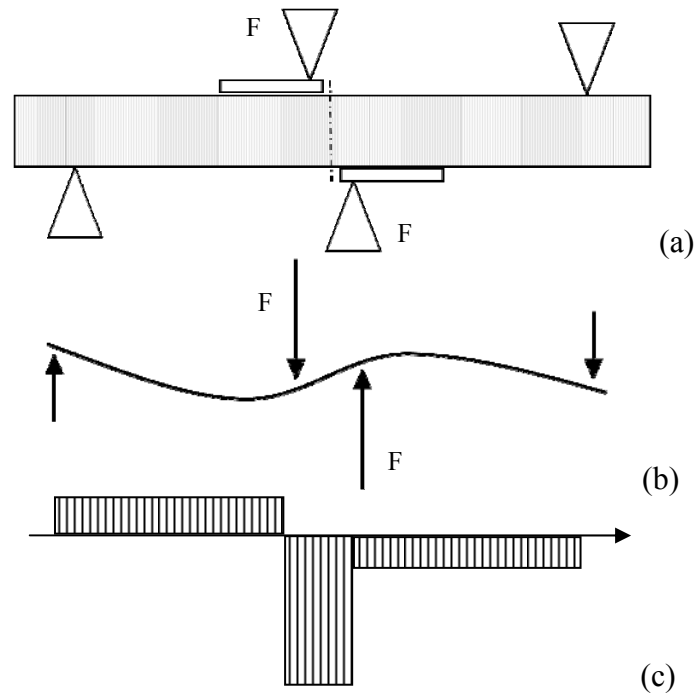


Figura 3.50 – Modelo das tensões e deformações no ensaio de corte pelo método Iosipescu. (a) – Esquema de aplicação de carga; (b) – Deformada; (c) – Esforços e corte transversal. (Modelo do autor).

Na Tabela 3.6 são mostrados os valores de constantes elásticas determinadas experimentalmente para a madeira de pinheiro bravo, entre estas propriedades os módulos de corte pelo método Iosipescu.

Tabela 3.6 – Valores das constantes elásticas do pinho bravo pelo método Iosipescu.

E_L	E_R	E_T	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{LR}	G_{RT}	G_{LT}	G_{LR}
(MPa)	(MPa)	(MPa)				(MPa)	(MPa)	(MPa)
15 100	1910	1010	0,586	0,051	0,471	280	1340	1480

Fonte: (Xavier, J., *et al.*, 2003).

Como já anteriormente referido, não é verdadeiro assumir que as tensões de corte são de corte puro, nem que são homogéneas em toda a superfície de corte, segundo uma análise por elementos finitos feita por Neumeister, *et al.* (2004), Figura 3.48.

Segundo a Figura 3.47, a tensão de corte média $\tau_{méd}$ é dada pelo valor de cociente entre a carga aplicada F e a área da secção ao corte. O módulo de corte médio é depois calculado admitindo a simplificação de que a tensão de corte é uniforme em toda a secção, o que na realidade não é verdadeiro (Xavier *et al.*, 2004) para materiais anisotrópicos e ainda pelo

princípio de Saint-Venant (proximidade entre o ponto de aplicação e a zona em corte). Esta explicação da não distribuição uniforme das tensões de corte é revelada na análise de cor da Figura 3.51 na zona do entalhe, e ainda é analisada nos modelos do autor, no último capítulo deste trabalho.

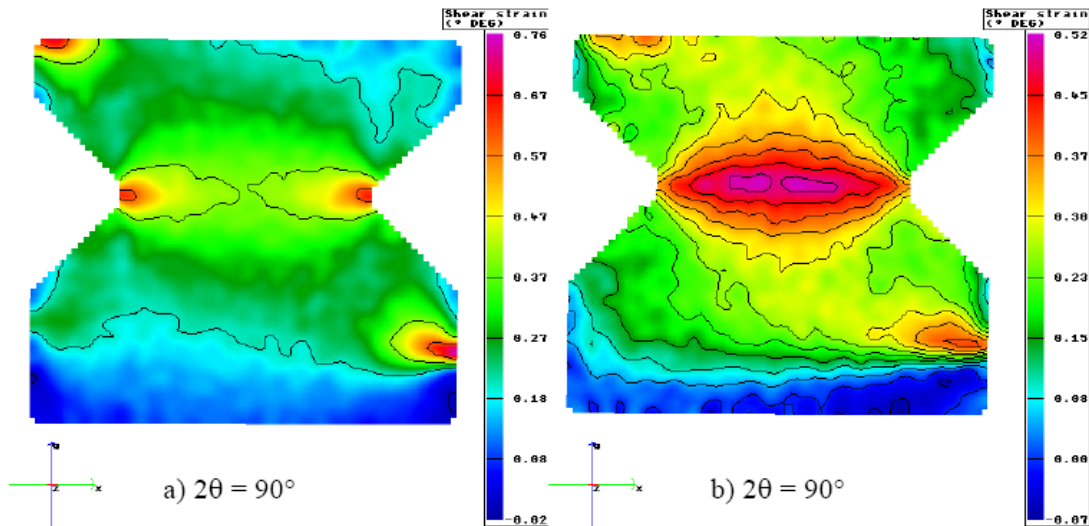


Figura 3.51 – Padrão da tensão de corte num ensaio pelo método de Iosipescu, analisado pelo método dos elementos finitos (Neumeister, et al., 2004).

Pelos motivos anteriormente apontados alguns investigadores realizaram estudos para avaliar as diferenças para o modelo ideal e quantificaram os desvios, tendo chegado a expressões matemáticas onde eram introduzidos factores de correcção, tanto dizendo respeito à não uniformidade das tensões como às deformações. Alguns autores definiram um factor de correcção C , que tem a ver com a não distribuição uniforme das tensões de corte, sendo a relação entre a tensão máxima a tensão média da secção, e um factor de correcção S , que tem a ver com as deformações unitárias, relação entre a extensão média no ponto central e o valor lido no extensómetro. Estes valores só podem ser calculados por elementos finitos. Apresentam-se na Tabela 3.7 valores propostos para o pinho bravo (Xavier, et al., 2004).

Tabela 3.7 – Factores de correcção encontrados para a lei de Hook aplicada ao corte paralelo, em pinho bravo.

Planos	C	S	$C*S$
LR	0,97	0,99	0,95
LT	0,92	0,99	0,91
RT	1,04	0,97	1,01

Fonte: (Xavier, J., et al., 2004).

O verdadeiro valor de módulo de corte de corte corrigido por estes factores, relativamente ao módulo de corte médio ou aparente, seria dado por,

$$G = C \cdot S G_{\text{méd}} \quad (3.90)$$

No entanto, também nos estudos de Xavier (2004), se concluiu que os factores de correcção eram de menor importância face aos resultados comparados com análise numérica, para a madeira estudada, pois o produto $C \cdot S$ é muito aproximado à unidade.

3.15.5 Método de Arcan

Neste método como em todos os outros, a questão não é procurar encontrar a solução para ter num plano bem determinado uma tensão de corte pura, mas sim encontrar uma possibilidade em que as tensões de compressão e tracção criadas indirectamente no plano de corte, sejam as menores possíveis e sempre que realizável quantificar a sua influência.

Enquanto que o dispositivo original de Arcan, Figura 3.52, era em alumínio e as peças a ensaiar eram coladas ao dispositivo, mais tarde surgiram estudos sobre o método de Arcan modificado em que os acessórios eram em aço inoxidável (Liu, J. Y., *et al.*, 1996).

Ainda segundo Liu *et al.* (1996) o método de Arcan só é aplicável para a avaliação do corte no plano paralelo às fibras.

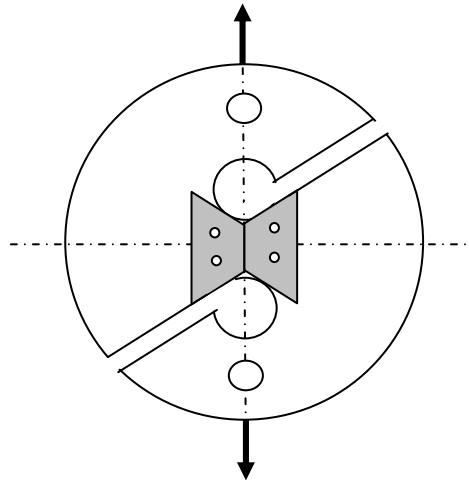


Figura 3.52 – Dispositivo de Arcan, para ensaio de corte e propriedades elásticas ao corte.

Este método de Arcan foi estudado por Oliveira (2004) especificamente aplicado à madeira de pinheiro bravo. Na Tabela 3.8 mostram-se os resultados comparativos do valor de módulo de corte obtido por diferentes métodos de ensaio.

Tabela 3.8 – Valores comparados de módulo de corte (G_{LR}) para a madeira de pinheiro bravo, calculados nos ensaios de Arcan, Iosipescu e “*off-axis*”, no plano de LR .

Módulo de corte G_{LR}	Arcan	Iosipescu	“ <i>off-axis</i> ”
Média (MPa)	1330	1410	1110
C.V. (%)	6,5	10,3	7,0

Fonte: (Oliveira, 2004).

3.15.6 Método “*off-axis*”

Embora este ensaio tenha sido concebido para determinação de propriedades ao corte de materiais compósitos, há estudos de aplicação do método a ensaios de madeira.

De todos os métodos que permitem a determinação das propriedades elásticas ao corte das madeiras, este afigura-se como o menos indicado, pelo facto de haver uma não desprezável contribuição da tracção transversal nas medições da deformação angular atribuível às tensões de corte, Figura 3.53.

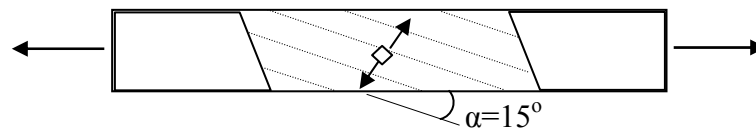


Figura 3.53 – Ensaio de corte “*off-axis*” para determinação do módulo de corte.

Garrido (2003) realizou estudos para determinação das propriedades elásticas do pinho bravo, utilizando o método “*off-axis*”, concluindo que é possível utilizá-lo, muito embora também afirme que não é adequado para a determinação da tensão máxima e que outros autores introduzem constantes experimentais de correcção dos valores obtidos dos ensaios.

Segundo estudos de Yoshihara *et al.* (2000) foram comparados os resultados da tensão de ruptura ao corte pelo ensaio “*off-axis*” e por ensaio de torção, para duas espécies de madeira e para diferentes ângulos de inclinação do fio. Embora seja dito que os valores se aproximavam para ângulos de 15° e 30°, é também chamada a atenção para o facto de se notar a influência das tensões de tracção perpendiculares à direcção do fio, acabando este autor por recomendar outros métodos, se se pretenderem resultados precisos das tensões de corte.

3.16 Módulo de elasticidade volumétrico

O módulo de elasticidade volumétrico representa a elasticidade de um corpo sólido quando sujeito a uma pressão hidrostática, ou seja, a relação entre a pressão exercida e a respectiva variação de volume unitário,

$$K_v = v_0 \frac{dp}{dv} \quad (3.91)$$

em que v_0 representa o volume inicial e dp e dv representam as variações de pressão e de volume correspondente, na zona de proporcionalidade elástica.

Para materiais isotrópicos esta propriedade relaciona-se com o módulo de elasticidade por uma equação já anteriormente referida (Tabela 3.2), que agora se apresenta na forma,

$$K_v = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.92)$$

As unidades do módulo de elasticidade volumétrico são as mesmas de uma tensão.

Para materiais ortotrópicos, em particular a madeira, as relações matemáticas anteriormente estabelecidas não se aplicam com rigor, pois além da estrutura orientada da madeira há ainda as interferências da compressibilidade do ar aprisionado no interior das células e do equilíbrio do teor em água e respectiva retracção da madeira, que sempre aparecem e são difíceis de controlar, por efeito da mínima alteração da pressão.

3.17 Comportamento viscoso da madeira sob tensão

Embora muitas vezes se assuma nos cálculos para aplicações práticas da madeira que a deformação de um componente é perfeitamente reversível e também que a deformação é constante após aplicação de uma carga permanente, sabe-se que em ensaios e medições rigorosas o comportamento elástico da madeira é bastante complexo. É uma evidência que a madeira sujeita a uma carga permanente tem uma deformação que não atinge imediatamente um ponto estável, e também que ao ser retirada a carga há uma recuperação que não é total de imediato, mas que se vai aproximando da condição inicial como uma função do tempo. Este comportamento é a indicação do carácter acentuadamente visco-elástico da madeira. O que foi dito anteriormente só é verdade para tensões muito abaixo dos valores limites de resistência.

A adopção de modelos simplificados é uma necessidade da engenharia, no sentido de separar em diferentes componentes, relacionados ou não do modelo de comportamento real, que é

muito complexo para alguns materiais, como é o caso concreto da madeira. Para compreender o comportamento mecânico da madeira exige-se a combinação de vários modelos simplificados.

Apresentam-se de seguida os modelos uni-axiais básicos estudados por vários autores, partindo-se do comportamento elástico linear ao qual se adicionam sucessivamente os conceitos de comportamento viscoso e de comportamento plástico.

O comportamento elástico linear unidireccional corresponde à expressão mais simples da Lei de Hook, equação (3.93), que tem uma representação no modelo da Figura 3.54.

$$\sigma_{xyz} = C_{xyz} \cdot \epsilon_{xyz} \quad (3.93)$$

em que σ_{xyz} e ϵ_{xyz} são as tensões e as deformações unitárias correspondentes para cada uma das direcções principais e em que C_{xyz} representa a constante de proporcionalidade para a correspondente direcção, que convencionalmente se representa pela letra E.

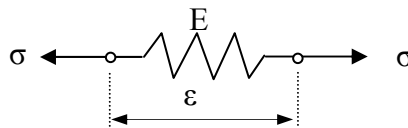


Figura 3.54 – Modelo do comportamento puramente elástico.

Por outro lado, podemos considerar a equação,

$$\sigma_{xyz} = \eta_{xyz} \dot{\epsilon}_{xyz} \quad (3.94)$$

em que, mantendo-se constante a tensão aplicada, há uma deformação em função do tempo, relacionados por uma constante η_{xyz} , que representa a viscosidade do material. O modelo físico é o tradicional amortecedor, Figura 3.55.

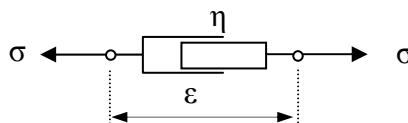


Figura 3.55 – Modelo do comportamento puramente viscoso.

Neste modelo fica claro que as tensões com que o material responde à solicitação exterior, dependem da velocidade de aplicação do estímulo exterior.

A combinação destes dois modelos responde em grande parte ao comportamento da madeira no que diz respeito ao fenómeno da deformação viscoelástica e da fluência e é designado por modelo de Kelvin-Voigt, Figura 3.56, nome dos dois investigadores que o estudaram. Este modelo é representado pelo par montado em paralelo de um amortecedor e de uma mola. As

tensões totais de resposta a um estímulo exterior são dadas pela soma das tensões componentes elástica da mola e viscosa do amortecedor.

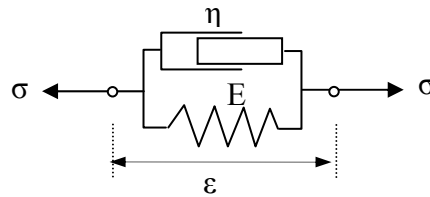


Figura 3.56 – Modelo de Kelvin-Voigt para o comportamento viscoelástico.

O modelo de Kelvin-Voigt com uma constante de amortecimento muito elevada é um bom modelo para representar a fluência, mas não dá uma resposta satisfatória para representar a relaxação de tensões.

Um outro modelo referido nos estudos sobre o comportamento viscoelástico dos materiais é o de Maxwell que corresponde à ligação em série de de uma mola e de um amortecedor, Figura 3.57.

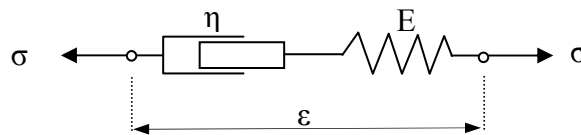


Figura 3.57 – Modelo de Maxwell para o comportamento viscoelástico.

Este modelo responde bem ao fenómeno da relaxação de tensões, mas não satisfaz para explicar a fluência.

Para representar a madeira o modelo SLS (Standard linear solid), Figura 3.58, apresenta-se como satisfatório, sem entrar em demasiadas complexidades, difíceis de representar gráfica e matematicamente, pois não apresenta as debilidades quer do modelo de Kelvin-Voigt quer do de Maxwell.

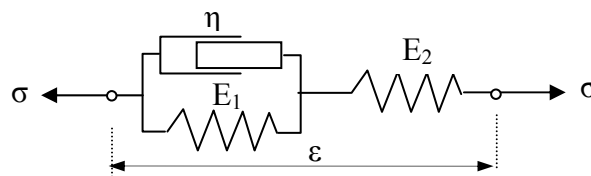


Figura 3.58 – Modelo SLS para o comportamento viscoelástico e viscoplástico da madeira.

O modelo de Kelvin-Voigt tem representação matemática através da expressão (3.95), em que as deformações são dependentes do tempo pela influência da viscosidade η .

$$\sigma(t) = E \cdot \epsilon(t) + \eta \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (3.95)$$

Segundo Meyers, *et al.* (1999), esta equação permite deduzir que para um material com comportamento Kelvin-Voigt, uma aplicação de carga num período muito reduzido, o material apresenta um comportamento puramente elástico, mas também o módulo de elasticidade tem um valor diferente a que se deve chamar módulo de elasticidade dinâmico, que obrigatoriamente tem de ser mais elevado do que o módulo de elasticidade estático.

Em conclusão pode afirmar-se que a madeira, tal como outros materiais em que o comportamento viscoso é bem marcado, apresentam também em consequência, os fenómenos de histerese na deformação e recuperação da deformação, relaxação de tensões, fluência e ainda resposta variável à velocidade de imposição de deformação. Uma característica importante da madeira é que todo o fenómeno viscoelástico é pouco dependente da temperatura, mas muito dependente do teor em água, por sua vez particularmente sensível às variações de humidade ambiente.

Tendo em conta uma análise global de todos os modelos para representar o comportamento da madeira em todas as suas particularidades ao fenómeno da fluência e relaxação, o modelo mais completo é o de Burger, Figuras 3.59 e 3.60, pois permite abarcar todas as situações de movimento tal como acontece no comportamento real da madeira, como representado em detalhe por vários autores (Bodig, 1982) e (Lee, 2004). Nesta figura encontram-se representadas as diferentes condições do modelo de fluência de Burger face ao comportamento real da madeira.

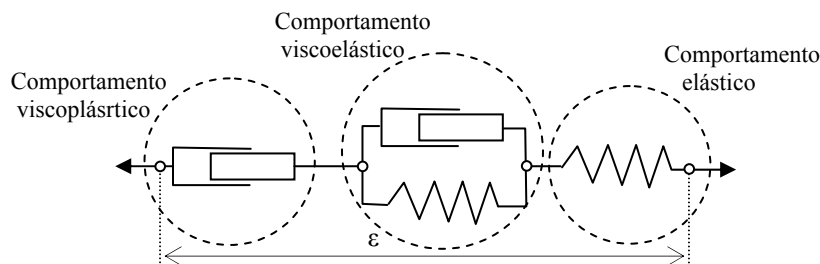


Figura 3.59 – Modelo de Burger para o comportamento da madeira tendo em conta todas as componentes da fluência.

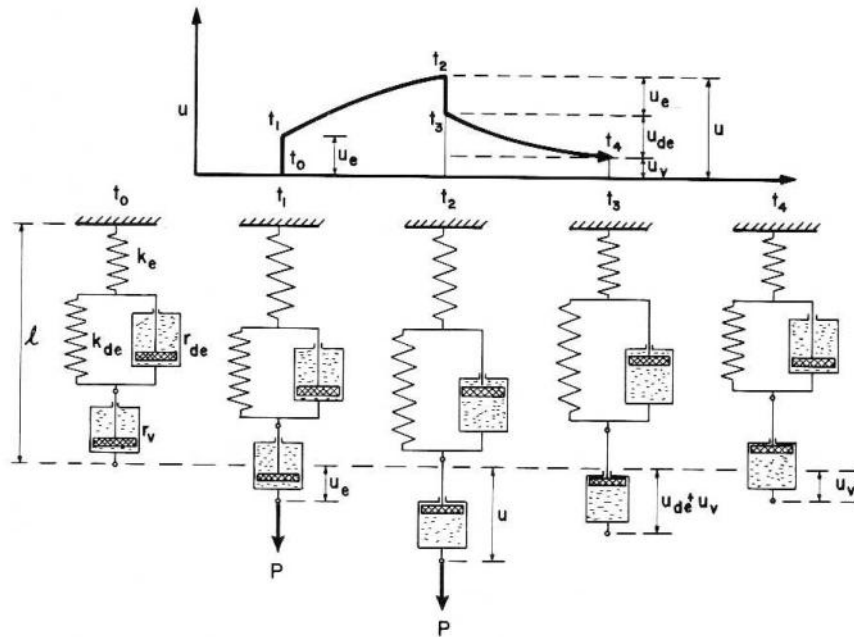


Figura 3.60 – Modelo de Burger para o comportamento da madeira tendo em conta todas as componentes da fluência. (Lee, et al. 2004).

Estudos recentes (Vidal-Sallé, 2007) tentaram definir modelos do comportamento mecânico e fluência da madeira, mas devido à extrema complexidade do tema, variabilidade da madeira e complexidade estrutural fortemente anisotrópica, reconheceram no seu modelo não permite ainda incluir a deformações viscosas não recuperáveis. O modelo de Vidal-Sallé, *et al.*, foi desenvolvido para aplicações em elementos finitos, correndo no código ABAQUS/Standard® através da subrotina UMAT.

Enquanto a maior parte dos estudos incidem na procura da previsão da deformação e modelos de comportamento para a fase de carregamento, (Zihui Xia, *et al.*, 2006) realizaram estudos incluindo a previsão do comportamento na libertação do carregamento. Embora este estudo tenha sido realizado para materiais industriais, compósitos de fibra com cola epoxídica, uma das conclusões interessantes é que, a previsão de deformação após alívio de carga, é muito mais difícil e os resultados mais dispersos, do que na aplicação de cargas, especialmente para níveis elevados de tensão aplicada.

3.18 Fluência e relaxação de tensões

A fluência é por definição o nome que se dá ao fenómeno da deformação dependente do tempo, numa situação em que a intensidade de uma carga aplicada se mantém constante no tempo.

O modelo matemático da fluência é dado pela equação (Lee, 2004),

$$\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_e(t) + \epsilon_{ve}(t) + \epsilon_{vp}(t) = \frac{\sigma}{K_e} + \left(\frac{\sigma}{K_k}\right) \left(1 - e^{(-k_k)/n_k}\right) + \frac{\sigma t}{\eta_v} \quad (3.96)$$

em que $\epsilon(t)$ é a deformação unitária total, $\epsilon_e(t)$ é a deformação elástica unitária, $\epsilon_{ve}(t)$ é a deformação viscoelástica unitária, $\epsilon_{vp}(t)$ é a deformação viscopástica unitária, σ é a tensão aplicada, K_e é a constante elástica da mola de Hooke, K_k é a constante de amortecimento do corpo de Kelvin, η_k é a constante viscosa elástica do corpo de Kelvin e η_v é a constante viscosa de deformação permanente.

A fluência visco-elástica é a deformação não instantânea mas recuperável, que ocorre para valores de tensão abaixo do limite de proporcionalidade, e apenas é possível de quantificar sob condições constantes do teor de água da madeira e de temperatura. A este tipo de fluência corresponde um aumento gradual da deformação no tempo, tendendo para um valor constante, mas que, depois de superada a carga, recupera também gradualmente até completa anulação.

Por exemplo, para os ensaios de flexão, se a carga fosse mantida constante ao longo do tempo, registar-se-ia um aumento lento da deformação, que tanto poderia tender para um valor constante, como aumentar progressivamente até à rotura, dependendo da intensidade da tensão imposta ao material. A esta característica do comportamento mecânico dá-se o nome de fluência.

Reconhece-se, assim, que a deformação por fluência tende para um valor constante, o que acontece para tensões não muito elevadas, ou para uma progressão lenta numa primeira fase e aumento numa fase final até ruptura, tal como representado na Figura 3.58, para diferentes níveis de carga F_1 (elevada), F_2 (média) e F_3 (pequena), a que correspondem respectivamente situações de instável, crescimento lento e estável.

Numa curva de deformação do tipo F_1 , o primeiro segmento com a concavidade voltada para baixo, representa a fluência primária (primeira derivada negativa), o segundo segmento aproximadamente recto, representa a fluência secundária, e o terceiro segmento com a concavidade voltada para cima (primeira derivada positiva), representa a fluência terciária, em que a fluência aumenta de forma crescente até à ruptura.

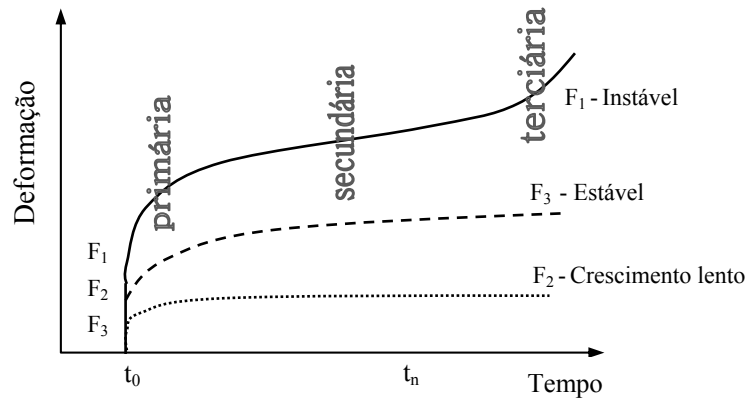


Figura 3.61 - Exemplo das curvas de deformação por fluência, para diferentes níveis de tensão. (Adaptado de Bodig, 1982).

Na Figura 3.61 representa-se uma curva de deformação por fluência, do tipo da da Figura 3.60 e Figura 3.62, mas decomposta nos seus vários componentes, cada um dos quais será analisado com mais detalhe em secções seguintes.

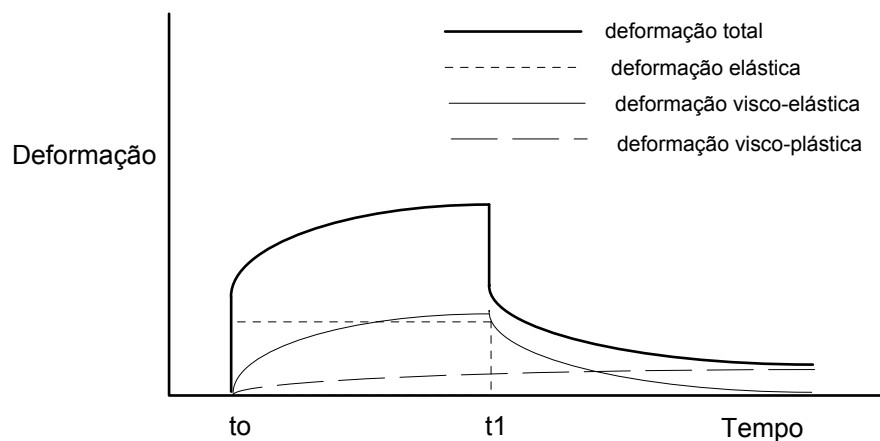


Figura 3.62 - Decomposição da curva de deformação em suas componentes. (Adaptado de Bodig, 1982).

A importância do conhecimento das propriedades de fluência manifestadas por diferentes tipos de madeiras, resulta de se ter verificado que acções de longa duração provocam a rotura de elementos de madeira para níveis de tensão abaixo daqueles alcançados em ensaios de curta duração. Em termos simples isto significa que, dependendo do nível de tensões aplicadas, uma acção que pode ser suportada sem problema durante um curto intervalo de tempo, poderá levar à rotura do elemento estrutural se aplicada durante um longo período de tempo. Saliente-se que é corrente verificarem-se deformações devidas à fluência da mesma ordem de grandeza das deformações instantâneas iniciais, sem que isso corresponda a uma redução significativa da resistência mecânica.

Quanto aos factores que intervêm neste fenómeno, e para além do nível de tensões mencionado, salienta-se o teor de água da madeira como um dos parâmetros a atender quando da estimativa do coeficiente de fluência. Assim foi observado, por exemplo, que a madeira quando aplicada verde e deixada a secar em obra, apresentava uma deformação quatro a seis vezes superior à deformação inicial (Forest Prod. Laboratory, 1987).

O coeficiente de fluência tende a ser maior se o teor de água da madeira for elevado ou variar ciclicamente, do que se for constante e baixo durante o período de actuação da força.

Face a resultados obtidos experimentalmente, tem-se dividido o fenómeno de fluência na madeira e seus derivados em duas categorias principais distintas: fluência visco-elásto-plástica e fluência mecânico-sortiva.

3.18.1 Comportamento visco-plástico

Em ensaios de fluência sob cargas elevadas, regista-se que, mesmo após suspensa a carga e recuperada a fluência visco-elástica, a amostra não volta à forma inicial. Este efeito de deformação permanente pode acentuar-se ao longo do tempo, e tem a designação de fluência visco-plástica. O valor desta deformação permanente é esquematizado na Figura 3.59 a traço interrompido longo, fazendo parte de um dos componentes da deformação de fluência total. Excluindo os instantes próximos da aplicação ou retirada de cargas, a fluência total depende quase exclusivamente dos movimentos lentos internos do material, ou seja, da fluência visco-plástica.

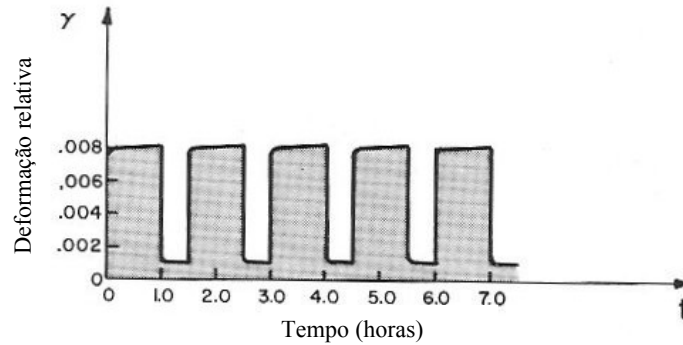
3.18.2 Comportamento mecânico-sortivo

A fluência mecânico-sortiva é a deformação que ocorre quando a madeira, sob a acção de uma força de valor constante, sofre alteração de teor de água e/ou de temperatura, o que acontece quando sujeita a variação das condições ambientais.

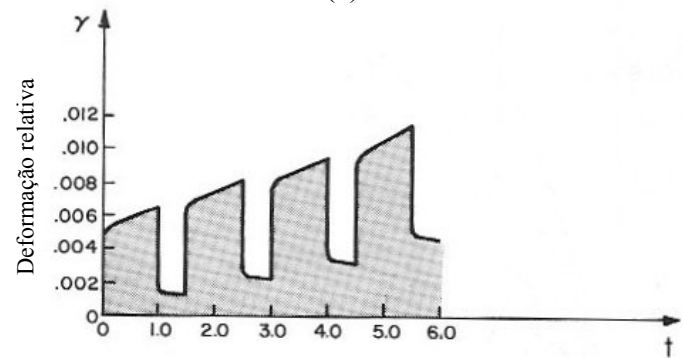
Na Figura 3.63 (Bodig, 1982) mostra-se que o tipo de deformação por fluência nas madeiras, não depende apenas da intensidade da tensão constante aplicada como sugerido na Figura 3.61, mas também do teor em água. A Figura 3.63 (a) refere-se a uma condição cíclica de compressão de faia com 68,6 MPa, com a madeira completamente seca, enquanto na Figura 3.63 (b) o ciclo de carga e descarga foi com uma tensão inferior, 49 MPa, mas com a madeira a 12 % de teor em água. Registou-se então que com a madeira completamente seca a fluência nos

patamares de carga se assemelham à classificação de fluência secundária, enquanto que com a madeira a uma humidade normal, os patamares de carga se assemelham a uma fluência terciária.

Como regra pode afirmar-se que para o mesmo padrão de carga a fluência é tanto maior quanto mais elevado for o teor em água.



(a)



(b)

Figura 3.63 – Aplicação cíclica de carga e fluência, para duas situações de teor em água na madeira de faia em compressão transversal: (a) teor em água a 0%; (b) Teor em água a 12 %. (Bodig, 1982).

No exemplo anterior analisou-se a diferença de comportamento à fluência para dois níveis diferentes mas estáveis de teor em água, mas está provado por inúmeros estudos que as variações cíclicas da humidade têm efeitos ainda mais acentuados no comportamento à fluência da madeira, com uma característica semelhante ao que é mostrado na Figura 3.64, embora neste caso não se trata de madeira natural. A fluência tem tendência para estabilizar nos períodos secos e para aumentar fortemente nos períodos de humidade elevada.

Para estudar a influência das variações ambientais no comportamento mecânico das fibras celulósicas, Olsson e outros (2006) estudaram o fenómeno da fluência mecano-sortiva em fibras de papel, tendo demonstrado que as fibras sujeitas a uma tensão de tracção constante sob um ambiente com variações cíclicas de humidade entre 30 % e 80 % apresentaram uma deformação por fluência muito superior ao que apresentou o mesmo material sujeito a uma condição

constante de elevada humidade. Num ensaio de apenas 16 horas Olsson *et al.* (2006) conseguiram provar o efeito do aumento irreversível do maior aumento da extensão durante os períodos de humidade elevada, após um período mais ou menos estável de humidade baixa, Figura 3.64.

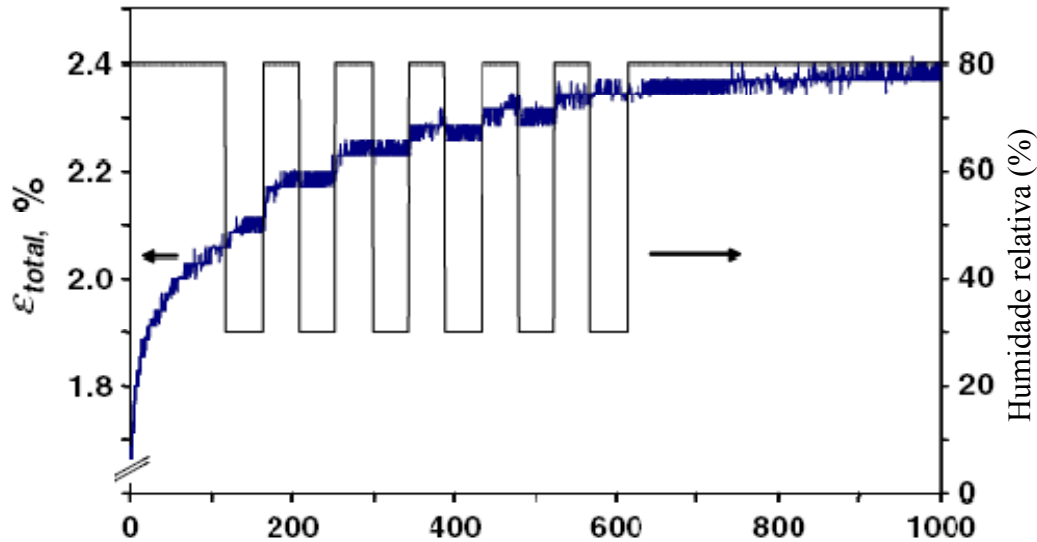


Figura 3.64 – Deformação mecânico-sortiva num provete de fibras de papel sob uma tensão constante de 450 MPa, com introdução a partir do tempo 120 minutos, de períodos de 45 minutos de variação cíclica de humidade. (Olsson et al., 2006).

3.18.3 Interpretação do fenómeno da fluência

Os fenómenos de fluência da madeira, suas causas e consequências têm vindo a ser explicados, tal como para outros materiais, através do recurso a dois tipos de aproximação, um do tipo fenomenológico e outro do tipo composição estrutural. A primeira compreende todos os modelos nos quais não se estabelece uma relação entre o comportamento observado e a estrutura interna do corpo. Se, pelo contrário, a legitimidade das leis estabelecidas se basear na estrutura interna do material em estudo, trata-se de uma aproximação do tipo composição estrutural.

Os estudos até à data efectuados têm sido geralmente do ponto de vista fenomenológico, devido à grande complexidade estrutural da madeira, a qual dificulta as aproximações do tipo composição estrutural. Os modelos propostos até à data têm tentado explicar a existência de uma deformação elástica instantânea, uma deformação elástica retardada ou viscosa e uma deformação sem recuperação.

A aproximação fenomenológica compreende o ajustamento de modelos puramente matemáticos aos dados observados, particularmente através do uso de funções do tipo da

apresentada na equação (3.97), a qual tem sido muito utilizada para estimar o comportamento de provetes pequenos, sem defeitos, e sob o efeito de acções permanentes.

$$d_t = d_o + t(a.m) \quad (3.97)$$

em que,

d_t – deformação total

d_o – deformação inicial devida à aplicação da força

t – tempo de actuação da força

a, m – constantes relativas ao teor em água e à velocidade de carregamento

Igualmente a aproximação do tipo fenomenológico engloba os ditos modelos reológicos, pelo que, para o caso da madeira, devido ao conceito de recuperação total e de limite de deformação, os modelos propostos são do tipo representado na Figura 3.65 (Hunt, 1991). Nesta figura realçam-se dois aspectos importantes relacionados com a fluência, o primeiro é o efeito da velocidade de aplicação da carga na relação força-deformação, sendo o segundo o efeito da repetição cíclica de forças. Estes dois efeitos acontecem mesmo em situação de curta duração, quer na velocidade relativamente rápida de aplicação da carga (a), quer em intervalos curtos de repetição da carga (b). Nos dois casos não houve tempo para reposição das tensões e no segundo evidencia-se o que se define por histerese.

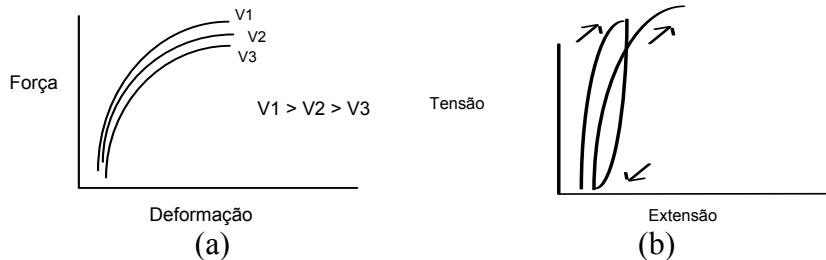


Figura 3.65 - Modelo reológico geral para materiais que sofrem fluência (exceptuando casos onde não existe limite de fluência. (Hunt, 1991).

Outros autores (Johns e Madsen, 1982) apresentam modelos baseados em mecânica da fractura, onde é assumido que a degradação mecânica da madeira, causada por uma acção de longa duração, tem lugar em três fases. A primeira fase é caracterizada pela formação de fendas sem que no entanto estas, pelas suas dimensões, afectem a resistência da peça de madeira. Durante a segunda fase, as fendas aumentam de dimensão, perdendo gradualmente o elemento estrutural resistência mecânica. Caso a acção tenha uma duração suficientemente longa, as fendas atingem uma dimensão crítica e neste ponto as tensões aplicadas igualam a tensão de rotura, que se dá de um modo rápido, característica que define a terceira fase.

No que se refere à aproximação do tipo composição estrutural, diversos modelos têm sido propostos, sendo a base de muitos deles a rotura de ligações entre moléculas de água e um dos constituintes da parede celular (geralmente a celulose), quando um elemento de madeira é sujeito a esforços, ocorrerá então um "escorregamento" de um polímero relativamente ao outro.

Outra característica de muitos dos modelos do tipo composição estrutural, tem a ver com o arranjo das microfibrilas de celulose. De um modo geral, os modelos realçam o facto de as microfibrilas serem significativamente mais resistentes que o material constituinte da matriz (hemicelulose e lenhina), resultando desse facto que, quando uma força é aplicada à parede celular de uma fibra, as microfibrilas suportarão a maior parte dos esforços transmitidos. Após a supressão da força, iniciar-se-á uma recuperação associada do conjunto microfibrila-matriz, com duas componentes: resiliência da zona cristalina das microfibrilas e a energia de deformação elástica armazenada, conseqüente da deformação provocada.

A libertação das tensões armazenadas nas microfibrilas, levará, por seu lado, à libertação da energia armazenada na matriz. O facto da recuperação não ser total resultando numa deformação permanente, explica-se por existirem forças de atrito associadas aos movimentos, quer iniciais (compressão), quer finais (recuperação), as quais causam a dissipação de parte dessa energia sob a forma de calor.

A hipótese de que quaisquer alterações microestruturais da madeira, devidas à fluência, seriam originadas por perturbações ao nível das regiões amorfas das microfibrilas elementares, tem sido aventada por diversos autores (Murphey, 1963; Schniewind, 1968).

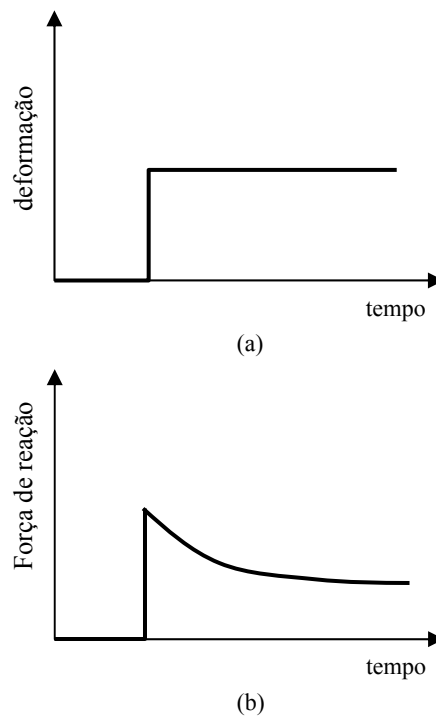
Outras interpretações do tipo composição estrutural do fenómeno da fluência mecânico-sortiva, são baseadas na influência da variação da temperatura e da humidade relativa do ar nos ambientes confinantes da peça de madeira, provocarem fenómenos de retracção ou de intumescimento diferenciados nas diversas lamelas da parede celular.

Finalmente, a explicação para a incidência do teor de água e da temperatura da madeira no seu coeficiente de fluência, assenta na circunstância do acréscimo do teor de água, até ao ponto de saturação das fibras, e do simultâneo aumento da temperatura, provocarem a plastificação da parede celular, com reflexos negativos na viscosidade da matriz, donde a conjugação de factores que ocasionam a elevação do coeficiente de fluência do material.

3.18.4 Relaxação de tensões

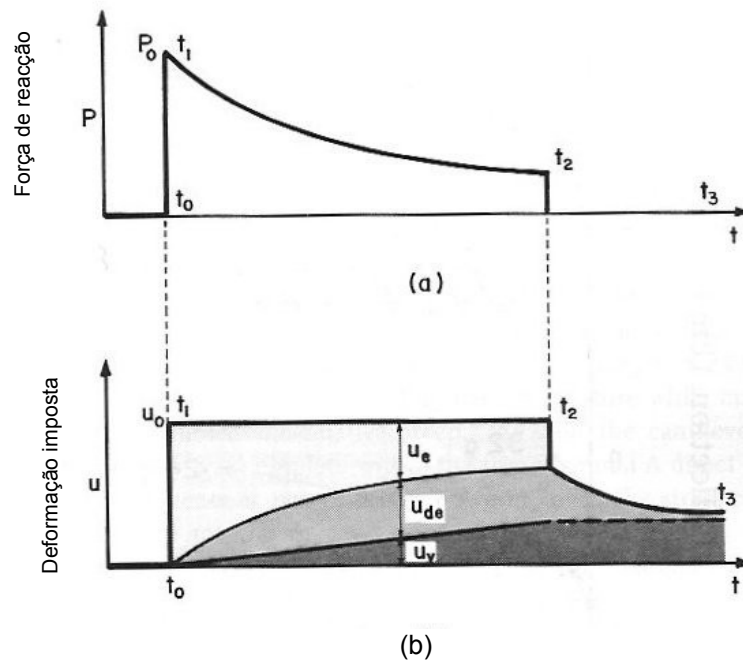
Quando se provoca a uma peça de madeira uma deformação mantida constante no tempo, as tensões internas que se opõem à acção exterior vão diminuindo gradualmente. Este

comportamento dos materiais tem o nome de relaxação de tensões, cuja representação esquemática correspondente é da Figura 3.66.



*Figura 3.66 - Curva de relaxação de tensões:
 (a) deformação imposta e mantida constante; (b) força de reacção exercida pelo material em função do tempo.
 (Adaptado de vários autores).*

A relaxação é explicada por mecanismos internos do material muito semelhantes aos da fluência. Durante o tempo em que é mantida constante a deformação total, há trocas da contribuição relativa por parte de deformação puramente elástica, visco-elástica e visco-plástica, tal como se representa na Figura 3.67. Nesta representação, para melhor análise, a deformação imposta cessa ao fim do tempo t_2 . A diminuição da força de reacção deve-se assim ao facto da deformação elástica u_e ir diminuindo, sendo substituída pelas componentes visco-elástica u_{de} e visco-plástica u_v que não opõem força de reacção.



(b)
 Figura 3.67 - Perda de carga por relaxação e componentes da deformação. (a) Diminuição da resposta em força de reacção; (b) Componentes da deformação. (Bodig, 1982).

Terminada a imposição exterior de deformação no ponto t_2 , fica o corpo livre sem oferecer mais força de reacção, mas, por outro lado, a deformação não recupera totalmente, ficando com o valor residual de u_v correspondente ao instante de tempo t_3 de recuperação total da deformação visco-elástica.

Como se viu anteriormente, tanto na fluência como na relaxação há um componente da deformação e/ou recuperação, que aparece como que um comportamento elástico amortecido no tempo (com um certo atraso em relação ao tempo real). É, mais uma vez, o comportamento visco-elástico, que tanto se manifesta durante a aplicação de uma carga como quando da sua suspensão.

Um exemplo prático importante da manifestação deste fenómeno aparece na fabricação de uma placa de aglomerado de fibras ou partículas. Os pratos da prensa funcionam segundo o princípio da imposição de uma deformação constante, pois têm travamentos em espessuras bem determinadas. Ao sair da prensa a espessura da placa recupera instantaneamente um certo valor, mas vai continuando a recuperar durante mais algum tempo até estabilizar na espessura final.

3.18.5 Modelos matemáticos da fluência

A fluência é um dos principais condicionalismos do cálculo estrutural em madeira. A madeira apresenta um acentuado, mas lento movimento, quando submetida a cargas permanentes, mesmo que estas se situem no domínio elástico do material. Este movimento é devido ao comportamento visco-elástico da madeira (sendo uma parte recuperável, caso seja retirada a carga permanente). Porém, como o processo é continuado a fragilização do componente acaba por arrastar o material para um comportamento visco-plástico, regido por leis derivadas do regime plástico, podendo levá-lo ao colapso. Além do inconveniente estético de um componente deformado por fluência, este efeito pode induzir solicitações descompensadas em elementos da estrutura, muito antes da aproximação às cargas de cedência encontradas experimentalmente em ensaios de curta duração, também designados por ensaios estáticos. Por este motivo se têm introduzido no cálculo estrutural factores de correcção para cargas permanentes, como é o caso do coeficiente K_{mod} já referido no Eurocódigo 5 de 1987 e posteriormente passado para norma Europeia, “EN 1995-1-1:2004 - *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1.1: General – Common rules and rules for buildings*”.

Para estudo do modelo de comportamento à fluência de elementos estruturais de madeira foram concebidos no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade do Minho, equipamentos para ensaios de fluência à flexão de componentes em madeira maciça e lamelada colada. Os equipamentos permitem o ensaio simultâneo de longa duração de vários provetes, e tem a possibilidade de regulação de diferentes parâmetros, tais como: carga, dimensões dos provetes e pontos de aplicação de carga. Os dados são adquiridos de forma automática por intermédio de um equipamento e software apropriados, em períodos de tempo pré-definidos, através de sensores de deslocamento, ao mesmo tempo que é feita a monitorização das condições ambientais.

Nos ensaios realizados em madeira de pinheiro avaliou-se o movimento devido à fluência, resultante de uma determinada intensidade de carga. Fez-se a caracterização do comportamento à fluência em função das características da madeira, como a direcção das camadas de crescimento, presença de lenho juvenil, etc. Foram também ensaiados elementos colados com uma cola estrutural. Os equipamentos e resultados experimentais são apresentados nos capítulos seguintes deste trabalho.

Análise teórica dos fenómenos de fluência e relaxação

É conhecido que a madeira suporta acções mecânicas de curta duração bastante superiores às que determinam a sua rotura se a carga permanecer com um valor constante por um período longo de tempo. Por este motivo o dimensionamento segundo os estados limites requer a afectação de um coeficiente ao valor característico de resistência mecânica da madeira, para o tipo de esforço em causa e a duração das acções. Este factor de correcção é designado no Eurocódigo por (K_{mod}), e tem por finalidade assegurar a não ocorrência de cedência prematura da estrutura. O coeficiente tem em conta a classe de duração das acções e o efeito do teor de água da madeira na sua resistência. A submissão a cargas permanentes durante períodos de tempo elevados, provoca nalguns materiais um aumento gradual de deformação, fenómeno a que se dá o nome de fluência, já analisada anteriormente. Se as tensões permanentes forem elevadas, mesmo que abaixo da tensão de cedência, em materiais susceptíveis à fluência, podem atingir-se os limites de resistência e correspondente colapso do componente.

Na Tabela 3.9 (Bodig, 1982) apresentam-se algumas das equações aplicáveis à modelação do comportamento à fluência, referente a deformações em esforços de compressão ou tracção. A presença de inúmeras constantes, revela tratarem-se de modelos empíricos. No caso dos componentes estruturais em madeira, o efeito mais visível e de maior risco é o resultante do esforço de flexão.

Tabela 3.9 - Equações empíricas mais comuns para representar a fluência.

Designação	Tipo de fluência	Equação	Constantes
Parabólica	primária	$l=l_0+at^m$	a, m
Lei de 1/3 (Andrade)	primária	$l=l_0(1+at^{1/3}).e^{mt}$	a, m, l_0
Logarítmica	primária	$l=a+b \log t$	a, b
Seno hiperbólico	primária e secundária	$l=a+b \sinh ct^m$	$a, b, c, m=1/3$ normalmente
de Lacombe	primária, secund. e parte / terciária	$l=l_0+at^m + bt^n$	a, b, m, n
Polinomial	primária e secundária	$l=a+bt^{1/n}+ct^{2/n}+dt^{3/n}$	a, b, c, d, n

l_0 - extensão unitária instantânea

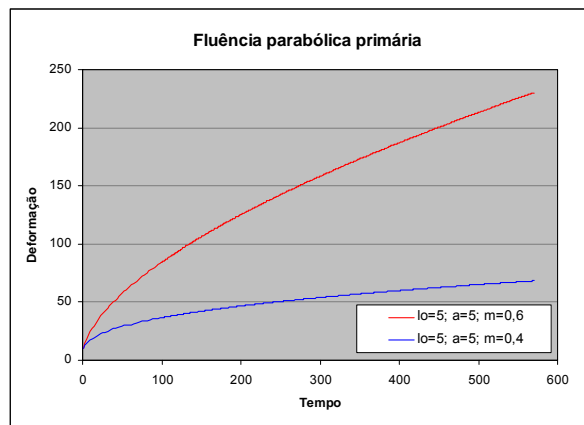
t - tempo; l - extensão

(Fonte: Bodig, 1982).

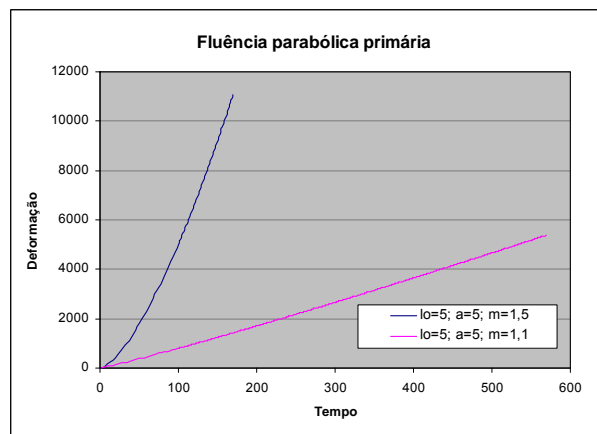
Vários autores chamam a atenção para a forte componente mecanico-sortiva, na deformação por fluência da madeira, simultaneamente com o efeito de cargas de longa duração. Quer isto dizer que a influência da humidade, ou mais concretamente, das variações cíclicas da humidade e/ou temperatura, têm um efeito acelerador exponencial para a deformação por

fluência, uma vez que impõem cargas adicionais devidas às retracções e aos inchamentos, além da interferência nas próprias propriedades mecânicas da madeira.

Nos modelos matemáticos empíricos da Tabela 3.9 as constantes são determinadas por ajustamento a ensaios experimentais. Para se avaliar a influência dos valores das constantes na configuração das curvas de fluência o autor desta tese fez duas simulações, mostradas na Figura 3.68 (a) e (b), para a expressão do modelo parabólico. Como se mostra a simples alteração das constantes altera grandemente o formato e andamento das curvas, o que permite adaptá-las ao comportamento real depois de ajustamentos resultantes de ensaios experimentais.



(a)



(b)

Figura 3.68 – Exemplos das representações gráficas de um dos modelos teóricos da fluência, com diferentes valores atribuídos às constantes a e m . (Figuras do autor).

3.19 Concentração de tensões

Sempre que há uma diminuição local de secção numa área em que se transmite uma tensão de tracção regista-se um aumento da tensão. Este efeito é ampliado quando a variação de secção é

brusca, por exemplo num estreitamento com uma concordância com raio pequeno em relação à largura ou na presença de um furo de pequeno raio relativamente à largura. Na mecânica dos sólidos este aumento local da tensão é estudado como o efeito da concentração de tensões e obedece a leis bem estudadas. No caso da madeira o efeito da concentração de tensões pode provir da presença de pequenas fendas, de nós, ou ainda de furos por onde passam acessórios de ligação mecânica entre peças, Figura 3.68.

Define-se como factor de concentração de tensões (k) a relação,

$$k = \frac{\sigma_{\max.}}{\sigma_{\text{méd.}}} \quad (3.98)$$

em que $\sigma_{\max.}$ corresponde ao pico de tensão mais elevado, provocado pela concentração de tensão e $\sigma_{\text{méd.}}$ corresponde à tensão calculada com a carga total a transmitir e a área resistente na zona mais estreita. O efeito da concentração faz-se sentir tanto mais no valor do factor k quanto maior for a redução de secção e quanto mais rápida for essa transição.

Na figura 3.69 mostra-se as distribuições de tensões na zona de influência da variação de secção e uma tabela com os valores do factor de correcção, para materiais isotrópicos.

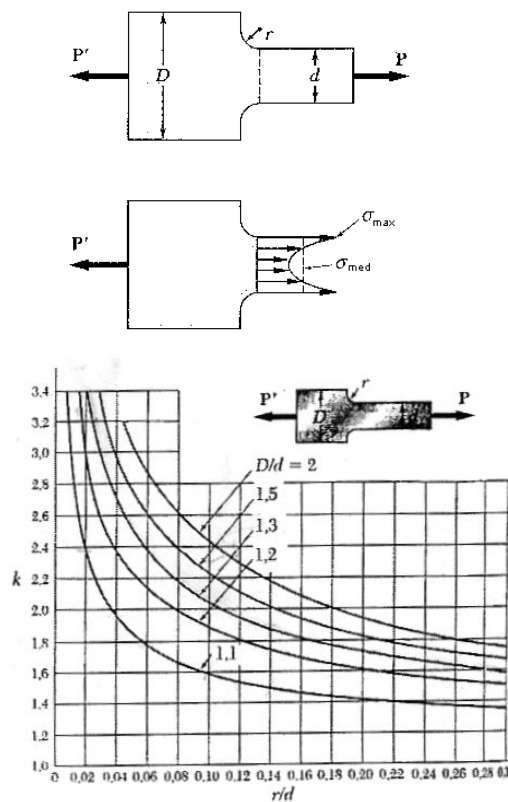


Figura 3.69 – Correcções para os raios de curvatura da zona de concentração de tensões. (Beer, 1992).

O efeito da concentração de tensões por efeito da presença de nós da madeira carece de uma análise muito atenta, por motivo de haver uma enorme diferença entre um simples furo numa peça de madeira de fibras paralelas e de um nó ou pelo furo deixada pela saída de um nó, pela forma como se comportam as fibras da madeira neste último caso, Figura 3.70. Na madeira as fibras ao redor e um nó continuam a manter a sua continuidade, mas aproximam-se entre si de modo a contornar o nó, com um aspecto semelhante ao que acontece nas linhas de fluxo de um fluido em movimento ao redor de um obstáculo. No caso de um furo, a descontinuidade das fibras faz acentuar ainda mais o factor de concentração de tensões.

O facto anteriormente referido, da diferença entre um furo efectuado artificialmente na madeira e num furo deixado por libertação de um nó, reflecte-se de forma muito diferente na tracção paralela às fibras e na compressão paralela às fibras. Este assunto será tratado no capítulo de desenvolvimento experimental

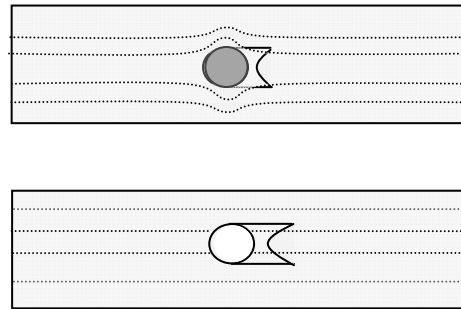


Figura 3.70 – Concentração de tensões atribuídas a um defeito natural da madeira – um pequeno nó e num furo artificial.

Uma quantificação da perda de rigidez provocada por furos ou presença de nós ou fendas numa viga à flexão foi estudada por Soltis (1999). Este autor considera que uma primeira aproximação ao cálculo de um componente estrutural, com furos ou nós na zona resistente, pode ser feito tendo em consideração apenas a redução de secção no local do efeito perturbador, mas, na realidade, o efeito negativo das perturbações à regularidade da secção, é muito superior ao que seria previsto apenas por este critério simples de diminuição de secção. Efectivamente os efeitos de perda de capacidade resistente por presença de furos, fendas ou nós, é tanto mais grave quanto mais aguçados sejam os seus bordos interiores, pelo efeito das correspondentes concentrações de tensões. Uma estimativa do limite para o início da propagação de fenda pode ser obtido pela análise da mecânica da fractura como a realizada por Murphy (1979), relativamente a uma incisão numa viga em flexão, Figura 3.68. Segundo Murphy (1979), um critério conservador indica o limite para início e propagação da fractura através da relação,

$$\sqrt{h} \left[A \left(\frac{6M}{b h^2} \right) + B \left(\frac{3V}{2bh} \right) \right] = 1 \quad (3.99)$$

em que, h e b são respectivamente a altura e a largura da secção em (mm), M é o momento flector em (kPa), V é a esforço de corte transversal em (kPa), e A e B são constantes dependentes da relação a/h , onde a é a profundidade do entalhe, tirados do gráfico da Figura 3.71, onde a curva A_c diz respeito a uma região ou provete em que esteja presente esforço de compressão, e A_t a curva respeitante a um provete ou uma zona em tracção. A curva B permite tirar a constante B independentemente de se tratar de tracção ou de compressão.

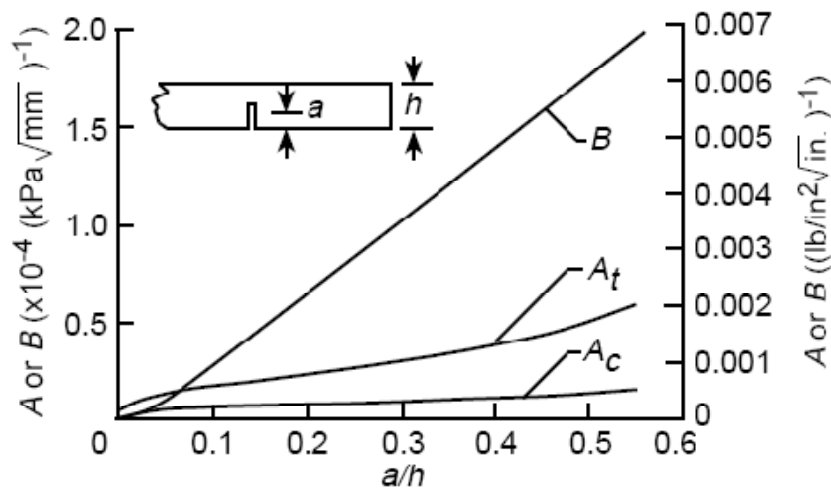


Figura 3.71 – Coeficientes A e B para determinar a tensão de início de propagação de fenda por efeito de entalhe na madeira (Murphy, 1999).

Nos ensaios de compressão torna-se particularmente relevante o princípio de Saint-Venant, segundo o qual as tensões só são uniformes em toda a secção a partir de uma certa distância dos pontos de carga. Dependente da forma de aplicação da carga, as tensões aparecem não uniformes junto aos pontos de aplicação da força ou junto a irregularidades da secção, mesmo que sejam pequenos defeitos, Figura 3.72. No caso particular dos ensaios de compressão de madeira, tal como para outros materiais muito deformáveis, esta distância depende da regularidade e paralelismo dos topos dos provetes, Figura 3.28 da secção 3.13.2 deste trabalho.

A distância definida pela mecânica dos materiais como suficiente para uma uniformidade das tensões é de 1,5 vezes a menor largura da superfície de aplicação da força, distância que se recomenda como medida de referência para outras irregularidades, caso não haja nenhuma indicação em contrário, em particular no caso dos materiais isotrópicos.

Princípio de Saint-Venant

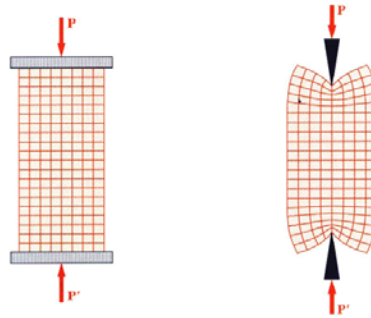


Figura 3.72 – Princípio de Saint-Venant. (Beer, 1992).

Além do princípio anterior, tem de se ter em conta também o melhor local para colocação dos extensómetros para medição do aumento de dimensões da secção. Como se vê no modelo representado na Figura 3.73, junto dos pontos de aplicação de carga existe também uma restrição à expansão lateral, pelo que se aplica uma regra semelhante ao princípio de Saint-Venant, fazer medições da secção somente em locais suficientemente afastados dos pontos de carga, como é definido em todos os procedimentos normativos para ensaios experimentais.

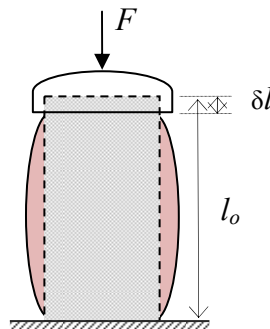


Figura 3.73 - Perturbação da amarração na avaliação do coeficiente de Poisson.

3.20 Critérios de análise de falha

Embora seja intrinsecamente verdade que a ruptura ou falha se dá sempre que uma tensão real uniaxial atinge e/ou supera a tensão máxima determinada experimentalmente para esse material, para o tipo de esforço imposto e sua direcção, na realidade, os esforços puros e uniaxiais só acontecem em casos muitos raros e pontuais num componente estrutural. Por esta razão tornou-se necessário na mecânica dos materiais definir critérios que tivessem em conta a situação de estados complexos de tensões. Assim, apareceram ao longo do tempo várias teorias para resolver este problema. A teoria de Lamé–Rankine tem por base os princípios anteriormente descritos e

aplica-se satisfatoriamente a materiais frágeis. A teoria de Coulomb, da máxima tensão de corte, aplica-se satisfatoriamente aos materiais dúcteis e baseia-se na avaliação da tensão de corte. A teoria de Saint-Venant das extensões máximas, tem por base uma deformação máxima do material, que não pode ser excedida. A teoria de von Mises usa o princípio da máxima energia de deformação (distorção ou corte) do material.

Segundo Bodig (1982) todas as teorias brevemente enunciadas anteriormente, apresentam fragilidades para materiais ortotrópicos, em particular a madeira, pelo motivo de terem sido desenvolvidas com base em simplificações só possíveis para materiais isotrópicos e de propriedades mais regulares e previsíveis.

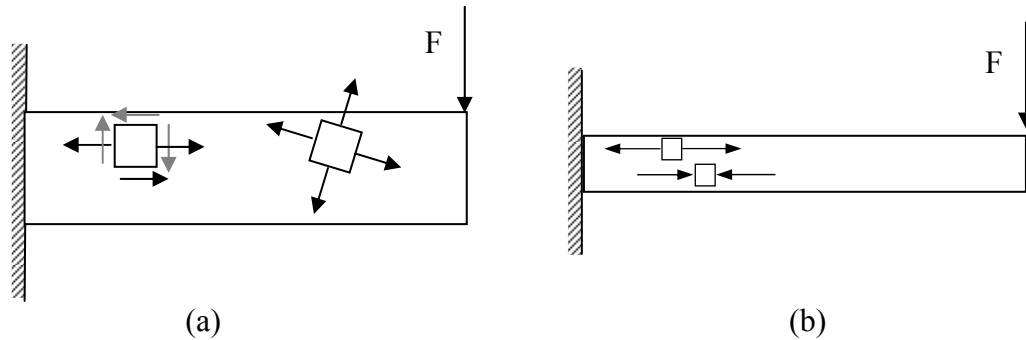
Refira-se ainda que a chamada teoria de Weibull se baseia na ideia que a falha mecânica dos materiais se inicia sempre por um pequeno defeito, que depois se amplifica por efeito do aumento das tensões presentes. Um pequeno defeito é por exemplo uma fenda ou descontinuidade e o estudo da sua origem e progressão fazem parte de uma disciplina própria a que se dá o nome de mecânica da fractura.

Como já referido em capítulos anteriores, a madeira é particularmente susceptível à fluência, de tal modo que a ruptura pode ocorrer por fluência, com valores de carga que num ensaio de duração rápida seriam perfeitamente suportáveis pela mesma peça. Portanto, para madeira, um modelo de análise de falha terá que distinguir claramente se se trata de falha rápida ou de falha após um período longo de carregamento. A esta última possibilidade também se dá a designação de falha visco-elástica (Chaplain, 2007). Nesta análise de falha há também que ter em conta outras propriedades particulares da madeira, como a variação de rigidez em função do teor em água e ainda, a presença de defeitos e singularidades. Dos estudos realizados por Chaplain (2007) num material derivado da madeira, LVL (*laminated veneer lumber*) – vigas de folha de madeira coladas com as fibras na direcção paralela, concluiu-se que, para elementos com pequenos defeitos e singularidades, há uma previsão pouco fiável e pouco precisa do tempo ao fim do qual se dá a ruptura visco-elástica.

Quando um elemento estrutural é produzido com um material dúctil, é projectado para que não ceda sob condições esperadas de carregamento. Se o componente é carregado com uma tensão uniaxial, o valor da tensão que causa a cedência do material é a mesma da tensão obtida em ensaios laboratoriais em provetes de pequenas dimensões (valores tabelados para os diferentes materiais).

Para situações mais complexas do estado de tensão em que um componente é submetido a um esforço numa direcção que não coincide com os eixos principais para os quais temos valores tabelados de tensões uniaxiais, há necessidade de encontrar formas de estado de tensão

equivalente que permitam a sua avaliação comparativa com dados conhecidos experimentalmente ou padrões definidos teoricamente. Tudo isto é possível com explicado anteriormente na secção 3.4.



*Figura 3.74 – Estado de tensão num ponto segundo diferentes direcções, para uma aplicação plana de cargas.
a) Viga de grande altura; b) Viga fina.*

Na Figura 3.74 (a) representam-se as possibilidades reais de estado plano de tensões enquanto na Figura 3.74 (b), devido à esbelteza da viga em consola, as tensões unidireccionais de tracção e de compressão são tão elevadas que, para efeitos de cálculo, se podem desprezar sem grande erro, as componentes derivadas das tensões de corte transversal. Esta análise é particularmente importante para materiais que tenham valores diferentes para as tensões máximas em diferentes direcções, como é o caso da madeira (tensão de tracção paralela às fibras é de 85 MPa, enquanto que na direcção perpendicular às fibras é apenas de 5 MPa).

Para a madeira, mesmo numa aplicação uniaxial de carga de serviço, basta um pequeno desalinhamento da direcção da carga para a direcção de alinhamento das fibras para se ter uma quebra abrupta da tensão de cedência.

Para os exemplos esquematicamente representados na Figura 3.74, enquanto que para (b) seria possível ter uma razoável previsão da carga F que causaria a rotura por tracção, ou por compressão unidireccionais, no exemplo (a) tal análise simplificada não é possível, sendo então necessário recorrer aos métodos discutidos nesta secção e aos estudos relacionados com o círculo de Mohr, dito de outra forma, as peças de madeira maciça (vigas e pilares, etc.), quanto maiores maior será a dificuldade em modelar matematicamente o seu comportamento.

Para avaliação do ponto de cedência de um componente real, perante um certo estado de tensões aplicadas podem ser usados dois critérios: um é o da tensão de corte máxima e o outro é o da energia máxima de distorção, conhecido pelo critério de von Mises.

3.20.1 Critério de von Mises

O critério de von Mises é utilizado na mecânica dos materiais para estimar os limites de resistência dos materiais dúcteis e isotrópicos (por exemplo o aço). Esta teoria define que a falha estrutural ocorre quando a energia de distorção atinge a mesma energia da falha de uma tensão uniaxial de referência, como a representada matematicamente por,

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.100)$$

onde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais.

A vantagem da aplicação de um critério de análise de falha do tipo do de von Mises é que num estado complexo de tensão podemos definir o limite de resistência elástica comparando com um único valor numérico. Nenhum valor de tensão uniaxial pode ter um valor superior à tensão equivalente de von Mises. Um componente estrutural é seguro se a máxima energia para causar distorção por unidade de volume for inferior à da energia para causar distorção num ensaio de tracção uniaxial no mesmo material.

Frequentemente os resultados da análise por elementos finitos, tem por base a tensão de von Mises. O factor de segurança é função das tensões de projecto e das tensões médias de cedência, segundo o factor de segurança, f_s ,

$$f_s = \frac{Y_s}{D_s} \quad (3.101)$$

onde Y_s é a tensão média de cedência e D_s é a tensão de projecto.

A equação (3.100), para estados planos de tensão em que $\sigma_3=0$, fica simplificada para a chamada equação de Norris (3.102) (Norris, 1962), (Aicher, 2001),

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.102)$$

De acordo com conclusões obtidas por Aicher (2001), a equação de Norris não dá uma boa previsão para madeira, pelo que foi introduzida a correcção com a parcela da tensão de corte, tornando-se na nova equação,

$$\sigma_{equiv. von Mises} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \tau_{xy}} \quad (3.103)$$

Esta equação com a definição da tensão equivalente de von Mises é que serve para determinar o limite a partir do qual o conjunto de tensões presentes é causador de falha estrutural, segundo o critério de von Mises, num estado plano de tensão.

A teoria de von Mises é representada geometricamente por uma elipse inclinada e centrada na origem, tal como representado na Figura 3.75. Os estados de tensão que caíam dentro da zona sombreada são estruturalmente seguros, enquanto os que fiquem fora da zona sombreada correspondem a uma situação de falha.

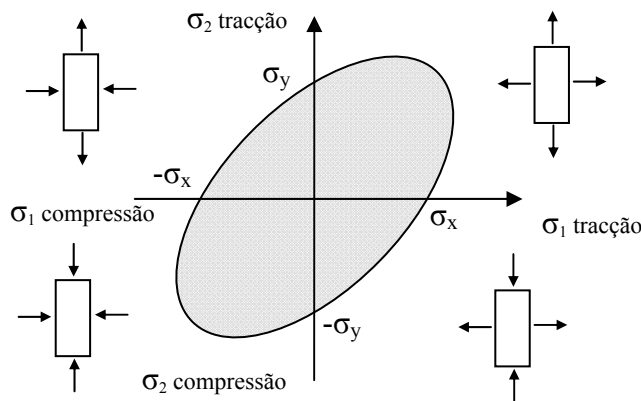


Figura 3.75 – Critério de análise de falha de von Mises, em duas dimensões, para materiais isotrópicos.

3.20.2 Critério de Tresca

Tal como referido anteriormente, qualquer estado de tensão permite uma equivalência dependendo do ângulo que se considere a análise. Para o estado de tensão definido por σ_x , σ_y e τ_{xy} é possível encontrar um referencial de eixos 1 e 2, rodados de um ângulo α em relação a xy , em que as tensões σ_1 , σ_2 são tensões principais e $\tau_{12}=0$.

Para materiais isotrópicos um princípio simples de análise de falha é baseado na tensão equivalente de Tresca,

$$\sigma_{equiv. Tresca} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (3.104)$$

O critério da máxima tensão de corte é válido para materiais dúcteis com tensões de compressão e tração semelhantes e com tensões teóricas de corte cerca de $\frac{1}{2}$ da tensão de tração (exemplo, aço macio), no estado plano de tensões. Pelo círculo de Mohr também é fácil prever que a tensão máxima de corte ocorre numa direcção de 45° relativamente à tensão máxima

de tracção, ou seja, se soubermos o valor e direcção da tensão de corte máxima podemos também saber as tensões principais σ_1 , σ_2 com $\tau_{12}=0$.

A representação gráfica deste critério é dada na Figura 3.76, que tem a designação de hexágono de Tresca, em honra ao investigador francês que o desenvolveu.

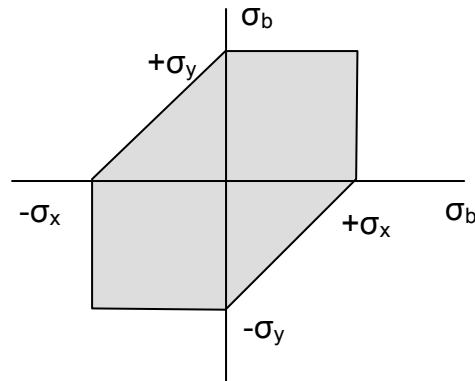


Figura 3.76 – Hexágono de Tresca para avaliação de cedência num estado plano de tensão (Beer, 1992).

Pela representação gráfica do critério de Tresca, um componente estrutural falha quando as tensões σ_a e σ_b caem fora da zona sombreada da figura.

A energia de distorção depende do módulo de distorção G e num estado plano de tensão e para materiais isotrópicos a equação representa a equação de uma elipse que circunscreve o hexágono de Tresca, Figura 3.76.

Para materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira, a análise de falha tem de ter em conta não só as propriedades diferentes conforme os diferentes esforços, mas também as diferentes direcções de incidência, e ainda a influência de singularidades próprias da madeira. A previsão da falha torna-se assim extremamente difícil se a exigência de precisão de cálculo for elevada. Para aplicações em engenharia os Eurocódigos e normas de cálculo solucionam o problema através dos tratamentos estatísticos, atribuindo os valores característicos como os valores a introduzir nas equações e programas de determinação das tensões.

Do ponto de vista do conhecimento da madeira é muito importante correlacionar o comportamento mecânico com características macroscópicas observáveis e utilização de indicadores de majoração ou minoração dos valores indicativos, e assim poder prever o comportamento e a possibilidade de falha de uma forma objectiva e pontual.

A superação da falha de informação sobre as características da madeira é feita de uma forma prática e aceitável sob o ponto de vista da engenharia aplicada, através de relações entre propriedades que são obtidas por desenvolvimento experimental. A norma Europeia Europeia

EN 384:2002 define os valores indicativos de algumas das relações entre propriedades da madeira, Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Relações estimadas entre diferentes propriedades da madeira, para fins estruturais, segundo a norma Europeia EN 384:2002.

Tracção paralela às fibras	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	obtido a partir da tensão de flexão
Compressão paralela às fibras	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45}$	obtido a partir da tensão de flexão
Corte paralelo às fibras	$f_{v,k} = \min, \begin{matrix} 3,8 \\ 0,2 (f_{m,k})^{0,8} \end{matrix}$	obtido a partir da tensão de flexão
Tracção perpendicular às fibras	$f_{t,0,k} = \min \begin{matrix} 0,6 \\ 0,0015 \rho_k \end{matrix}$	obtido a partir da massa volúmica
Compressão perpendicular às fibras	$f_{c,0,k} = 0,007 \rho_k$ (para Resinosas) $f_{c,0,k} = 0,015 \rho_k$ (para Folhosas)	obtido a partir da massa volúmica
Módulo de elasticidade perpendicular às fibras	$E_{90,med} = E_{0,med} / 30$ Resinosas $E_{90,med} = E_{0,med} / 15$ Folhosas	obtido a partir do E paralelo
Módulo de corte	$G_{med} = E_{0,med} / 16$	obtido a partir do E paralelo

Ao longo da parte experimental deste trabalho confirmar-se-ão muitas destas relações.

3.20.3 Critério para tensões uniaxiais

O critério mais simples para prever a ocorrência de falha de um material ortotrópico como a madeira, num estado plano de tensão é o critério de tensões uniaxiais (Aicher, 2001), também conhecido por critério de Norris (Smith, 2003), e que se traduz pela expressão matemática,

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_x \text{ máx.}} + \frac{\sigma_y}{\sigma_y \text{ máx.}} + \frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy} \text{ máx.}} = 1 \quad (3.105)$$

em que $\sigma_x \text{ máx.}$ e $\sigma_y \text{ máx.}$ são as tensões máximas nas duas direcções do plano (tracção ou compressão) e $\tau_{xy} \text{ máx.}$ é a tensão máxima de corte no plano. Ao estado de tensão definido por σ_x , σ_y , e τ_{xy} correspondem as tensões principais σ_1 , σ_2 , e $\tau_{12}=0$ nas direcções correspondentes ao ângulo α e de acordo com a equação de transformação, ou da representação gráfica do círculo de Mohr.

A representação gráfica do critério de Norris é a que se mostra na Figura 3.77.

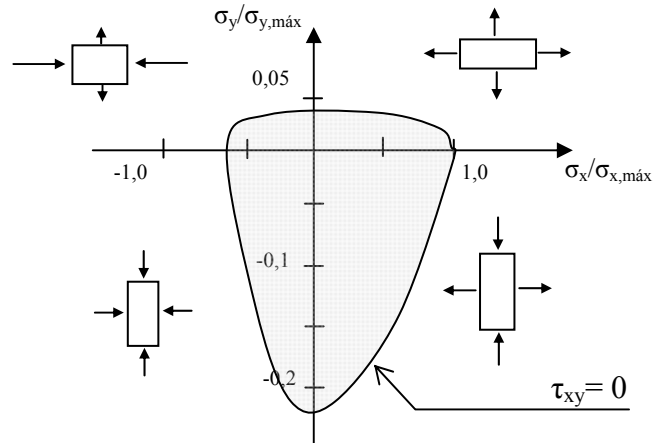


Figura 3.77 – Contorno de Norris para avaliação de cedência num estado plano de tensões (Adaptado de Smith, 2003).

Bodig (1982) descreve um critério de previsão da ruptura por compressão, baseado na fórmula de Hankinson (3.106). Esta fórmula descreve, com boa relação com os dados experimentais, a tensão de ruptura em madeira (sem defeitos nem singularidades), para diferentes ângulos entre a direcção da força de compressão e a direcção das fibras.

$$\sigma_{c,\theta} = \frac{\sigma_{c,0,máx} \sigma_{c,90,máx}}{\sigma_{c,0,máx} \operatorname{sen}^2 \theta + \sigma_{c,90,máx} \operatorname{cos}^2 \theta} \quad (3.106)$$

em que,

- $\sigma_{c,\theta}$ - é a tensão de ruptura à compressão no ângulo θ ,
- $\sigma_{c,0,máx}$ - é a tensão máxima à compressão na direcção paralela às fibras,
- $\sigma_{c,90,máx}$ - é a tensão máxima à compressão na direcção perpendicular às fibras,
- θ - é o ângulo entre a direcção da força e a direcção das fibras da madeira.

Segundo Aicher (2001), na tensão de tracção “*off-axis*” da madeira, se o termo relativo à tensão de corte na equação (3.104) for desprezado, resulta na equação,

$$\sigma_v = \sigma_{\alpha,t} = \frac{\sigma_{x,t}}{\frac{\sigma_{x,t}}{\sigma_{y,t}} \sin^2 \alpha + \operatorname{cos}^2 \alpha} \quad (3.107)$$

em que $\sigma_{\alpha,t}$ é a tensão de tracção na direcção α e $\sigma_{x,t}$ e $\sigma_{y,t}$ são as tensões de tracção nas direcções conhecidas.

Esta equação é chamada a equação de Hankinson, que foi também adoptada pelo Eurocódigo 5 para o dimensionamento da madeira maciça, lamelado-colado, e LVL. O factor invariante para avaliar comparativamente a possibilidade de falha é obtido no estado plano de tensão pela soma das tensões principais.

3.20.4 Critério de Tsai-Hill

Para materiais ortotrópicos regulares como é o caso de compósitos reforçados com fibras orientadas, há uma boa resposta do modelo designado de Tsai-Hill.

Se considerarmos o efeito da orientação das fibras relativamente à direcção de aplicação da força de deformação num material compósito (matriz aglutinante com elementos fibrosos orientados), podemos encontrar três diferentes formas de atingir a rotura, tal como representado na Figura 3.78:

- A – Fractura por tracção das fibras (quando as fibras se encontram na mesma direcção da força aplicada). A tensão de rotura depende da característica das fibras e da sua quantidade relativamente à matriz aglomerante;
- B – Falha por corte paralelo entre as fibras (quando as fibras apresentam algum desalinhamento com a direcção da força aplicada). A tensão de rotura depende essencialmente da ligação entre as fibras e o material da matriz.
- C – Falha por separação entre as fibras, quer pela sua desagregação ou pela cedência da interface constituída pelo material aglomerante. Este tipo de cedência acontece quando a força é exercida perpendicularmente à direcção de alinhamento das fibras.

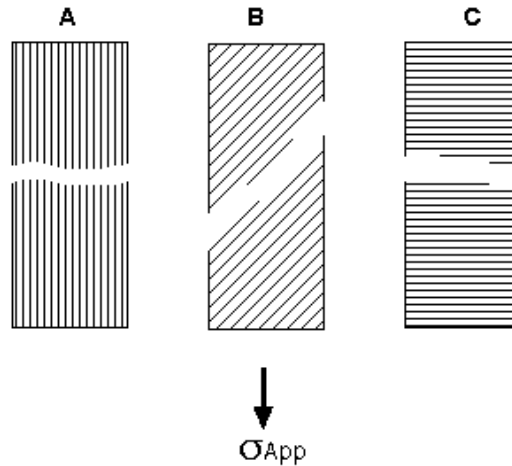


Figura 3.78 - Modos de rotura para materiais orientados, relativamente às direcções da força aplicada e dos elementos resistentes. A – tracção paralela; B – corte; C – tracção transversal.

São bem conhecidas as expressões que permitem conhecer o valor da tensão de cedência para a situação da força paralela, a que se atribui a convenção de tensão na direcção xx , e a tensão na direcção perpendicular que convencionamos chamar direcção yy . Para se determinarem os limites de cedência em direcções diversas pode-se recorrer ao critério de Tresca. Para tal ter-se-á de conhecer o estado de tensões reais em cada direcção, o que é conseguido mais uma vez, através do círculo de Mohr, e comparar com a resistência própria do material em cada uma daquelas mesmas direcções, Figura 3.79.

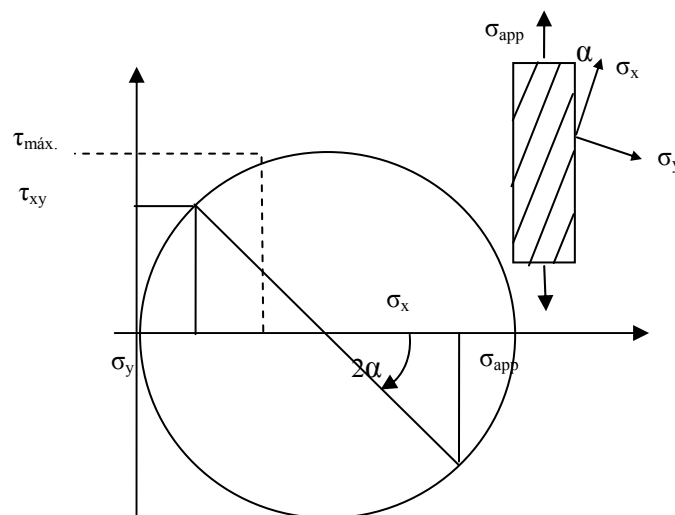


Figura 3.79 - Equivalência de tensões pelo círculo de Mohr para o critério de Tsai-Hill.

Para que a rotura ocorra basta que se verifique o cumprimento de pelo menos uma das seguintes inequações,

$$\sigma_x > \sigma_{t,0} ; \sigma_y > \sigma_{t,90} ; \tau_{xy} > \tau_{m\acute{a}x}. \quad (3.108)$$

$$\sigma_{app} > \frac{\sigma_x}{\cos^2 \alpha} ; \sigma_{app} > \frac{\sigma_y}{\sin^2 \alpha} ; \sigma_{app} > \frac{2\sigma_y}{\sin 2\alpha} \quad (3.109)$$

A condição que for excedida em primeiro lugar constitui a causa determinante da cedência.

Quando duas cargas são aplicadas, em direcções perpendiculares entre si, torna-se necessário definir um critério que permita prever o estado de tensões na zona afectada pelas cargas aplicadas e prever a condição de rotura. Tsai e Hill estabeleceram um critério eficaz para prever a fractura em materiais orientados, como os compósitos reforçados a fibras, que pode ser aplicado ao caso particular da madeira (compósito natural). Este critério está baseado na energia máxima de deformação em vez das habituais considerações nas tensões ou nas deformações. Esta abordagem através da energia de deformação permite não considerar o facto de que a fractura pode ocorrer, quer devido a ter sido excedida a tensão máxima (exemplo: a tensão efectiva na direcção perpendicular excede a tensão limite da matriz), quer a deformação máxima ter sido excedida (exemplo: a deformação efectiva na direcção paralela excede a tensão limite do material da matriz).

A energia máxima de deformação segundo o critério de Tsai-Hill é dada pela expressão,

$$\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{t,0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{t,90}} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_{t,90}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\sigma_{t,0}^2} \right) > 1 \quad (3.110)$$

Esta mesma equação, se for aplicada para um tensão uniaxial única, transforma-se, para cada uma das situações, respectivamente em,

- Tensão paralela às fibras → limite de falha com,

$$\sigma_x = \sigma_{t,0}, \quad \text{porque } \sigma_y = 0 \text{ e } \tau_{xy} = 0 \quad (3.111)$$

- Tensão perpendicular às fibras → limite de falha com,

$$\sigma_y = \sigma_{t,90}, \quad \text{porque } \sigma_x = 0 \text{ e } \tau_{xy} = 0 \quad (3.112)$$

- Tensão de corte puro → limite de falha com,

$$\tau_{xy} = \tau_{t,90}/2, \quad \text{porque } \sigma_x = 0 \text{ e } \sigma_y = 0 \quad (3.113)$$

o que vem a revelar situações previsíveis.

Aparece referenciada na bibliografia uma variante da teoria de Tsai-Hill que se identifica com a teoria de Tsai-Wu, que apresenta muitas semelhanças com a que foi descrita anteriormente,

com a diferença da de Tsai-Wu necessitar tanto das tensões de tracção como das de compressão, enquanto que a teoria de Tsai-Hill necessita de apenas uma delas (Liu, J., 2001).

3.21 Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios

Habitualmente para todos os materiais existe a regra de aumentar o número de ensaios, para se fazer uma média, desvio padrão e outros tratamentos estatísticos. Acontece que o que se pretende é num dado momento, ao fornecer informação sobre um material, poder dizer de modo simples, quais os limites esperados das suas características. Ora uma estatística sobre características de madeiras, apoiado no único critério do número de provetes daria uma média, que podia ser o resultado de milhares de ensaios, mas no entanto aquele valor poderia afastar-se bastante de um único valor individual, com as consequências no risco que tal extrapolação pudesse arrastar. Este princípio tem portanto de ser complementado com informação precisa sobre a própria origem dos provetes, concretamente do local de um tronco de onde foram extraídos, como seja, do lenho juvenil, do cerne ou do borne, da presença e caracterização dos defeitos, ou mais exactamente, de uma classificação. Além de uma possível informação, quando possível, da altura no fuste da árvore. Assim, como regra são sempre indicadas as informações complementares associadas à madeira, tendo em conta as suas singularidades e defeitos. O tratamento estatístico deverá ser feito por grupos de características e dentro de critérios de classificação bem definidos. A atribuição de valores quantificados a uma dada propriedade tem de levar associada a informação de um conjunto de regras de caracterização, incluindo algumas com base em observação visual, não esquecendo que muitas das singularidades ou defeitos da madeira podem estar escondidos no seu interior.

Quando os valores das propriedades se destinarem a servir de base de cálculo estrutural os conjuntos de resultados da informação experimental, tem de ter tratamento estatístico com base na distribuição de frequências, distribuição normal ou distribuição de Student e serem calculados os valores dos quantis correspondentes, normalmente o 5-percentil inferior, segundo as normas em vigor para o cálculo estrutural.

Os valores característicos das propriedades mecânicas e da massa volúmica são determinadas por tratamento estatístico de resultados de grandes séries de ensaios de amostras bem caracterizadas e representativas das disponibilidades de madeira para uso industrial. O procedimento é o descrito na norma europeia EN 384:2004 “*Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density*”.

Os valores característicos são identificados por um sub-índice com a letra (k) junto às indicações de se tratar de ensaios de compressão (c), tracção (t) ou flexão (m) e ainda os sub-índices (o) ou ($9o$) conforme se trate de esforço paralelo ou perpendicular às fibras, respectivamente. Os valores característicos são na prática muito aproximados aos do 5-percentil inferior, afectados em muitos casos por factores de correcção que dependem do tipo de ensaio, do número de amostragens e ainda do número de provetes em cada amostragem.

Na Figura 3.80, mostra-se como num trabalho de meados do século XX era já bem evidente a consciência da necessidade de um tratamento estatístico adequado para encontrar os valores de cálculo estrutural em madeira, tendo em conta a sua inevitável variabilidade. Neste simples exemplo, de ensaio de 430 provetes de várias qualidades, os mesmos foram empilhados em grupos segundo a sua frequência de ocorrência num intervalo pré-estabelecido. A média simples daria um valor de 354 kgf/cm^2 , mas o valor correspondente ao quinto percentil inferior é de 260 kgf/cm^2 . Nesta figura também é evidenciada a tendência para a madeira não seguir a distribuição normal, pois a curva imaginária não é simétrica nem a média se situa a meio do intervalo. Com este tratamento assegura-se estatisticamente que dos 430 provetes só 16 (contagem real), ou 22 provetes (cálculo de 5 % do universo ensaiado), apresentam um valor de resistência inferior ao valor característico.

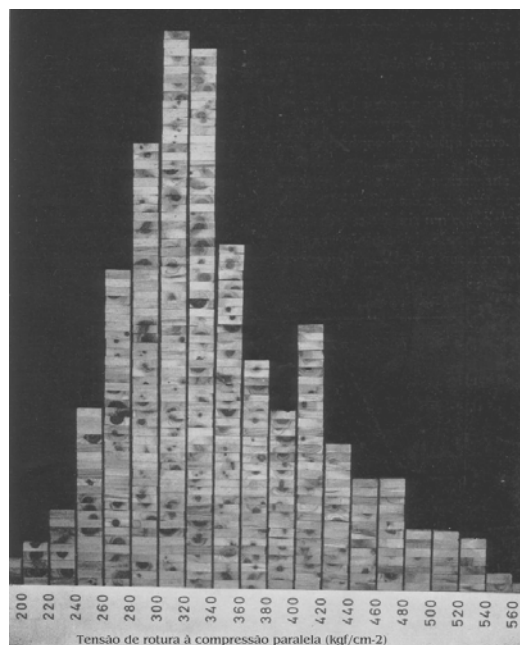


Figura 3.80 – Exemplos da distribuição estatística de ensaios de compressão paralela às fibras em pinho bravo. (Tomás Mateus, 1961).

Na Tabela 3.11 mostram-se os valores característicos para o pinho bravo, classe de qualidade visual “E” da norma *NP 4305 - Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas*, que se encontra referenciada e validada na norma europeia EN 1912:2004 como norma de referência para classificação visual. Os valores da Tabela 3.11 são os correspondentes à classe de resistência C18 da norma EN338:2003.

Tabela 3.11 – Valores característicos para o pinho bravo, segundo a norma Europeia EN 338:2003, classe de resistência C18.

Propriedades	Símbolo / Unidades (MPa)	Classe de resistência C18
Valor característico da tensão de ruptura à flexão estática	$f_{m,k}$	18
Valor característico da tracção paralela	$f_{t,0,k}$	11
Valor característico da tensão de tracção transversal	$f_{t,90,k}$	0,5
Valor característico da tensão de compressão paralela	$f_{c,0,k}$	18
Valor característico da tensão de compressão transversal	$f_{c,90,k}$	2,2
Valor característico da tensão de corte paralelo	$f_{v,k}$	2,0
Média do módulo de elasticidade paralelo	$E_{0,méd.}$	9000
5 % do módulo de elasticidade paralelo	$E_{0,05}$	6000
Média do módulo de elasticidade transversal	$E_{90,méd.}$	300
Média do módulo de corte	$G_{méd.}$	560
Valor característico da massa volúmica (kg/m^3)	ρ_k	320
Valor médio da massa volúmica (kg/m^3)	$\rho_{méd.}$	380

3.22 Modelo de Weibull para análise estatística da falha

A mecânica da fractura tem como objectivo explicar o comportamento e falha dos materiais segundo modelos pré-definidos, em função de diferentes solicitações, da intensidade das tensões, de eventuais defeitos, da geometria dos componentes e da energia necessária para a desagregação do material. Para completar esta informação é necessário utilizar os modelos

estatísticos, pois só com toda a informação é possível garantir a segurança dos componentes estruturais.

No Capítulo IV os resultados dos ensaios foram sujeitos a um tratamento definido nas Normas Europeias e Eurocódigos, para o dimensionamento de estruturas. No entanto há outras abordagens estatísticas para a previsão da fractura, sendo uma das mais citados o modelo de Weibull. A teoria de Weibull reconhece que os defeitos críticos são os principais responsáveis pela falha dos materiais (Smith, 2003). Tal como é amplamente reconhecido, a falha de uma cadeia dá-se sempre pelo elo mais fraco, e neste sentido, a probabilidade de encontrar um elo mais fraco aumenta com o comprimento da cadeia. Ou seja, o efeito de escala faz-se sentir quando avaliamos um ponto e pretendemos extrapolar os resultados para todos um conjunto aparentemente uniforme.

A semelhança da aplicação do modelo estatístico de Weibull aparece quando se pensa na madeira como uma cadeia de elementos base ou sequência repetida de materiais com características significativamente diferentes como são as diferentes células da madeira ou as sequências de lenho inicial e lenho final, ou ainda eventuais singularidades como nós, pequenas fendas e desvios de fio. Este modelo é abordado na Secção 5.2.1, para as diferentes propriedades elásticas das camadas de crescimento. Por um lado reconhece-se que a falha vai aparecer no elemento de menor resistência, mas sendo a madeira uma sequência alternada de materiais com menor e maior resistência haverá necessidade de definir de forma estatística as probabilidades de ocorrência da falha em função das dimensões da amostra ensaiada e do componente dimensionado.

Segundo a teoria de Weibull (Smith, 2003) o modelo matemático é representado pela expressão,

$$p_f = 1 - e^{-\left(\frac{V}{V_0}\right)\left(\frac{\sigma}{w}\right)^m} \quad (3.114)$$

em que,

- p_f - representa a probabilidade de ocorrer falha;
- V - o volume do componente real;
- V_0 - o volume do elemento base ensaiado;
- σ - a tensão;
- w - a constante de escala;
- m - constante designada módulo de Weibull.

Uma vez determinadas as constantes, pode dispor-se de uma ferramenta que permite determinar a probabilidade de ocorrência de falha, em função da dimensão do componente, comparativamente à dimensão e propriedades do elemento unitário ensaiado.

Na prática este modelo é difícil de aplicar à madeira, pois não se consegue de forma inequívoca definir qual o elemento base a tomar como referência, mas que ao mesmo tempo se disponha de informação sobre o comportamento individual desse elemento. Por exemplo, uma célula da madeira do lenho inicial da zona de lenho juvenil seria o elemento mais fraco, mas como se pode imaginar é muito difícil individualizar e realizar o estudo deste elemento.

Capítulo IV

Desenvolvimento experimental.

4.1.1 Introdução

Esta parte do trabalho incide sobre os ensaios mecânicos segundo normas e procedimentos conhecidos e também novos procedimentos propostos a discussão, tanto para confirmação de modelos de comportamento já estudados e publicados por especialistas, como para construção de novos modelos. A amostragem e caracterização das madeiras é feita em duas fases, a primeira consistiu numa especificação genérica sobre a origem, qualidade, procedimentos de preparação enquanto na segunda fase, para cada ensaio, é feita a identificação detalhada da orientação dos planos principais, da distância à medula, da massa volúmica e eventual presença de singularidades.

A decisão quanto aos ensaios a serem realizados foi tomada seguindo o critério da sua importância para o conhecimento, caracterização e previsão do comportamento estrutural da madeira. Sendo a madeira um material natural com grande variabilidade das suas propriedades, ao que acresce a sua completa anisotropia e estrutura orientada, há poucas simplificações possíveis, o que levou a um programa abrangendo o maior número de diferentes propriedades, mesmo que à custa de uma caracterização mas exaustiva em grande número de provetes numa reduzida gama de propriedades. O programa experimental foi orientado no sentido de ter uma ideia de conjunto do comportamento da madeira e da aplicação das teorias da mecânica dos materiais. Na Tabela 4.1 faz-se uma descrição geral dos ensaios mecânicos realizados, que incidiu em madeira de duas espécies florestais de grande importância económica em Portugal, o pinheiro bravo e o eucalipto comum.

Tabela 4.1 – Ensaio mecânicos realizados em pinho bravo e em madeira de eucalipto.

$\sigma_{t,L}$	Tracção paralela à fibras
$E_{t,L}$	Módulo de elasticidade à tracção paralela
ν_{LR} e ν_{LT}	Coefficientes de Poisson na tracção paralela
$\sigma_{c,L}$	Compressão paralela às fibras
$E_{c,L}$	Módulo de elasticidade à compressão paralela
$\sigma_{t,R}$	Tracção transversal na direcção radial
$\sigma_{t,T}$	Tracção transversal na direcção tangencial
$E_{t,R}$ e $E_{t,T}$	Módulos de elasticidade à tracção transversal (radial e tangencial)
ζ_{LR} e ζ_{LT}	Corte paralelo às fibras nos planos radial e tangencial
ζ_T	Corte transversal
ζ_{TR} e ζ_{RT}	Corte por enrolamento
G_{LR} e G_{LT}	Módulos de corte no corte paralelo
$\sigma_{c,R}$ e $\sigma_{c,T}$	Compressão transversal
f_m	Flexão a quatro pontos
f_m	Flexão a três pontos
E_f	Módulo de elasticidade à flexão
$w_{f,t}$	Fluência à flexão
$\sigma_{c,L}$	Ensaio de compressão sob concentração de tensões

Muitos dos ensaios anteriormente identificados multiplicaram-se tendo em conta os planos de referência radial ou tangencial e ainda a zona de origem no tronco da árvore como seja o lenho juvenil e lenho adulto, o cerne e o borne. Não se contemplaram os comportamentos de madeiras com defeitos, como nós, fendas, inícios de podridões ou outras alterações químicas, nem desvios de fio acentuados, nem valores extremos de teor em água, pois todas estas combinações levariam a um número infundável de ensaios.

4.1.2 Equipamentos de preparação de amostras e ensaio

Os equipamentos para a preparação dos ensaios e sua realização consistiram essencialmente em máquinas de corte com ferramentas muito bem preparadas e afinadas, para obter provetes de dimensões rigorosas, nos sistemas de avaliação dimensional e nos sistemas de aplicação de cargas. Usualmente a primeira aproximação às medidas pretendidas foi feita numa serra de fita,

com dimensões acrescidas de cerca de 5 mm. Posteriormente foi feita regularização de uma das superfícies numa plaina mecânica e na mesma máquina é regularizada uma superfície plana perfeitamente perpendicular à primeira. Tomando como referências as duas superfícies planas anteriormente preparadas as amostras foram processadas numa máquina desengrossadora de 4 lâminas muito bem afiadas e uma árvore de ferramentas de elevada velocidade, com uma precisão de corte de 0,1 mm. Quando necessário, devido à eventual presença de algum fio arrepelado, foi feita uma breve passagem das superfícies numa lixadora de banda com tela abrasiva de grão nº 180.

Para as medições das dimensões da secção e comprimento, usaram-se paquímetros mecânicos com uma precisão de 0,01 mm, que embora não calibrados pelos utilizadores, foram sujeitos a inspecção quanto ao seu bom estado de conservação e qualidade de fabrico, passando por uma verificação comparativamente a outros instrumentos de medida e em relação a peças de precisão de dimensão conhecida.

Para medida das deformações usaram-se diferentes instrumentos de precisão, tais como transdutores de deslocamento piezoeléctricos da marca Sylvac, com uma precisão de 0,0001 mm.

Para a tomada de valores de deformação em simultâneo com a aplicação de cargas utilizaram-se extensómetros electromecânicos das marcas DARTEC e Instron, com precisões de 0,0001 mm, com aberturas padrão de 100 mm e 11 mm respectivamente, equipamentos de classe de precisão 1.

Para aplicação de forças elevadas, como as necessárias para os ensaios de tracção e compressão paralela às fibras e corte paralelo, foi utilizada uma máquina de ensaios universal servo-hidráulica, da marca DARTEC, com uma força máxima de 600 kN e com duas células de carga, uma célula de 600 kN com uma precisão de 0,01 kN, classe 1, e outra com 10 kN com uma precisão de 0,0001 kN, de classe 1. Para aplicação de cargas menores, nomeadamente para os ensaios de tracção e compressão transversais, flexão e outros, foi utilizada uma máquina de ensaios da marca Instron, com capacidade até 25 kN e uma célula de carga de precisão 0,0001 kN, também de classe 1 (segundo NP EN 10002-2). A máquina Instron tem ligação simultânea a 6 canais de registo, tendo sido utilizadas a força aplicada e três deslocamentos e o tempo decorrido. As duas máquinas têm sistema de regulação da velocidade de aplicação de carga e opção por desligar a uma deformação máxima ou a uma carga máxima, previamente estabelecidas. Estas máquinas pertencem ao Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade do Minho.

4.1.3 Amostragem e preparação para ensaios

Sabendo-se da influência que o teor em água da madeira tem sobre as propriedades mecânicas, sempre que nada seja dito em contrário, todas as amostras foram estudadas em valores de teor em água correspondentes ao equilíbrio em condições de 20 °C e 65 % de humidade relativa do ar, o que significa, em média, valores entre $12 \pm 2\%$. Também houve o cuidado de evitar a utilização de madeira de lenho juvenil, ou quanto tal aconteceu, é feita uma referência local sobre esta ocorrência, por motivo da sua comprovada inferior resistência e elevada tendência para defeitos como fendas e empenos, quando comparado com a restante parte do lenho. Foram também evitadas as zonas com nós ou com desvios da direcção das fibras relativamente à geometria de corte das amostras, satisfazendo a generalidade das exigências normativas quanto à classificação por qualidades.

O desenvolvimento experimental incidiu em duas espécies, o pinho bravo e o eucalipto comum, por serem as espécies mais representativas para utilização industrial em Portugal (uma Resinosa e uma Folhosa), e ambas com elevado potencial para utilizações estruturais.

Sempre que possível, os provetes foram preparados com duas faces laterais na direcção tangencial e as outras duas na direcção radial. Foram retirados os provetes que revelavam lenho de reacção, que se reconhecem por variações de crescimento anormais, elevadas densidades locais e visualmente por um contraste de cor escura diferente do habitual (no pinho, camadas de lenho final mais largas do que as camadas de lenho inicial).

Como referido anteriormente foi 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), tal como mostrado na Figura 4.1.

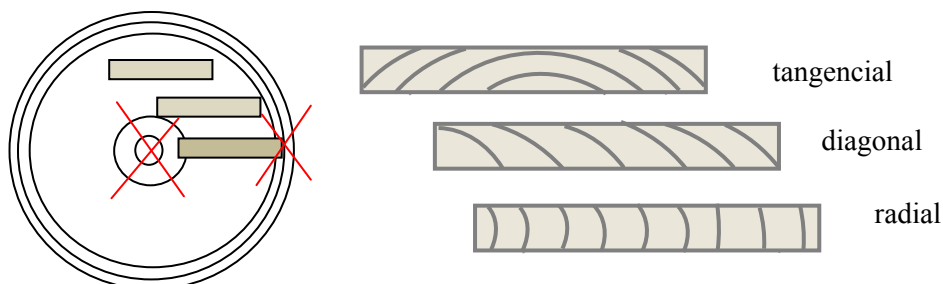


Figura 4.1 – Padrões de corte e zonas de origem das amostras.

Todas as madeiras foram sujeitas a um rigoroso processo de secagem, controlada pelo autor deste trabalho, de modo a garantir que durante o processo não se tivessem originado fendas nem tensões de secagem, o que se torna difícil de garantir quando as madeiras secas têm origem industrial. As fendas criadas a meio do processo de secagem deixam de ser visíveis no final da operação, mas os seus efeitos de perda de continuidade interna do material fazem-se sentir nos ensaios de caracterização e, em última instância, comprometem grandemente o comportamento mecânico na utilização final. As tensões de secagem que permanecerem nas amostras podem ainda ser detectadas mais tarde, tanto por meio de ensaios específicos (ensaio de garfo), como por ligeiros empenos dos provetes na sua forma geométrica e dimensão final.

Para o pinho bravo, uma vez que existe uma norma que define critérios de classificação visual da madeira para fins estruturais, *NP 4305 - Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas*, as amostras foram escolhidas com base nos critérios da classe EE desta norma, com um acréscimo de exigência, tal como mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Exigências mínimas da qualidade do pinho bravo utilizado nos ensaios (adaptadas da norma NP 4305).

Características	Exigência mínima
Nós, bolsas de resina	Ausentes na zona de esforço
Inclinação do fio	< 1/20
Taxa de crescimento	≤ 6 mm de largura de camada
Fendas	Totalmente ausentes
Empeno (em cada 100 mm)	Desvio máximo < 0,5 mm
Descaio	Ausente
Degradações	Não permitidas
Medula / lenho juvenil	Ausente

Relativamente à madeira de eucalipto utilizada nos ensaios, teve proveniência da zona interior Norte, zona de Castelo de Paiva, de árvores de cerca de 35 a 40 anos de idade, com boa configuração morfológica, troncos quase cilíndricos regulares, diâmetros entre 40 a 60 cm, como mostrado na Figura 4.2. Os topos não revelaram presença de fendas radiais acima do que é normal, o que é indicador de relativamente pequenas tensões de crescimento.



Figura 4.2 – Troncos de eucalipto de onde foram retiradas a pranchas para fabrico dos provetes de ensaio das propriedades mecânicas.

A operação de serragem foi feita menos de uma semana depois do abate das árvores em floresta de modo a não permitir uma secagem prematura pelos topos. A orientação do padrão de corte teve em atenção o bom alinhamento das arestas com o fio da madeira e uma orientação de corte privilegiando a obtenção de pranchas de corte radial, Figura 4.3.



Figura 4.3 – Serragem orientadas dos toros de eucalipto, para obtenção de maior número de pranchas de corte radial.

A secagem das pranchas de eucalipto foi feita em condições controladas num secador solar, com gradientes não superiores a 3,5 (relação entre o teor em água da madeira em cada instante e o teor em água de equilíbrio nessa fase da secagem), com verificação visual de não

aparecimento de fendas superficiais e sob forte restrição mecânica de modo a evitar empenos, Figura 4.4.



Figura 4.4 – Secagem de pranchas de eucalipto sob condições controladas num secador solar e sob forte restrição mecânica.

Quanto ao pinho bravo teve origem da zona litoral centro, zona de Leiria, de árvores com idades superiores a 40 anos, de boa conformação e madeira seca ao ar sob coberto durante vários anos. As pranchas foram banhadas com produtos anti-fungo pelo que não apresentavam no seu interior nenhuma alteração cromática. A caracterização das densidades foi feita com rigor para cada ensaio realizado.

4.2 Tracção paralela às fibras

É bem conhecida de todos os que se têm dedicado a estudos das propriedades mecânicas da madeira, a dificuldade em realizar os ensaios de tracção na direcção paralela às fibras, devido à elevadíssima resistência nesta direcção e para este tipo de solicitação, mas também pela desproporcional fraqueza da madeira a outros esforços tais como a tracção e a compressão transversal ou o corte paralelo, sobretudo quando estes esforços aparecem por via da própria tracção em conjugação com inclinações ou desvios locais do paralelismo entre o esforço e o alinhamento dos elementos estruturais naturais.

A forma de ligar o provete de tracção aos sistemas de amarração da máquina de ensaios constitui a principal dificuldade deste ensaio, pois a solução usual para materiais metálicos e poliméricos obrigam a esforços de compressão transversal que ficam limitados na sua intensidade

pela própria resistência máxima da madeira a esta solicitação. As soluções clássicas apresentadas em diferentes normas para resolver este problema, que consistem basicamente na redução de área da secção resistente numa zona central do provete que se pretende romper por tracção paralela às fibras, não são inteiramente satisfatórias para ensaios experimentais em laboratório, especialmente quando se tem em vista a determinação de todos os parâmetros característicos das propriedades elásticas (módulo de elasticidade, coeficientes de Poisson e módulo de corte).

Ao longo deste estudo foi progressivamente aperfeiçoado um novo procedimento, que começa pela geometria e dimensões de corte dos provetes de madeira, segundo um exemplo representado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Preparação intermédia de provetes para ensaio de tracção paralela às fibras.

Para madeira de Resinosas como o pinho bravo, as dimensões apresentadas na Figura 4.6 revelaram-se suficientes para se atingir a ruptura na zona do estreitamento. A zona de secção mais reduzida tem secção constante durante um comprimento de 120 mm, permitindo a aplicação local de extensómetros, tanto na direcção das fibras como nas direcções transversais (radial e tangencial).

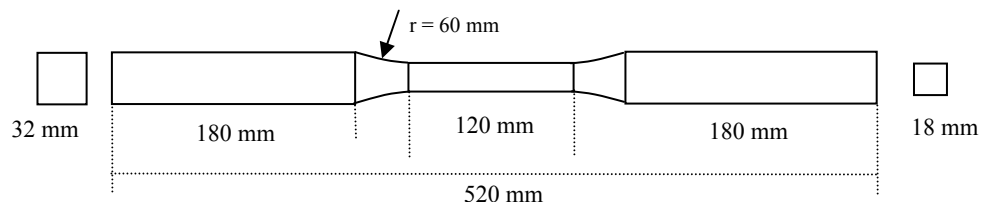


Figura 4.6 – Dimensões do provete para ensaio de tracção paralela do pinho bravo.

Para a madeira de eucalipto, os provetes com uma secção de $18 \times 18 \text{ mm}^2$ tiveram tendência para rotura por corte paralelo, Figura 4.7, correspondente a uma tensão de corte de cerca de 3,5 MPa, tendo atingido uma tensão de tracção paralela na zona de secção reduzida de 140 MPa, mesmo assim não suficiente para provocar a rotura por tracção paralela. Este “descolamento” das fibras por corte paralelo deu-se a uma tensão muito inferior à tensão de corte em ensaios específicos para esta característica. Uma possível explicação estará no modelo de transferência de carga entre o tubo de ferro a a base do provete, tal como explicado mais em detalhe no capítulo dos modelos, nesta tese. A deformação elástica do próprio metal provoca um efeito de tesoura, em que as tensões vão atingindo picos em zonas concentradas a assim migram por toda a zona de ligação.

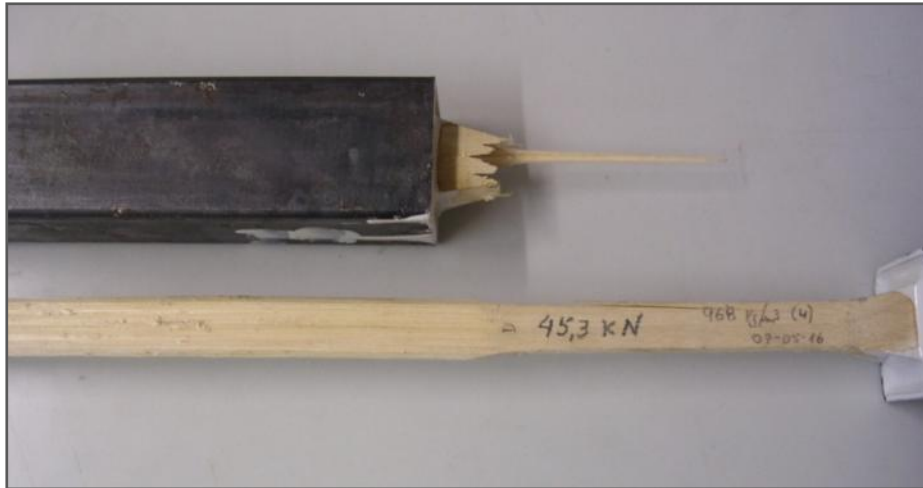


Figura 4.7 – Rotura por corte paralelo paralelo num ensaio do eucalipto à tracção na direcção paralela às fibras.

Para os ensaios de eucalipto, chegou-se à conclusão que as dimensões anteriores não eram suficientes para se dar a rotura por tracção paralela às fibras na zona de secção reduzida, pelo que o estreitamento de secção na zona central teve de ser diminuído para uma superfície quadrada de 12 mm de lado, Figura 4.8, de forma a serem utilizados os mesmos acessórios e a mesma montagem de ensaio que para o pinho bravo.

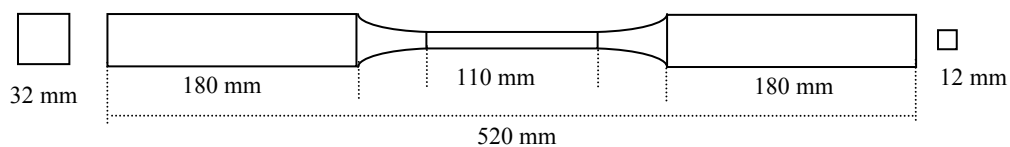


Figura 4.8 – Dimensões do provete para ensaio de tracção paralela usado para madeira de eucalipto comum.

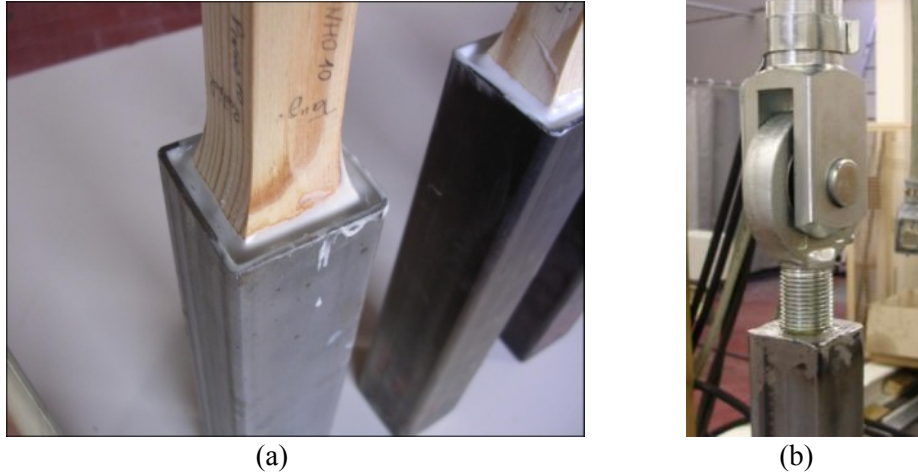
4.2.1 Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio foi baseado num inovador sistema de fixação do provete, que consiste em colar as extremidades de maior secção, ao interior de dois tubos de aço, de secção quadrada, através de uma cola epoxídica de alta resistência. Teve de ser dada especial atenção à centragem do provete de madeira com secção quadrada de 32 milímetros de lado, relativamente à dimensão de 35,7 milímetros da largura interior d lado do quadrado da secção de tubo. Este tubo metálico é totalmente aberto na extremidade onde é colada a madeira, e tem soldado na outra extremidade um bloco metálico com uma rosca interior, que se destina a fixação num sistema articulado que faz a amarração à máquina de ensaio. Na figura 4.9 é representada a sequência de preparação dos provetes de ensaio: madeira com arestas completas; redução da secção central; colagem no tubo metálico; e no final, um dos tubos após a realização do ensaio.



Figura 4.9 - Preparação dos provetes desde o corte em barra até à colagem no tubo de ferro.

Na Figura 4.10 (a) é representado um detalhe de colagem da madeira ao tubo metálico, enquanto na Figura 4.10 (b) se mostra o detalhe do sistema flexível de tracção para perfeito alinhamento de todos os elementos com o eixo de carregamento em tracção.



(a) (b)
Figura 4.10 – Pormenores de montagem de ensaio de tracção paralela. (a) Colagem entre a Madeira e o tubo metálico; (b) Sistema flexível de ligação à máquina de ensaios.

As dimensões foram escolhidas depois de muitos ensaios exploratórios, com vista a garantir com mais elevada probabilidade que a falha ocorresse na própria madeira e na zona de secção mais reduzida, onde se encontram os sistemas de medição da deformação.

Colocação dos extensómetros

Os extensómetros usados nos ensaios foram do tipo electromecânico, aplicados directamente sobre a superfície da madeira na zona de secção reduzida. O extensómetro para avaliação da variação de dimensão no sentido paralelo às fibras tinha um comprimento de referência de 100 mm e uma resolução de 0,0001 mm, enquanto que os extensómetros para avaliar as variações dimensionais transversais (radial e tangencial, respectivamente), tinham um comprimento de referência de 11 mm e uma resolução de 0,0001 mm. Um exemplo da aplicação dos extensómetros nos provetes de tracção paralela é mostrado na Figura 4.11.

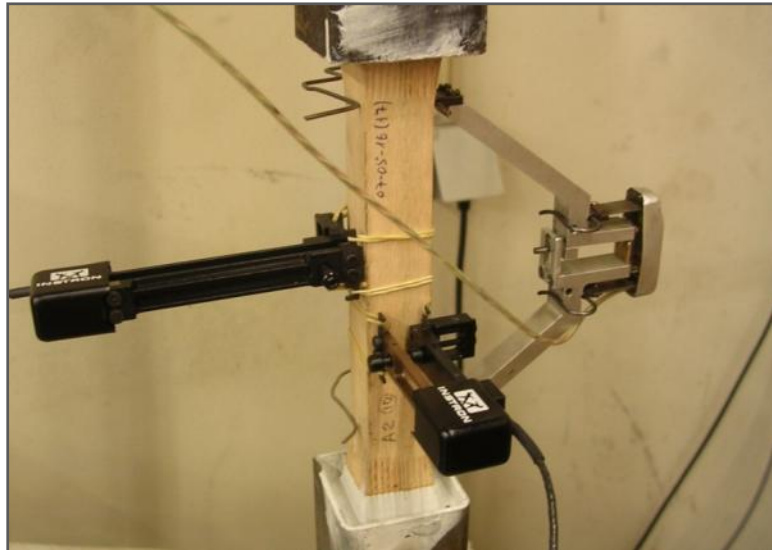


Figura 4.11 - Preparação dos provetes desde o corte em barra até à colagem no tubo de ferro.

A aplicação de carga foi regulada para uma velocidade correspondente a 0,25 kN por segundo, o que corresponde a atingir a carga máxima num período de cerca de 1 minuto e meio. A norma EN 408 estabelece uma velocidade máxima de 0,00005 mm de extensão por cada 1 mm de comprimento em cada segundo, exigência que foi cumprida com os valores utilizados.

4.2.2 Resultados da tracção paralela do pinho bravo

Um lote de 22 provetes de pinho bravo foram preparados para ensaio de tracção paralela, tendo a preparação dos provetes levado em conta as direcções das camadas de crescimento. Duas faces laterais ficaram perpendiculares às camadas de crescimento (faces radiais) e as outras duas ficaram tangentes às camadas de crescimento (faces tangenciais). Tal como se pode exemplificar na Figura 4.12, além das orientações das faces em relação às camadas de crescimento, registaram-se também as diferenças no ritmo de crescimento em dois conjuntos de amostras.

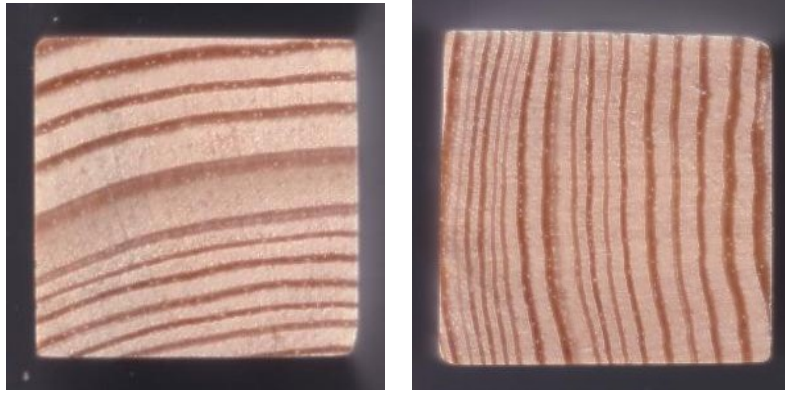


Figura 4.12 – Orientação das camadas de crescimento em relação às faces, e diferentes ritmos de crescimento do pinho bravo utilizado nos ensaios de tracção paralela.

As diferenças de características do pinho bravo apresentadas na Figura 4.12 têm implicações ao nível de se esperar também diferenças no comportamento mecânico. A textura, correspondendo à caracterização da proporção de lenho final em relação ao lenho total, conjuntamente com o ritmo de crescimento, que corresponde à largura média das camadas anuais, tem implicações na densidade, e consequentemente na resistência mecânica. Para análise e melhor interpretação de resultados, os provetes foram separados em dois grupos, um com as madeiras que tinham uma textura acima de 30 % (menor taxa de crescimento), e outro grupo com os que tinham uma textura abaixo dos 30 % (maior crescimento). A regra geral é que, 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).

Foi aplicado um extensómetro na direcção paralela às fibras para registo do alongamento das fibras à medida que foi sendo aplicada a força de tracção, e dois extensómetros aplicados em das direcções transversais coincidentes com faces tangencia e radial, respectivamente, para registo da diminuição de dimensão transversal e assim permitir a posterior determinação dos coeficientes de Poisson.

Na Figura 4.13 mostra-se uma representação gráfica de um ensaio de tracção paralela às fibras do pinho bravo com uma densidade relativamente baixa (0,47) e textura fraca (27%), mostrando-se na Figura 4.14 a imagem deste mesmo provete após ruptura.

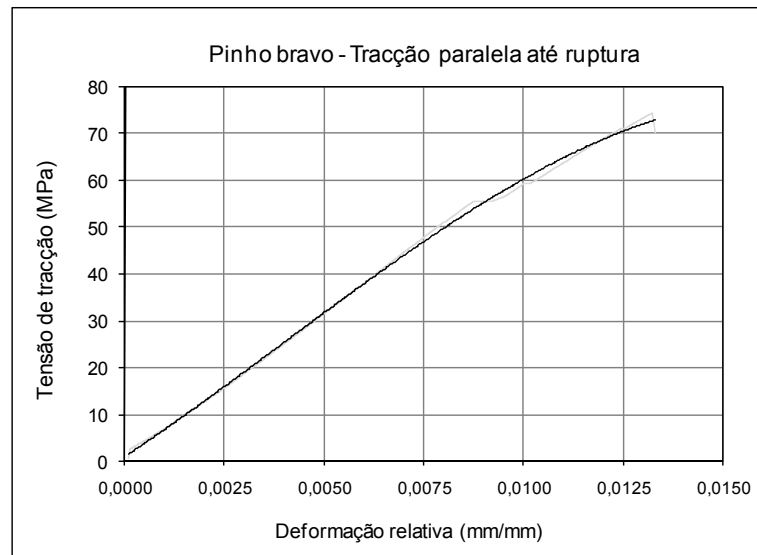


Figura 4.13 – Gráfico da tracção paralela do pinho bravo ($\gamma = 470 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Pin3 2004-07-07).



Figura 4.14 – Exemplo de ruptura por tracção paralela do pinho bravo ($\gamma = 470 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Pin3 2004-07-07).

O módulo de elasticidade à tracção paralela foi obtido pela determinação do coeficiente angular da zona proporcional na representação gráfica da tracção, com a tensão de tracção paralela em ordenadas, com unidades da tensão em MPa, e com a deformação relativa na zona de secção constante do provetes, em abcissas. Os resultados dos ensaios para determinação das propriedades elásticas do pinho bravo encontram-se resumidos nas Tabelas 4.3, enquanto na Tabela 4.4 se mostra a resistência à tracção paralela.

Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade à tracção paralela, e coeficientes de Poisson para o pinho bravo.

	E (MPa)	C. Poisson ν_{LT}	C. Poisson ν_{LR}	Densidade média
Textura acima de 30%	15700	0,56	0,35	0,60
Textura abaixo de 30%	13200	0,66	0,46	0,46

Tabela 4.4 – Ensaios até ruptura à tracção paralela do pinho bravo (valores médios dos ensaios realizados).

	Tensão de Ruptura (MPa)	Extensão máxima (mm/mm)
Textura acima de 30%	115	0,016
Textura abaixo de 30%	82	0,018

Na Figura 4.15 a ruptura por tracção sobre o provete de pinho bravo, deu-se em grande parte por separação de camadas coincidentes com a camada de madeira menos densa, ou seja, corte paralelo na camada de lenho inicial.



Figura 4.15 – Exemplos das formas de ruptura no ensaio de tracção paralela do pinho bravo, essencialmente por corte paralelo nas camadas de lenho inicial.

4.2.3 Resultados da tracção paralela do eucalipto

Para os ensaios de eucalipto todas os procedimentos foram semelhantes as seguidos para o pinho bravo, com excepção da área da secção central do provete, que tal como referido anteriormente, teve de ser reduzida para a dimensão indicada na Figura 4.8, para que a ruptura se desse nesta zona, onde se encontravam montados os dispositivos de medição da deformação.

À semelhança do que foi feito para o pinho bravo, dividiu-se a conjunto das amostras de eucalipto para ensaio de tracção paralela, em dois grupos, um deles correspondendo a valores mais baixos e outro aos valores mais elevados de densidade, respectivamente. Na Figura 4.16 mostra-se o desenho coloração e ritmo de crescimento do conjunto com maior densidade, enquanto na Figura 4.17 se mostra o aspecto dos topos dos provetes do conjunto de menor densidade. Neste último grupo é reconhecida uma coloração mais esbranquiçada e larguras das camadas de crescimento mais elevadas.



Figura 4.16 – Topos representativos das amostras de eucalipto de maior densidade, utilizado para ensaios de tracção paralela.



Figura 4.17 – Topos representativos das amostras de eucalipto de menor densidade, utilizado para ensaios de tracção paralela

A fotografia correspondente a alguns exemplos da forma de falha por ruptura e outras ocorrências anormais, para a madeira de eucalipto é mostrada na Figuras 4.18.



Figura 4.18 – Formas de cedência por corte paralelo entre as camadas de crescimento, por descolamento da ligação entre a madeira e o tubo metálico auxiliar, e ainda ruptura por tracção das fibras.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 mostram-se dois exemplos da representação gráfica da evolução do ensaio de tracção paralela às fibras, até ruptura, para dois exemplares de madeira de eucalipto com diferentes densidades.

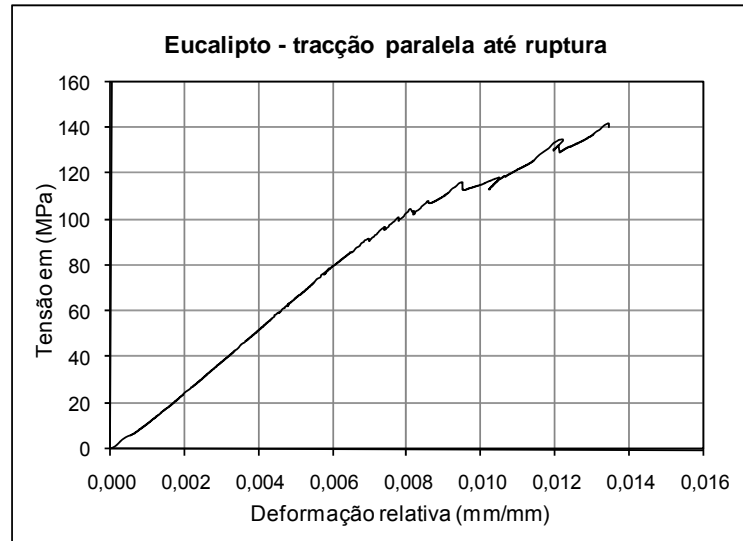


Figura 4.19 – Gráfico da tracção paralela do eucalipto de média densidade ($\gamma = 710 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Euc.17)

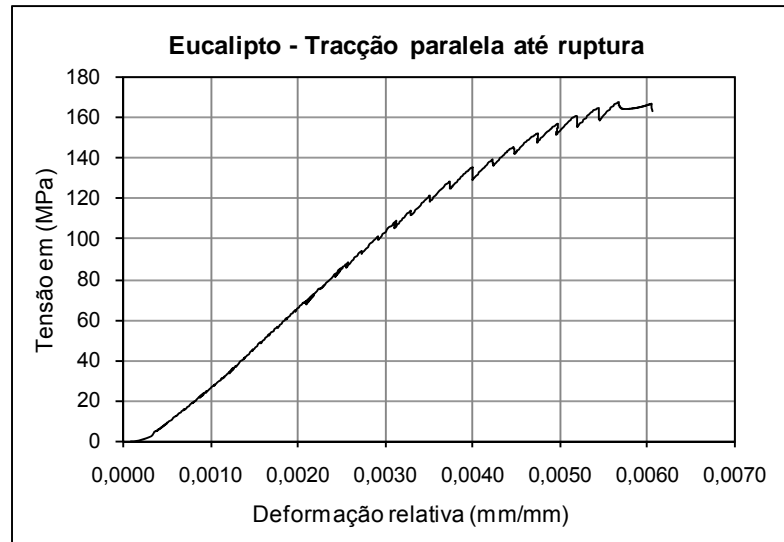


Figura 4.20 – Gráfico da tracção paralela do eucalipto de alta densidade ($\gamma = 960 \text{ kg/m}^3$). (Ref. Euc. 8).

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 resumem-se os resultados de 22 ensaios com provetes de madeira de eucalipto de proveniência conhecida, Vila Nova de Paiva, e seca com as melhores práticas, como sejam, sem desenvolvimento de fendas superficiais durante as primeiras fases de secagem, sem presença de nós nem medula. As árvores de onde foram retirados os provetes tinham idades calculadas de 30 a 35 anos e os diâmetros médios D.A.P. entre 300 e 550 mm.

Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade à tracção paralela, e coeficientes de Poisson para o eucalipto.

	E (MPa)	C. Poisson ν_{LT}	C. Poisson ν_{LR}	Densidade média
Massa volúmica média acima de 800 kg/m³ (desvio padrão)	26 750 (4 400)	0,56	(*)	> 0,800
Massa volúmica média abaixo de 800 kg/m³ (desvio padrão)	18 200 (4 100)	0,66	(*)	< 0,800

(*) Nota: Valores não considerados por falta de um perfeito alinhamento com a direcção radial.

Tabela 4.6 – Ensaio de eucalipto até ruptura por tracção paralela.

	Tensão de Ruptura (MPa)	Extensão máxima (mm/mm)
Massa volúmica média acima de 800 kg/m³ (desvio padrão)	198 (44)	0,055
Massa volúmica média abaixo de 800 kg/m³ (desvio padrão)	155 (32)	0,015

Registou-se uma marcada diferença de resistência e rigidez à tracção paralela às fibras, em função da densidade da madeira de eucalipto, mas a densidade por sua vez, depende fortemente da distância à medula, ou seja, ao centro geométrico das camadas de crescimento, tal com também constatado no estudo do módulo de elasticidade em flexão, onde se apresentam resultados que evidenciam esta constatação.

Na Figura 4.21 mostra-se a forma de ruptura mais habitual nos provetes de eucalipto do grupo de menor densidade, onde se nota uma zona de fractura mais localizada (fractura frágil), comparativamente ao aspecto mais habitual da zona de fractura do grupo de provetes de mais elevada densidade, Figura 4.23, (fractura fibrosa).



Figura 4.21- Ruptura frágil do eucalipto de menor densidade, no ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (11)).

Como regra geral a madeira do lenho juvenil, envolvendo a medula, tem menor densidade e conseqüentemente piores características mecânicas. Este comportamento pode ser previsto com elevado grau de acerto pela simples observação do desenho das camadas de crescimento numa secção transversal, tal como exemplificado na Figura 4.22. Nesta caso tanto as camadas de crescimento são muito largas, como a sua curvatura é bem reveladora da posição de origem do provete quase no centro da árvore.



Figura 4.22 – Imagem da característica do lenho de menor densidade, correspondente ao ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (11)).

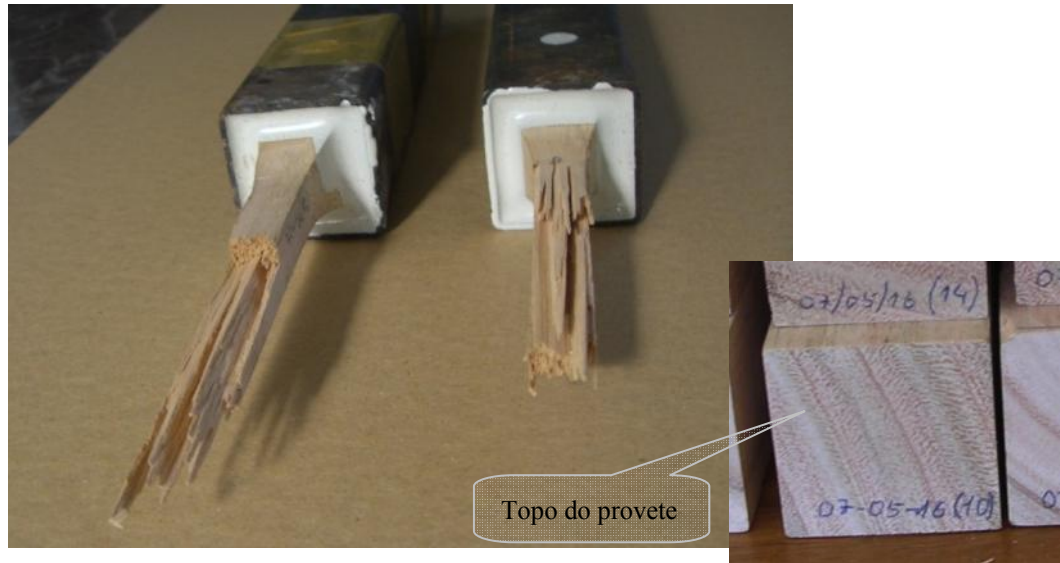


Figura 4.23 – Ruptura fibrosa do eucalipto de maior densidade, no ensaio de tracção paralela às fibras (Ref. 07.05.16 (10)).

4.2.4 Coeficientes de Poisson na tracção paralela

Durante os ensaios de tracção paralela, e para os provetes que revelavam uma geometria perfeitamente alinhada com as faces laterais, de modo a definir-se claramente uma direcção radial e uma direcção tangencial, foram colocados extensómetros alinhados com aquelas direcções, o que permitiu encontrar os coeficientes de Poisson aparentes da madeira, Figuras 4.24 a 4.27.

A elevada precisão das medições e as particularidades próprias de cada exemplar tornaria inviável a representação gráfica e sua interpretação se se construíssem os gráficos com as médias de diferentes ensaios. Assim mostram-se gráficos de ensaios individuais, tendo-se optado por apresentar apenas alguns casos mais representativos, como são os exemplos relativos a dois grupos de massa volúmica: massa volúmica mais elevada (com valores médios de 960 kg/m^3); e massa volúmica média (valores médios de 693 kg/m^3), Figuras 4.24 e 4.25 para o primeiro grupo e Figuras 4.26 e 4.27 para o segundo grupo.

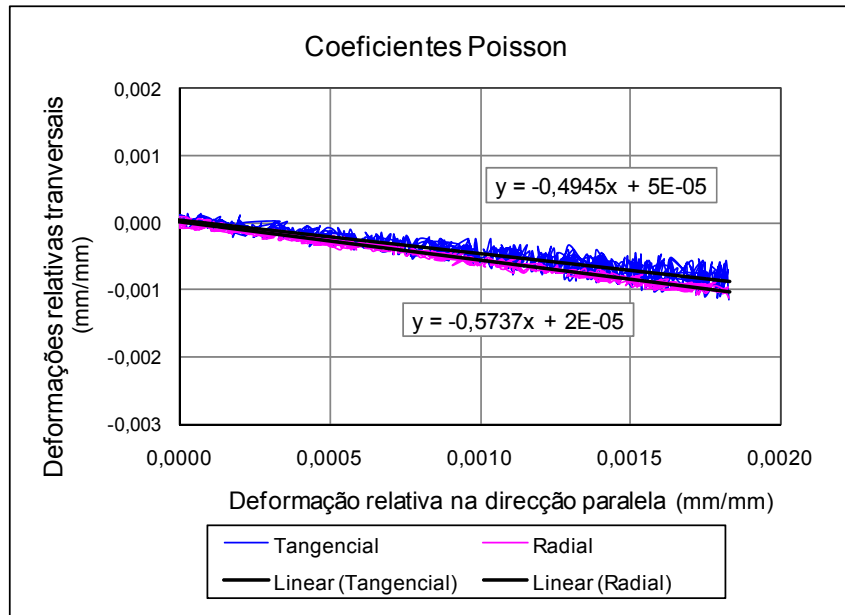


Figura 4.24 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade elevada, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07.05.16-euc01).

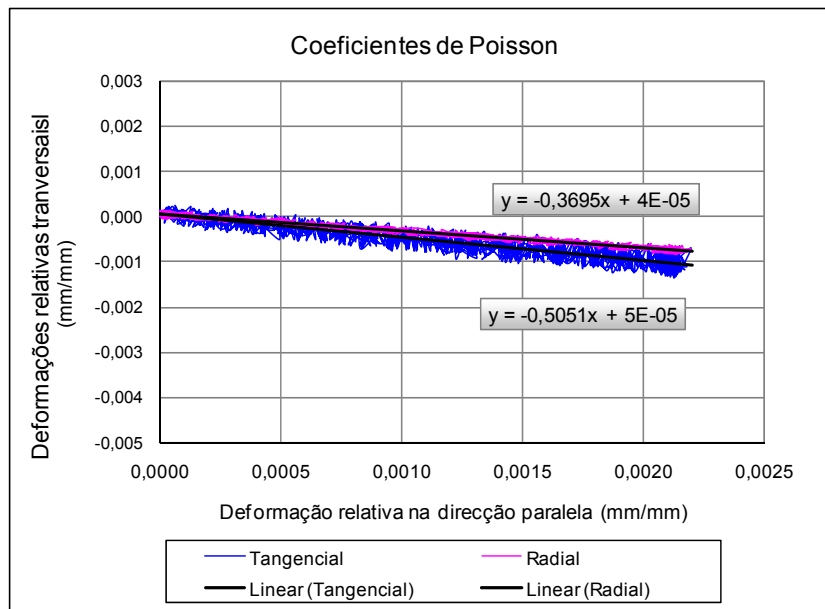


Figura 4.25 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade elevada, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc06).

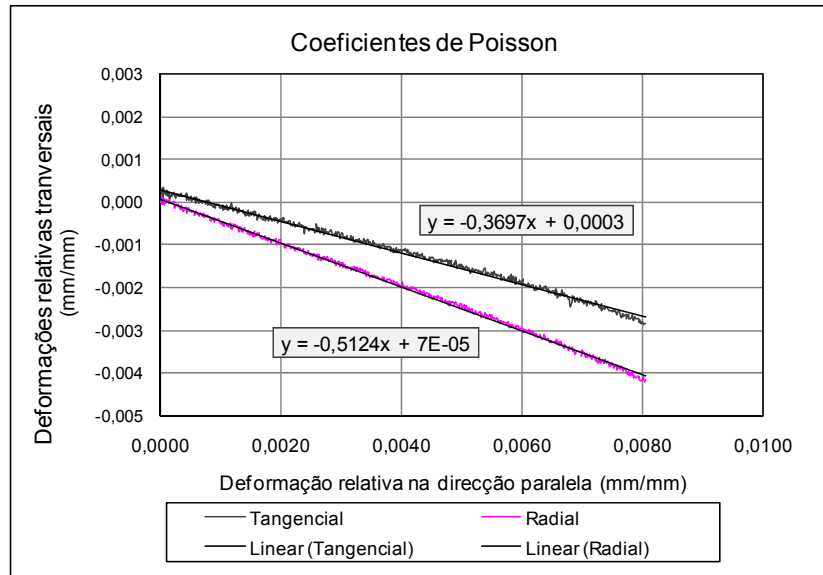


Figura 4.26 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade média, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc11).

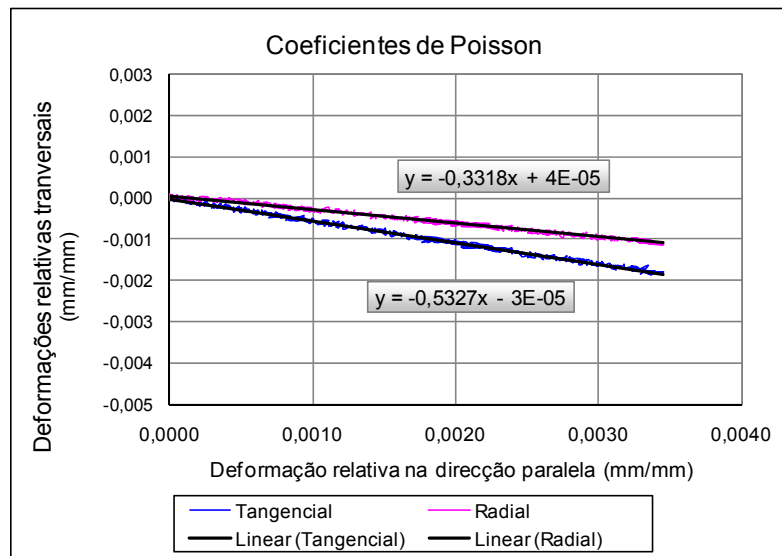


Figura 4.27 - Coeficiente de Poisson de uma amostra de eucalipto de densidade média, medido no ensaio de tracção paralela (Ref. 07-05-16 euc17).

As representações gráficas confirmam a teoria geral da mecânica dos materiais, em que, a uma tracção numa direcção corresponde uma gradual diminuição das dimensões transversais, constando-se que para o eucalipto não há uma nítida predominância de maior ou menor deformação relativa da direcção tangencial relativamente à direcção radial, nem vice-versa.

Na Tabela 4.7 avaliam-se em conjunto os resultados dos diferentes ensaios de tracção paralela às fibras no que se refere à obtenção dos coeficientes de Poisson, depois do seu

tratamento estatístico. A variabilidade foi considerável, o que não permite dizer com segurança que haja uma tendência para os valores correspondentes à direcção tangencial se diferenciem dos correspondentes à direcção radial.

Tabela 4.7 – Coeficiente de Poisson na tracção paralela do eucalipto. Média e valores limites (ensaios ref. 03.12.30).

Eucalipto	Coeficiente Poisson (tracção paralela)	
	V _{LT}	V _{LR}
Média	0,43	0,47
Máx.	0,53	0,57
Min.	0,26	0,33
Desv. Padr.	0,11	0,11
CV	26,3	23,4

4.3 Compressão paralela às fibras

Para o estudo desta característica da madeira foi seguido o procedimento de ensaio definido na norma europeia EN 408:2003. Os provetes foram cortados com uma secção de 32 x 32 mm² e um comprimento de 192 mm (seis vezes a menor lado da secção). Foram aplicados sobre a madeira sensores de deslocamento de elevada precisão (0,0001 mm), um na direcção paralela às fibras e dois em direcções transversais, tangencial e radial respectivamente. Foi registada a distância entre pontas dos sensores para determinar as deformações relativas que permitem determinar as características elásticas.

Quanto à velocidade de aplicação da carga de compressão, a norma de referência EN 408 define, para os ensaios de determinação do módulo de elasticidade, uma velocidade constante não superior a $0,00005 \times l$ mm/s, onde l é o comprimento do provete, mas também dá indicação de que a ruptura deve ser atingida entre 300 ± 120 s. Tendo em conta a conveniência de o mesmo ensaio permitir determinar as características elásticas e a resistência máxima, foi seguido um procedimento para compatibilizar estas duas recomendações. Como a máquina de ensaio regula a velocidade em relação à taxa de aumento da aplicação da carga, foram realizados ensaios preliminares para encontrar os valores esperados de deformação total e carga máxima. Estes ensaios permitiram estabelecer a velocidade de deslocação do aplicador de carga num valor de 0,35 kN/s, o que permitiu o cumprimento simultâneo dos dois critérios dentro das suas gamas de tolerância. A duração total de cada ensaio foi de cerca de 3 minutos, sendo os limites recomendados entre 1,73 e 4 minutos. O estabelecimento de uma velocidade de aplicação da

carga padrão tem como objectivo reduzir os efeitos de fluência (que se tornaria significativa se a aplicação da carga fosse demasiado lenta) ou a influência da energia de impacto (se a aplicação da carga fosse demasiado rápida). A precisão da carga foi de 0,01 kN, tendo em conta a célula de carga utilizada, valor dentro do intervalo estabelecido na norma EN 408 que é de 1% da carga quando se avalia a carga máxima e de 0,1 % da carga máxima quando se usam valores menores do que 10% da carga máxima.

A característica definida como resistência da madeira à compressão paralela às fibras, que também pode ser designada como a tensão máxima ou tensão de ruptura à compressão paralela, é dada pela expressão

$$f_{c,0} = \frac{F_{m\acute{a}x.}}{A} \quad (4.1)$$

em que $F_{m\acute{a}x.}$ é a carga máxima obtida na compressão e A a área inicial da secção transversal.

4.3.1 Resultados da compressão paralela do pinho bravo

Os ensaios de 20 provetes de pinho bravo sem defeitos e com massa volúmica entre 550 kg/m³ e 680 kg/m³ foram realizados segundo o procedimento definido na norma EN 408 e os resultados encontrados resumem-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resumo geral de dos ensaios de compressão paralela do pinho bravo.

	Tensão de ruptura	Unidades
Média	58,8	(MPa)
Máximo	71,5	(MPa)
Mínimo	42,9	(MPa)
Desv.padrão	8,7	(MPa)
CV	14,7	%
5º percentil inferior	45,5	(MPa)

Relativamente ao módulo de elasticidade à compressão paralela do pinho bravo, não foram realizados ensaios em número suficiente para se fazer um tratamento estatístico, pelo que se mostra na Figura 4.28 uma representação gráfica da relação tensão-deformação dentro da zona proporcional, correspondendo a dois valores representativos da variação da massa volúmica. O módulo de elasticidade foi encontrado através da equação da linha recta da linha de tendência.

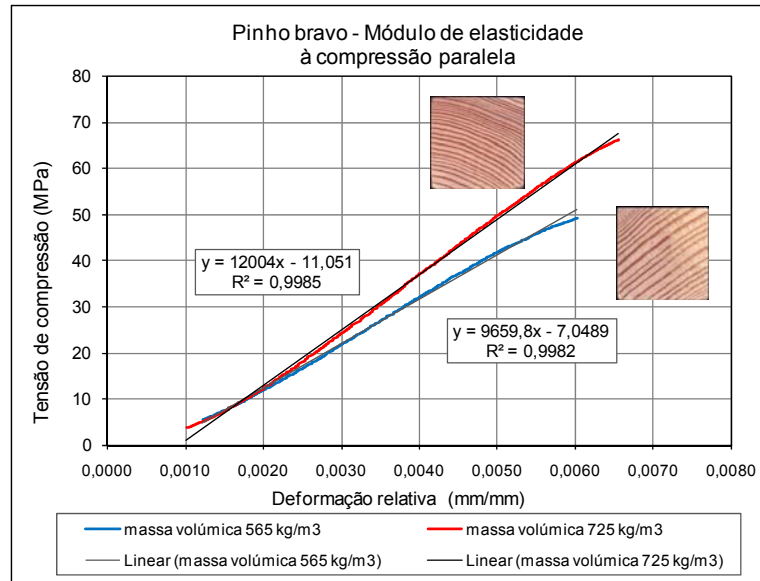


Figura 4.28 – Determinação gráfico do módulo de elasticidade à compressão paralela do pinho bravo.

4.3.2 Resultados da compressão paralela do eucalipto

Na Figura 4.29 mostra-se uma representação gráfica do resultado do ensaio de compressão paralela às fibras, de madeira de eucalipto de boa qualidade, sem fendas ou outros defeitos de secagem como tensões internas, fora da zona de lenho juvenil e pertencente ao lote de massa volúmica média entre 720 e 820 kg/m³ a 12 % de teor em água. Este gráfico representa as tensões aplicadas num ensaio até ruptura e a respectiva deformação na direcção paralela às fibras, correspondendo a um dos valores de tensão máxima mais elevados de todo o lote de provetes ensaiados.

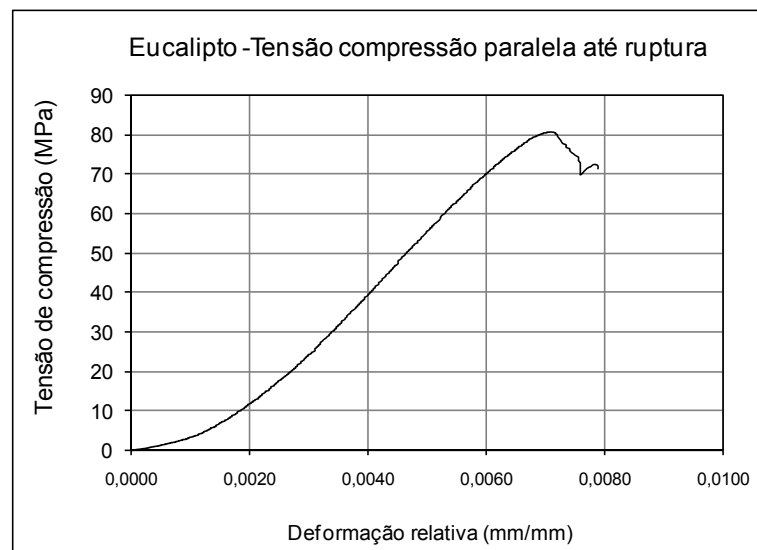


Figura 4.29 – Gráfico da compressão paralela do eucalipto (Ref. ECPI-R).

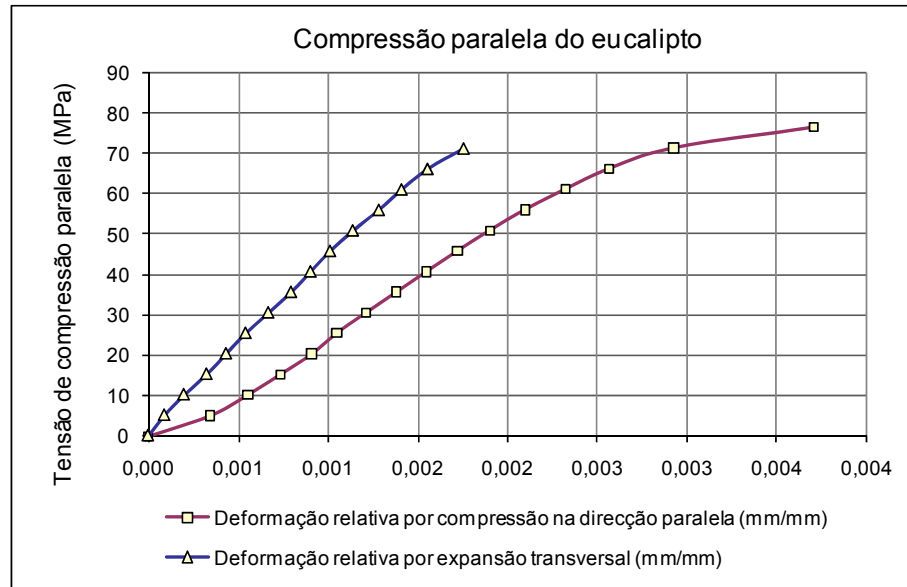


Figura 4.30 – Gráfico da compressão paralela do eucalipto. Exemplo das deformações axial e transversal.

No gráfico representado na Figura 4.30 mostra-se o resultado do ensaio de outro provete de eucalipto, mas além da curva de deformação na direcção de aplicação da carga, mostra-se também a curva de expansão lateral na direcção transversal. A relação entre estes dois valores de deformação relativa, para um mesmo valor de tensão, corresponde ao coeficiente de Poisson na compressão paralela. O gráfico da Figura 4.31 representa a relação entre as deformações relativas para encontrar o valor estabilizado do coeficiente de Poisson, em função da aplicação da tensão de compressão. Em todo o conjunto de ensaios o valor médio foi de 0,58, um pouco mais elevado do que os valores encontrados também para o coeficiente de Poisson, mas como resultado de ensaios de tracção paralela.

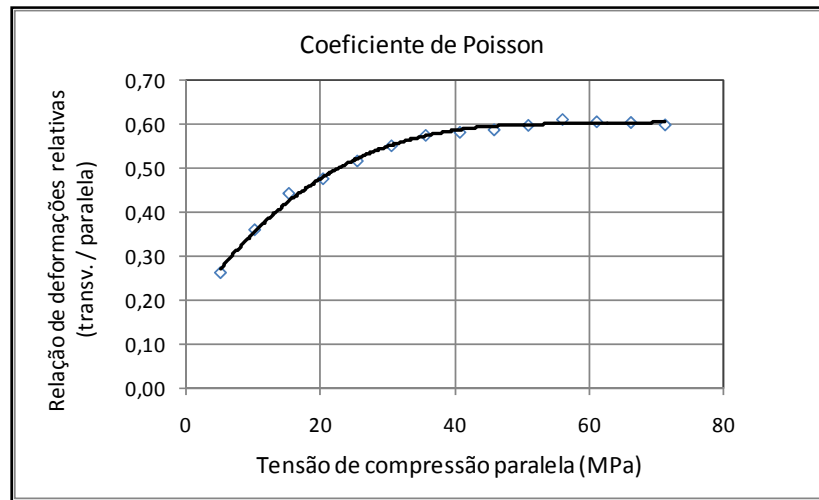


Figura 4.31 – Relação das deformações transversal e axial ao longo da compressão.

Quanto ao módulo de elasticidade à compressão paralela, é definido na norma de referência EN 408 como,

$$E_{c,0} = \frac{l_1 \cdot (F_2 - F_1)}{A \cdot (w_2 - w_1)} \quad (4.2)$$

em que l_1 é o comprimento de referência depois de aplicada uma força inicial F_1 , e w_1 e w_2 são as deformações correspondentes aos valores de carga F_1 e F_2 respectivamente. Teoricamente os pontos de referência 1 e 2 corresponderiam aos limites de uma região recta do gráfico de carga deformação ou do gráfico de tensão deformação relativa, mas na realidade a deformação da madeira em compressão tem um comportamento típico semelhante aos mostrados nas Figuras 4.28 e 4.29, ou seja, regista-se uma zona inicial com uma ligeira curvatura com a concavidade voltada para cima, seguida por uma zona não perfeitamente recta e no final acentua-se uma curva com a concavidade voltada para baixo. Assim, torna-se difícil definir com rigor os pontos 1 e 2. Para cálculo tomaram-se como valores de referência para a zona de deformação proporcional as tensões a cerca de 10 % e a 40% da carga máxima, respectivamente. Este critério, que tem de ser verificado graficamente caso a caso, é também o utilizado em várias normas de caracterização de materiais derivados da madeira.

Para apresentação dos resultados do módulo de elasticidade optou-se, em alternativa ao definido nas normas, por se utilizar a representação gráfica na zona proporcional, calculando-se por meios informáticos, o coeficiente angular da linha recta de tendência. Esta forma afigura-se mais prática de realização e até mais representativa do comportamento real médio.

Nas Figuras 4.32 e 4.33 mostra-se (nos próprios provetes) os resultados das tensões máximas obtidas nos ensaios de compressão paralela da madeira de eucalipto para um conjunto de provetes retirados de uma mesma prancha, sendo os que têm a mesma letra, sequências longitudinais colocados à mesma distância da medula. Os provetes A correspondem à zona do borne exterior e os provetes B e C à zona interior, perto da zona de lenho juvenil. Os provetes das zonas A, B e C são as de menor massa volúmica, média de 738 kg/m^3 , enquanto os da letra D são do meio do cerne, com massa volúmica média de 800 kg/m^3 e cujos resultados se apresentam na Figura 4.33.



Figura 4.32 – Valores de tensão máxima à compressão paralela do eucalipto, provetes de zonas diferentes de uma mesma prancha.



Figura 4.33 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela do eucalipto, provetes de duas zonas diferentes de uma mesma prancha.

Na Figura 4.34 mostra-se a representação gráfica do ensaio de compressão paralela às fibras, correspondente a um dos provetes referenciados anteriormente (proвете A1, Figura 4.32), enquanto na Figura 4.35 está representada a zona proporcional do mesmo provete, com o objectivo de encontrar o valor do módulo de elasticidade à compressão paralela.

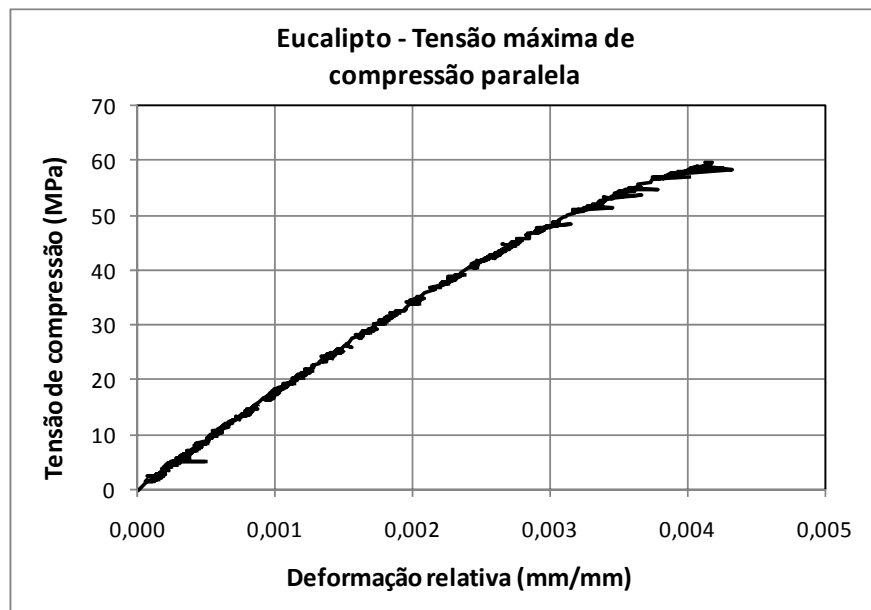


Figura 4.34 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais baixa massa volúmica (Ref. 07.11.19-A1).

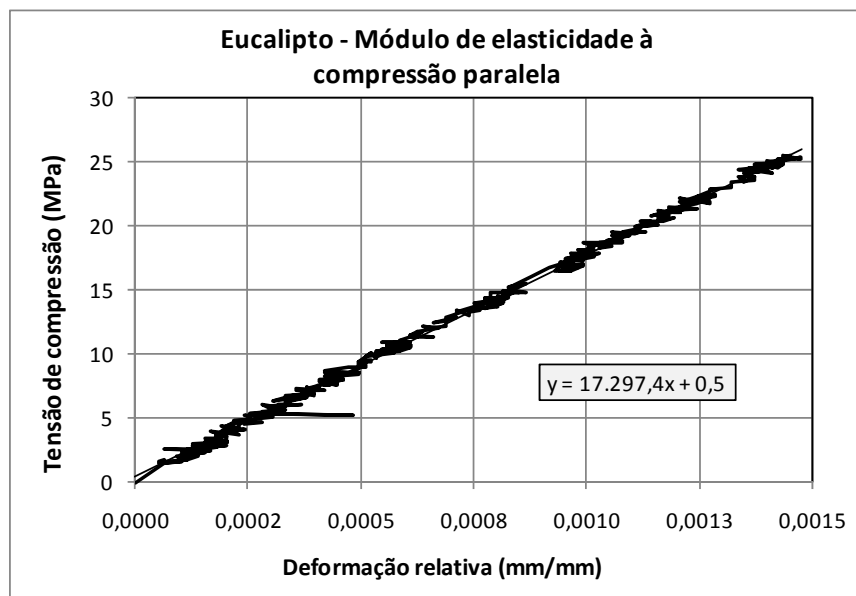


Figura 4.35 – Valor do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de menor massa volúmica (Ref. 07.11.19-A1).

À semelhança da forma de abordagem dos resultados seguida anteriormente, faz-se na Figura 4.36 a representação do ensaio de compressão paralela até ruptura de uma amostra do lote de mais elevada densidade, e na Figura 4.37, a representação deste mesmo ensaio apenas na zona proporcional, de modo a permitir obter graficamente o valor do respectivo módulo de elasticidade.

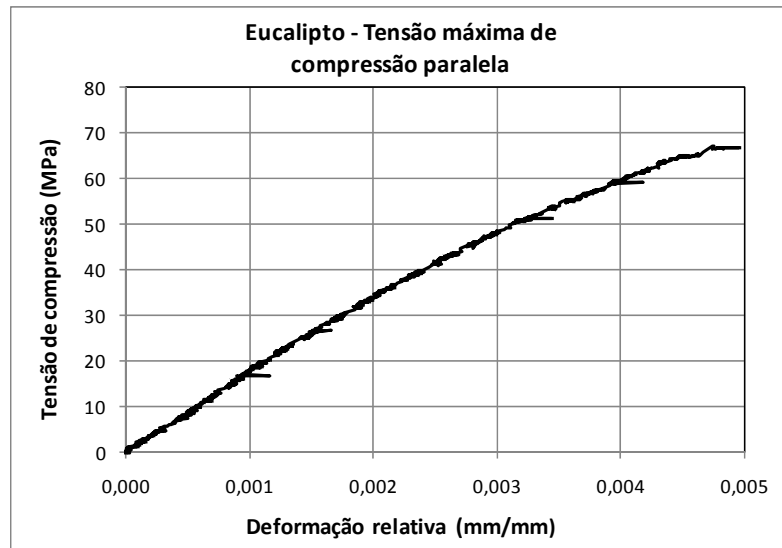


Figura 4.36 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D1).

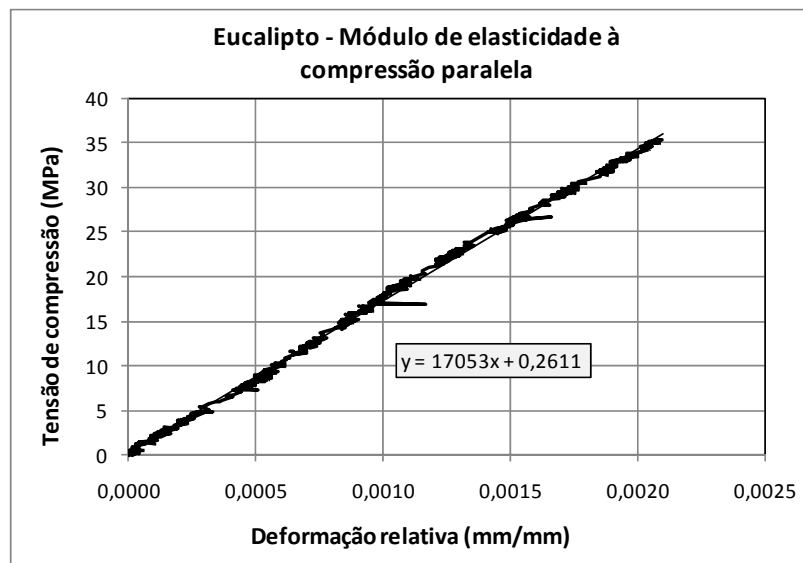


Figura 4.37 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo de um dos provetes representativo do lote de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D1).

Ainda seguindo a forma de apresentação seguida nos dois exemplos anteriores, representa-se na Figura 4.38 a curva de deformação à compressão paralela de um dos provetes de eucalipto mais elevada resistência de todo o lote, cerca de 800 kg/m³ (imagem do topo representada na Figura 4.33).

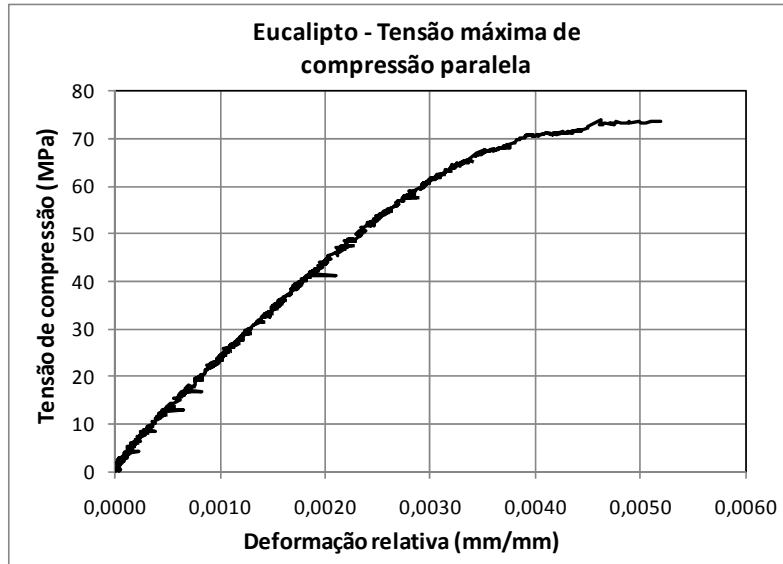


Figura 4.38 – Valores de tensão máxima à compressão paralela, exemplo do provetes representativo dos de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D2).

Na Figura 4.39 mostra-se a representação gráfica para determinação do módulo de elasticidade deste mesmo provete, que foi um dos mais elevados de todo o lote.

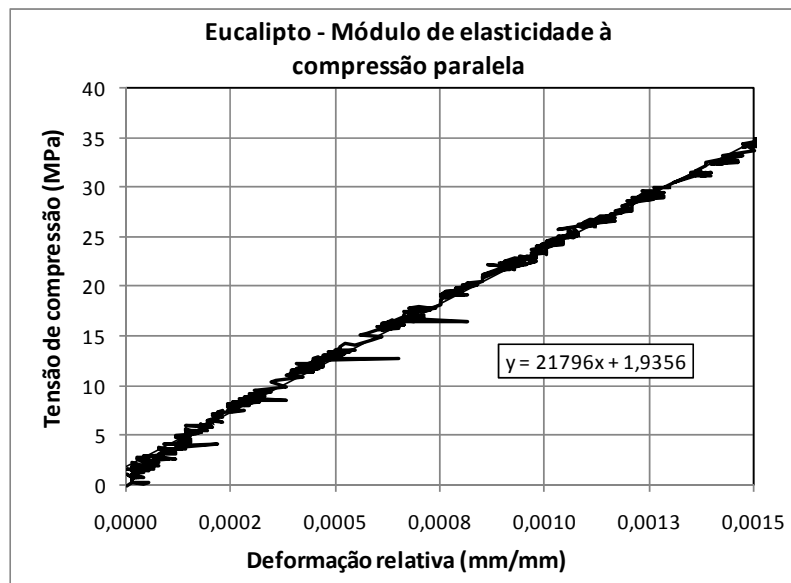


Figura 4.39 – Valores do módulo de elasticidade à compressão paralela, exemplo do provete representativo dos de mais elevada massa volúmica (Ref. 07.11.19-D2).

Na Tabela 4.9 mostra-se um resumo dos resultados do eucalipto, agrupados em dois conjuntos de diferentes valores de massa volúmica, onde se constata e confirma a correlação entre um valor mais elevado da massa volúmica e valores mais elevados de resistência.

Tabela 4.9 – Resumo dos resultados de uma série de ensaios compressão paralela de eucalipto, organizado por dois conjuntos de diferentes densidades.

Massa volúmica correspondente 12 % ± 2 %		Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade à compressão paralela (MPa)
≤ 750 kg/m ³	Média	66,1	14 800
	Desv. padrão	5,5	3 300
> 750 kg/m ³	Média	72,7	19 500
	Desv. padrão	4,4	4 800

O resumo total dos resultados dos ensaios de compressão paralela realizados em 30 provetes sem defeitos mas de todas as localizações de distância radial ao centro do toro, de um toro representativo de qualidade média de madeira de eucalipto, é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resumo geral de todos os ensaios de compressão paralela do eucalipto. Média e valores limites da tensão de tracção.

	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade à compressão paralela (MPa)
Média	65,3	16 7000
Máximo	77,4	22 100
Mínimo	46,3	14 049
Desv.padrão	7.0	2 662
CV	10,7	15,9
5º percentil inferior	57,9	14 270

No sentido de verificar a influência do tempo de duração do ensaio e a correspondente histerese na repetição de dois ciclos repetidos de compressão do mesmo provete, ao fim de 1 minuto, foram efectuados alguns ensaios com uma carga até cerca de 30 % da tensão previsível de cedência. Um exemplo representativo do resultado é o que se apresenta na Figura 4.40, onde se confirma a perfeita coincidência dos trajectos num mesmo sentido, quer no sentido da

aplicação de carga, quer no sentido do alívio de carga, mas uma nítida diferença entre os trajectos de aplicação e de alívio de carga, o que configura a presença do efeito de histerese.

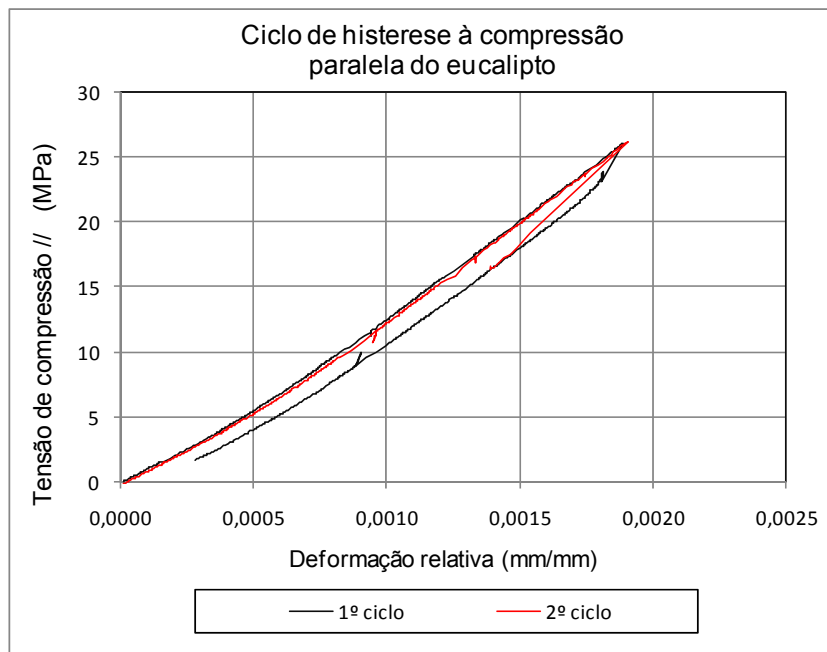


Figura 4.40 – Ensaio repetido de compressão paralela do eucalipto (dois ciclos completos até uma tensão de cerca de 30 % da de cedência esperada). (Ref. 07.11.19-C2).

A ruptura por compressão assume um padrão sempre constante, caracterizado por um enrugamento das fibras sobre si mesmo e a maioria das vezes num plano ligeiramente inclinado relativamente ao dos topos de aplicação da compressão, tal como mostrado na Figura 4.41.



Figura 4.41 – Padrão típico da zona de ruptura por compressão paralela.

4.4 Tracção transversal

O ensaio de tracção transversal em madeira é um ensaio difícil de realizar, não pela resistência da madeira, que apresenta uma coesão interna fraca neste tipo de esforço, mas pela dificuldade em transmitir as forças da máquina de ensaios para uma zona determinada do provete, onde são feitas as medições rigorosa das dimensões da secção e são medidas as deformações, tanto na direcção de carregamento como nas direcções perpendiculares.

Como referido no capítulo da revisão bibliográfica, existem normas que superam as dificuldades anteriormente referidas através de engenhosos cortes do provete, com saliências nas zonas de amarração, que permitem uma ligação por simples encaixe a acessórios metálicos auxiliares.

Para o presente estudo experimental optou-se por seguir o procedimento da norma europeia EN 408, baseado na colagem do provete em ensaio a dois acessórios metálicos em duas faces opostas. Apesar da simplicidade, não perde rigor, antes pelo contrário, pois ao deixar livre a escolha da dimensão do provete permite montagens que facilitam as medições das deformações relativas (unitárias) no sentido da tracção e no sentido perpendicular, ao contrário das normas portuguesa, americana e inglesa, que não prevêm tal procedimento. Uma das dificuldades que é necessário superar na preparação deste ensaio, é a demora da colagem, secagem e estabilização da ligação e ainda o alinhamento e centragem do provete de madeira com os dois acessórios metálicos para amarração à máquina de ensaio, tanto mais que acontece uma fortíssima tendência para o deslizamento por efeito lubrificante da cola líquida (efeito sabonete). A questão foi solucionada com um dispositivo auxiliar de colagem, tipo molde, usado na fase de encosto das peças, não permitindo movimentos laterais. A cola utilizada foi uma formulação de cola epoxídica de dois componentes e secagem rápida.

Numa primeira série de ensaios pretendeu-se encontrar as tensões de ruptura à tracção transversal, tendo em conta a direcção do plano resistente a o tipo de lenho em presença. Para melhor clarificação quanto à terminologia aplicada explica-se na Figura 4.42 o que designa como tracção transversal radial e como tracção transversal tangencial.

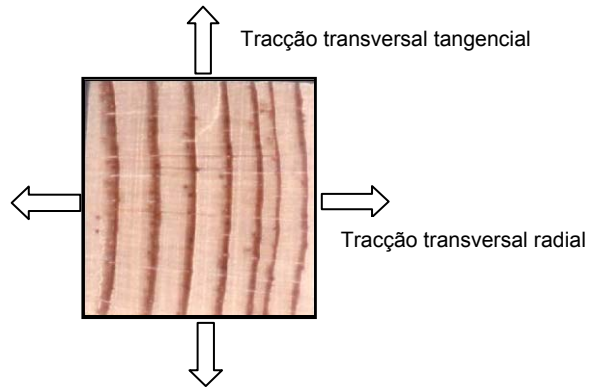


Figura 4.42 – Terminologia utilizada nos ensaios de tracção transversal.

Na figura 4.43 mostra-se um exemplo representativo da ruptura numa amostra de pinho bravo retirada da zona central junto à medula, portanto com predominância para presença de lenho juvenil, enquanto na Figura 4.44 se mostra a forma da superfície de ruptura numa amostra de lenho adulto, com a tensão de tracção numa direcção próxima da direcção radial.



Figura 4.43 - Ensaio de ruptura na direcção transversal radial.

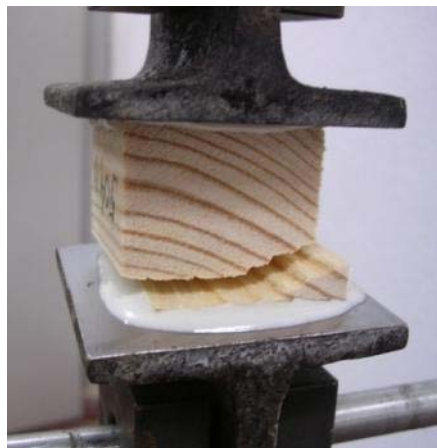


Figura 4.44 - Ensaio de ruptura na direcção transversal próxima da radial.

Os resultados dos ensaios de pinho bravo até ruptura na tracção transversal, com provetes curtos e com as camadas de crescimento orientadas nas principais direcções transversais, são apresentados na Tabelas 4.11 e Tabela 4.12. Na Tabela 4.13 apresenta-se o resultado de ensaio em lenho juvenil, que não diferindo muito no valor médio em relação aos outros ensaios, tem no entanto cerca de três vezes maior dispersão, como confirmado pelo desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4.11 - Tracção transversal do pinho bravo, na direcção radial em lenho adulto. Média e valores limites da tensão de tracção.

Média	5,1	MPa
Máximo	5,7	MPa
Mínimo	3,9	MPa
Desv.padrão	0,59	MPa
CV	11,6	%
5º percentil inferior	4,2	MPa

Tabela 4.12 - Tracção transversal do pinho bravo, na direcção tangencial em lenho adulto. Média e valores limites da tensão de tracção.

Média	4,4	MPa
Máximo	4,7	MPa
Mínimo	4,0	MPa
Desv. padrão	0,33	MPa
CV	7,5	%
5º percentil inferior	4,0	MPa

Tabela 4.13 - Tracção transversal do pinho bravo, lenho juvenil, com camadas de crescimento em direcção inclinada. Média e valores limites da tensão de tracção.

Média	4,3	MPa
Máximo	5,2	MPa
Mínimo	2,5	MPa
Desv.padrão	1,1	MPa
CV	25,5	%
5º percentil inferior	2,7	MPa

Como referido anteriormente, quando se pretende determinar as propriedades elásticas, nomeadamente o módulo de elasticidade e os coeficientes de Poisson nas direcções que correspondem ao ensaio de tracção transversal, o provete tem uma altura suficiente para aplicação dos extensómetros e diferentes direcções (axial e transversal), Figura 4.45. Neste ensaio, para determinação das propriedades na direcção radial, o provete inclui inevitavelmente diferentes zonas do lenho, passando pelo lenho juvenil e pela medula.

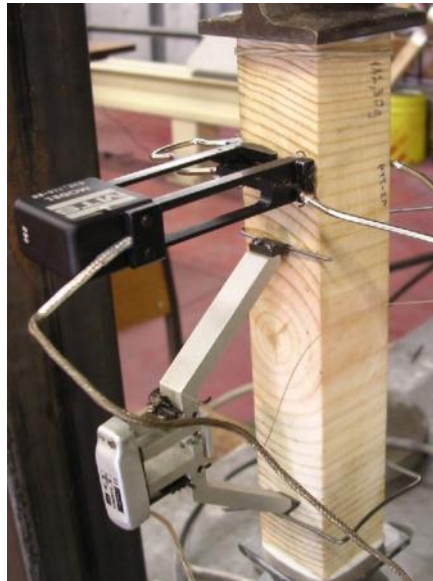


Figura 4.45 - Provette utilizado para determinação das propriedades elásticas e ruptura na tracção transversal.

Relativamente aos ensaios até ruptura dos provetes de geometria e dimensões correspondentes à Figura 4.44, incluindo simultaneamente vários tipos de lenho e diferentes planos de tracção relativamente às camadas de crescimento, os resultados foram invariavelmente de ruptura por uma superfície passando pela medula e lenho juvenil, Figura 4.46, por se tratar de uma zona de material de comprovadamente muito menor resistência, com tensão de ruptura à tracção de cerca de 2,8 MPa.

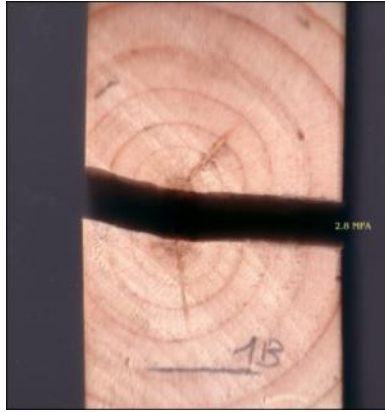


Figura 4.46 – Superfície de ruptura da tracção transversal.

Ainda para os provetes com a configuração de ensaio da Figura 4.45, foram tratados os registos das deformações, tanto na direcção principal de tracção (radial e tangencial das camadas de crescimento), como nas direcções perpendiculares à tracção (transversal e paralela às fibras), com o objectivo de determinar o módulo de elasticidade à tracção transversal às fibras da madeira e estudar as relações com as outras deformações indirectas. As tensões máximas atingidas na ruptura por tracção não provocam deformação mensurável na direcção perpendicular ao ensaio e paralela às fibras, pelo que esta combinação de ensaio não será considerada. Quando ao resultado representativo de um conjunto de ensaios com provetes e montagem semelhante à da Figura 4.45, temos a representação gráfica na Figura 4.47.

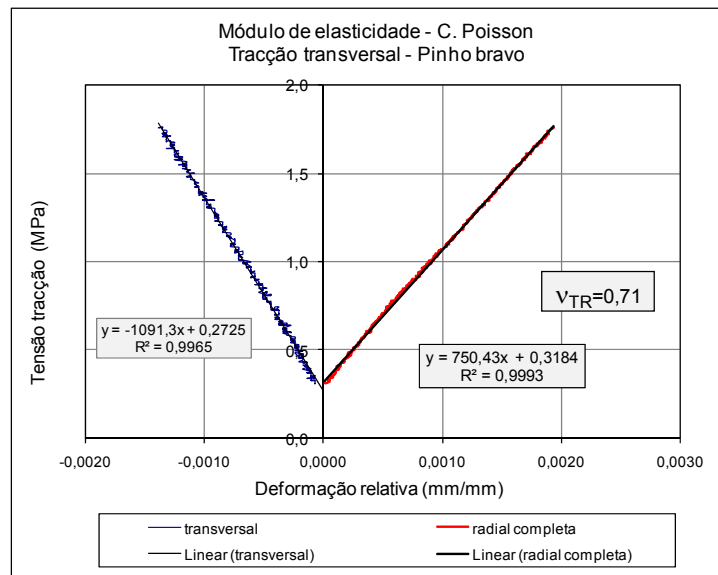


Figura 4.47 – Registo gráfico das deformações relativas na direcção da tracção transversal aplicada e da deformação relativa na outra direcção (ref.05.01.14.PTT-2r).

No ensaio de tracção transversal das fibras da madeira foi colocado um extensómetro na direcção tangencial, tal como representado na Figura 4.45, com o objectivo de obter a relação de diminuição da secção nesta direcção, ou seja o respectivo coeficiente de Poisson, de acordo com a representação da Figura 4.48. O valor obtido neste ensaio foi de 0,71, mas como se pode constatar no gráfico, registou-se uma grande instabilidade dos instrumentos de medição, pelo que se registaram noutros ensaios valores muito dispersos, entre 0,60 e 0,75.

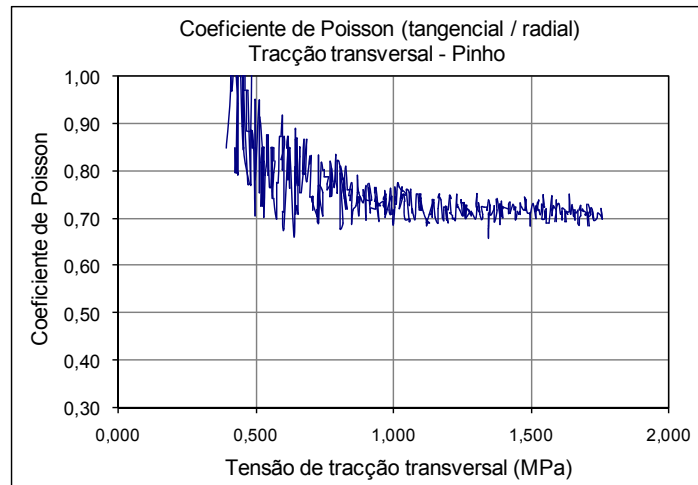


Figura 4.48 – Evolução da relação entre deformações, ao longo do ensaio de tracção transversal (ref.05.01.14.PTT-2r).

A tracção transversal do eucalipto, não revelou, em diferentes conjuntos de provetes, uma clara diferença entre os resultados do plano tangencial e do plano radial, pelo que se optou por fazer uma média e restante tratamento estatístico num único conjunto de dados, com os resultados apresentados na Tabela 4.14, respeitantes a uma amostra de 30 provetes.

Tabela 4.14 - Tracção transversal do eucalipto, em planos indiferenciados. Média e valores limites da tensão de tracção.

Média	9,5	MPa
Máximo	10,9	MPa
Mínimo	6,7	MPa
Desv.padrão	1,68	MPa
CV	19,1	%
5º percentil inferior	6,8	MPa

Tal como os ensaios em pinho bravo, os ensaios de tracção transversal do eucalipto foram realizados colando as amostras de madeira em dois acessórios metálicos com cola epoxídica, mas

nesta madeira registaram-se muitas ocorrências de descolamento entre a madeira e o metal, pelo que, quando se pretendia apenas a tensão de ruptura se optou por recorrer a uma modificação do provete com redução da secção recorrendo a dois furos tocando a superfície lateral, tal como mostrado na Figura 4.49, tentando assim reduzir as concentrações de tensões.

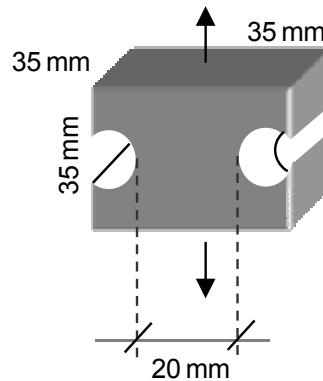


Figura 4.49 - Provete modificado com secção reduzida, para ensaios à ruptura da madeira de eucalipto.

4.5 Corte

O corte na madeira tem várias possibilidades de abordagem, tendo em conta os planos de referência da tensão aplicada, em relação com as direcções das fibras da madeira e dos seus planos de referência. Assim, serão seguidamente analisadas as possibilidades com interesse para a compreensão do comportamento estrutural da madeira, como sejam: o corte paralelo às fibras, Figura 4.50; o corte transversal num plano perpendicular à direcção das fibras, que será daqui em diante apenas designado corte transversal, Figura 4.51; e o corte perpendicular num plano contendo a direcção das fibras, a que se chama corte por enrolamento, Figura 4.52. O corte transversal não é estruturalmente preocupante por não dar origem a falhas, tanto mais pelo facto de ser criado a partir de compressão transversal em que a madeira é particularmente sensível.

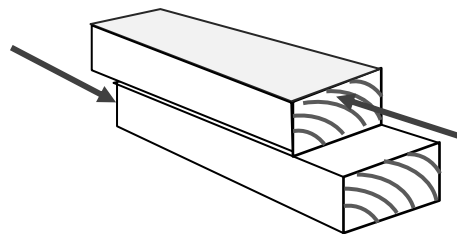


Figura 4.50 – Modelo de aplicação de carga, para o corte paralelo.

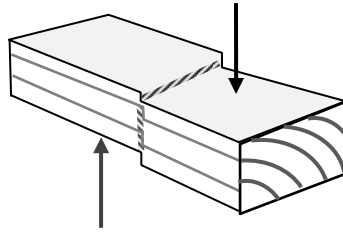


Figura 4.51 – Modelo de aplicação de carga, para o corte transversal.

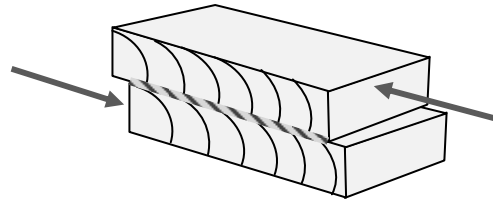


Figura 4.52 – Modelo de aplicação de carga, para o corte por enrolamento.

4.5.1 Corte paralelo

Relativamente a esta propriedade, foram realizados ensaios com as forças actuando na direcção paralela às fibras da madeira, mas não no mesmo alinhamento, provocando a transmissão de esforço através do material num plano também paralelo à direcção das fibras, conforme modelo da Figura 4.50 e explicado no modelo da Figura 4.53.

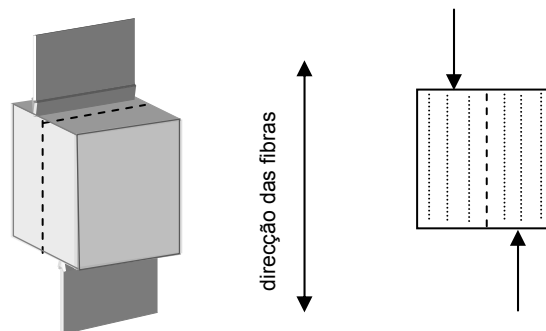


Figura 4.53 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte paralelo.

O procedimento de ensaio foi baseado no equipamento definido na norma ASTM D143, tal como descrito na secção 3.11 do Capítulo III, mas com o provete provido de dois rasgos laterais paralelos, no sentido de concentrar as tensões no plano de corte e diminuir os efeitos perturbadores das tensões de compressão, paralela e transversal.

Na Figura 4.54 mostra-se a geometria e dimensões do provete adaptado, para os ensaios de corte paralelo. As dimensões do provete e a distância a que se encontra o rasgo da face lateral permitem que este ensaio seja efectuado no acessório normalizado para o ensaio de corte paralelo pelas normas ASTM D 143, norma portuguesa NP 623 e outras internacionais.

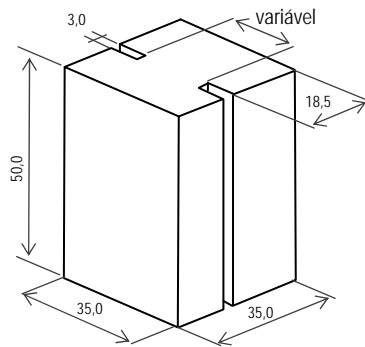


Figura 4.54 – Dimensões do provete com rasgos, para ensaio de corte paralelo.

O procedimento para ensaio de corte paralelo, com base no provete modificado apresentado anteriormente, consistiu numa primeira fase, em realizar ensaios com profundidades dos rasgos laterais cada vez maiores, provocando correspondentes tensões e corte paralelo na secção restante com intensidade crescente para as mesmas forças exteriores aplicadas. Deste modo, as tensões de compressão paralela e de tracção transversal que aparecem associadas resultaram diminuídas. Os resultados de um primeiro conjunto de ensaios foram organizados na forma gráfica, o que permitiu avaliar se as diferentes profundidades dos rasgos influenciavam os valores da tensão de ruptura por corte e quantificar esta influência, ou seja, saber a que ponto o método de ensaio influenciava os próprios resultados obtidos.

Antes de passar ao tratamento gráfico dos resultados, mostra-se o registo por imagens das superfícies de fractura por corte de provetes de pinho bravo, Figuras 4.55, 4.56 e 4.57.

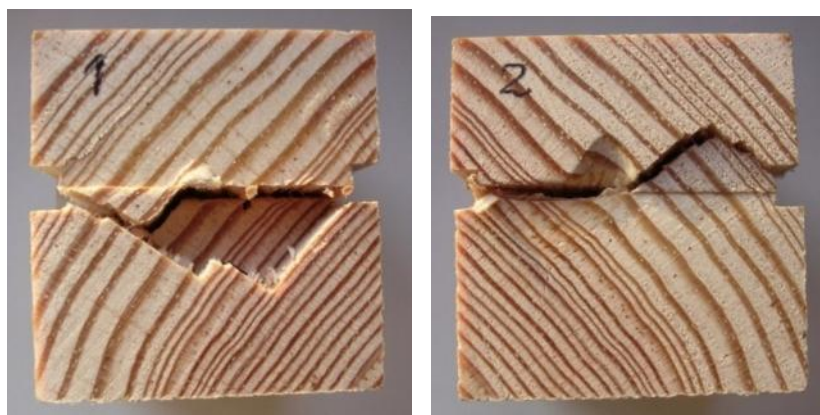


Figura 4.55 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo relativamente ao plano de corte.



Figura 4.56 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo. Tensão de corte numa secção de superfície mais estreita.

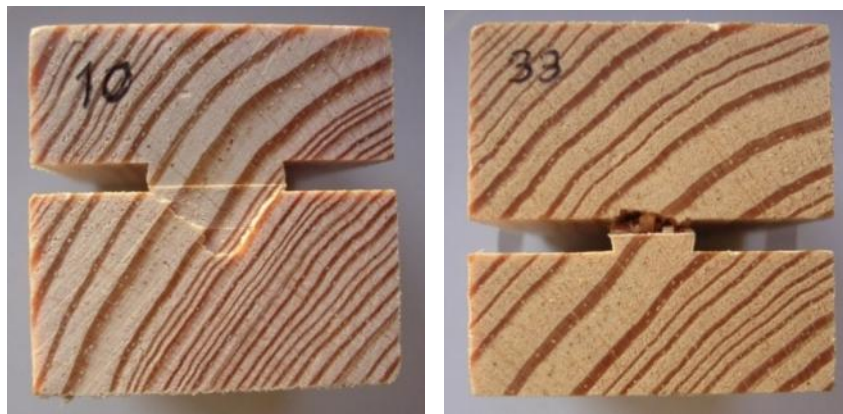


Figura 4.57 – Desvio da superfície de fractura no corte paralelo. Tensão de corte concentrada numa pequena secção.

Este conjunto de provetes de ensaio foi retirado de uma mesma prancha e com as camadas de crescimento orientadas na mesma direcção relativamente ao acessório de corte a aos rasgos laterais. Uma sequência de provetes foi cortada desde um rasgo lateral mínimo, ao qual correspondeu uma largura de secção resistente de 22 mm, até rasgos mais profundos dando uma largura da secção resistente ao corte de apenas 8 mm.

Os resultados da procura da relação do valor da tensão de ruptura ao corte com a profundidade dos rasgos laterais encontram-se tratados de forma gráfica nas Figuras 4.58 e 4.59, em que se apresentam, no eixo vertical as tensões de ruptura ao corte paralelo às fibras, e no eixo horizontal a largura da secção efectiva ou resistente resultante do corte dos rasgos laterais. Na primeira destas figuras foram separados os provetes em dois grupos, um grupo para os que apresentavam a direcção tangencial das camadas de crescimento no plano de corte, e o outro grupo para os que apresentavam a direcção radial das camadas de crescimento no plano de corte.

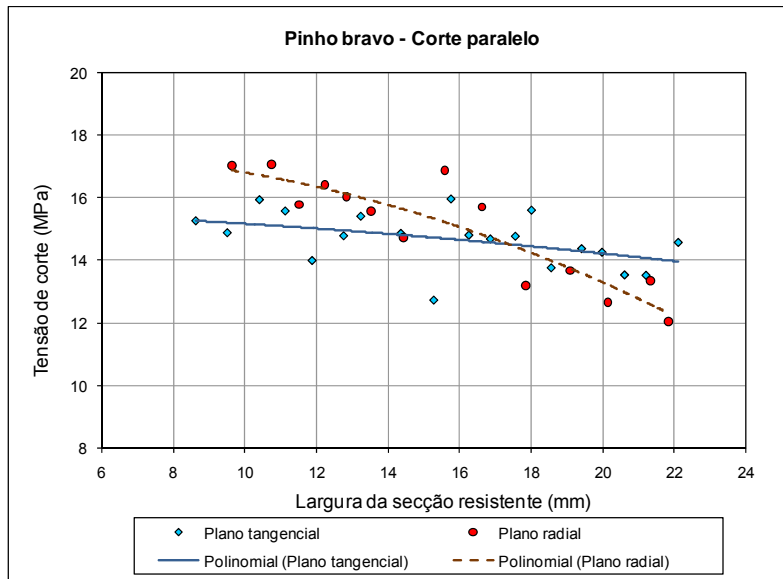


Figura 4.58 – Relação da tensão de corte com a largura da secção resistente ao corte, nos provetes com rasgo lateral, separando os de planos de corte radial e tangencial.

Na Figura 4.59 a linha de tendência foi feita com todos os provetes, independentemente da direção das camadas de crescimento.

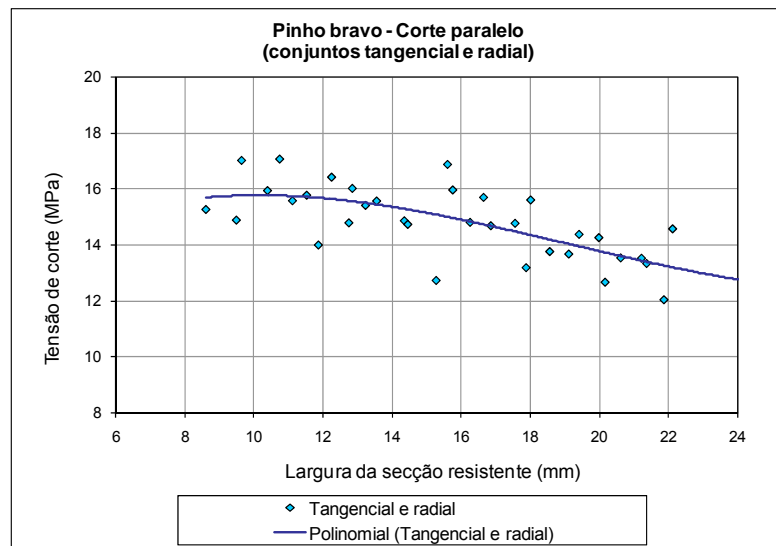


Figura 4.59 – Relação da tensão de corte com a largura da secção ao corte, no provete com rasgo lateral. Todos os provetes de pinho.

Da análise dos resultados anteriormente apresentados, com tratamento gráfico, e das Figuras mostrando a superfície de fractura, pode concluir-se que a redução da secção permite obter valores mais reais da tensão de corte paralela, pois não só a área da secção contabilizada

para cálculo é mais coincidente com a superfície de fractura, como também se revelou, pelo aumento da tensão para menor secção, que os efeitos perturbadores de tensões de compressão paralela e das tensões de tracção transversais são menores.

Outro aspecto que resulta da observação das superfícies de fractura ao corte paralelo de todos os provetes ensaiados, e claramente representado nas figuras anteriores, foi a constatação da fractura escolher planos de geometria bem determinados, como sejam os planos tangenciais, no lenho de menor densidade que é o lenho inicial, assim como zonas preferenciais de falha. Esta ruptura acaba por criar tensões que orientam posteriormente a superfície de fractura na direcção mais curta até uma zona livre, seguindo uma direcção radial.

Nas Figuras 4.60 e 4.61 mostram-se os resultados do modelo de distribuição das tensões de segundo o modelo de von Mises, através de uma análise numérica por elementos finitos FEM (código Cosmos Works). Na Figura 4.60, peça completa, os modelos tridimensionais correspondem a duas situações limites, como sejam, o provete ao corte sem qualquer rasgo lateral e outro com os rasgos profundos, deixando uma área resistente ao corte com tensões mais concentradas. Na Figura 4.61, mostra-se uma representação plana para as mesmas condições da figura anterior. Esta última representação permite compreender e confirmar que, sem rasgos, Figura 4.61 a), o nível de tensões de corte e a sua dispersão pelo corpo do provete, é muito superior ao da Figura 4.61 b), em que existem os rasgos laterais.

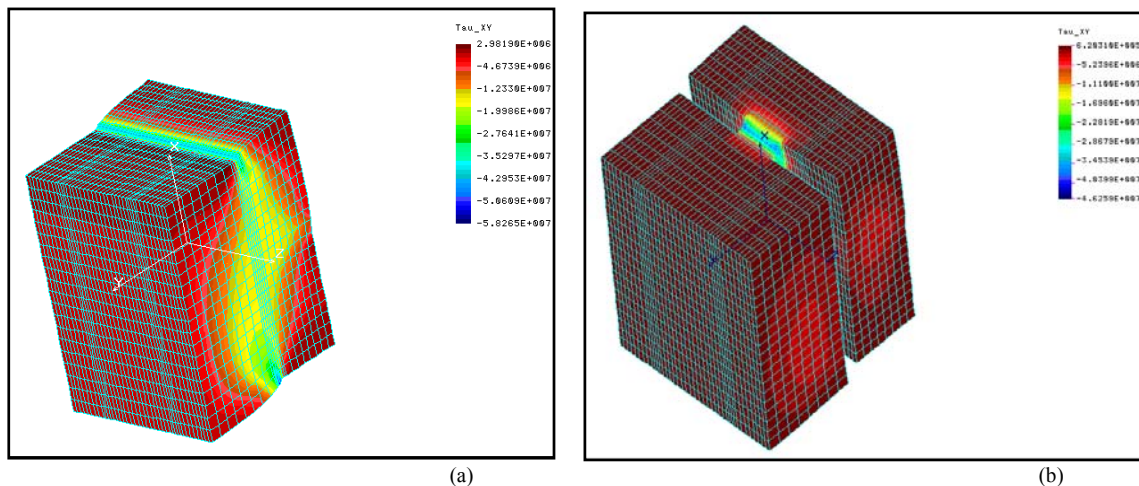


Figura 4.60 – Representações da simulação do corte paralelo feitas num software de elementos finitos: (a) Provete sem rasgos laterais; (b) Provete com largura de 8 mm da secção resistente.

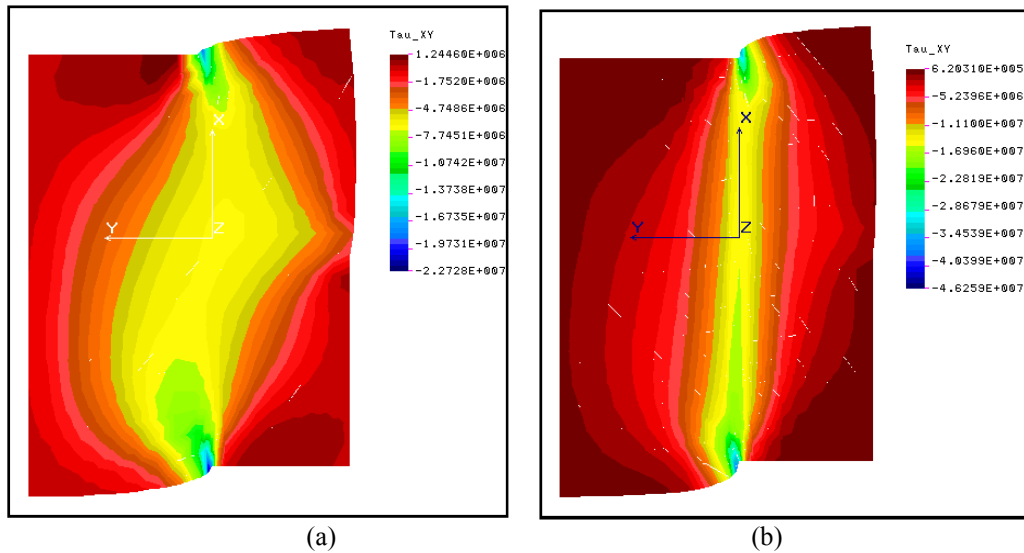


Figura 4.61 – Representações planas da simulação FEM do provetes de ensaio de corte, plano central: (a) Sem rasgos (b) Com rasgos laterais

4.5.2 Corte transversal

Em complemento da definição apresentada no Capítulo III, Secção 3.12, considera-se corte transversal ao corte num qualquer plano que contenha uma direcção perpendicular à direcção das fibras, sendo também perpendicular à direcção das fibras a direcção da força de corte aplicada. Consideram-se para estudo dois casos particulares de planos, o que é perpendicular à direcção das fibras Figura 4.62, onde se indica também a direcção da aplicação da força, e o plano que é perpendicular à direcção das fibras mas que contém esta mesma direcção, Figura 4.66 (que se analisará na secção seguinte). Nesta secção considera-se a primeira possibilidade tal como mostrado esquematicamente na Figura 4.62.

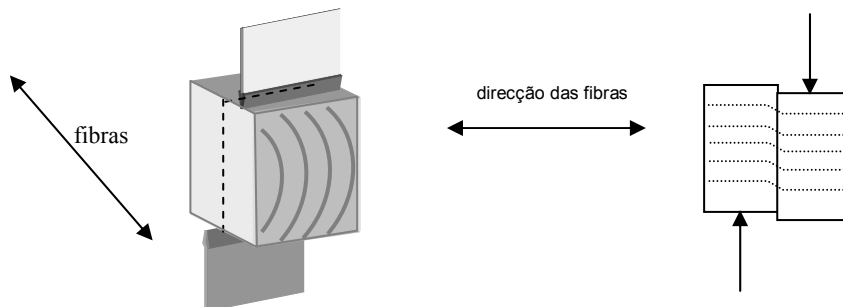


Figura 4.62 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte transversal.

Neste tipo de esforço mecânico sobre a madeira nunca há uma verdadeira ruptura com separação em duas partes do provete de ensaio, porque ocorre uma ondulação das fibras e o ponto de cedência é atingido lentamente assim como a diminuição de capacidade de carga. Numa primeira série de ensaios foi reconhecida a necessidade de abertura de rasgos laterais, semelhantes aos descritos para o ensaio de corte paralelo, de modo a diminuir as tensões de compressão transversal nas superfícies de aplicação da carga. O ensaio é realizado no acessório de “ensaio de bloco” utilizado para o corte paralelo às fibras. Na Figura 4.63 mostra-se o aspecto de um provete de eucalipto sujeito ao ensaio de corte transversal. Tal como previsto, mesmo com os rasgos laterais a cedência não dá lugar à perda a integridade do provete. Há uma forte deformação das fibras, com o seu encurvamento em continuidade, passando o esforço a ser de tracção das próprias fibras na sua orientação instantânea, o que leva o ensaio a prosseguir com cargas elevadas, mas que na realidade já não são de corte.



Figura 4.63 – Provete de eucalipto após ensaio de corte transversal.

O gráfico característico para o ensaio de corte transversal, para a madeira de eucalipto, é o que se encontra representado na Figura 4.64. Tendo em atenção que a deformação por corte tem uma característica de variação angular, o eixo das abcissas foi calculado para uma deformação angular das fibras, em radianos, o que permite por definição, obter o valor do módulo corte transversal.

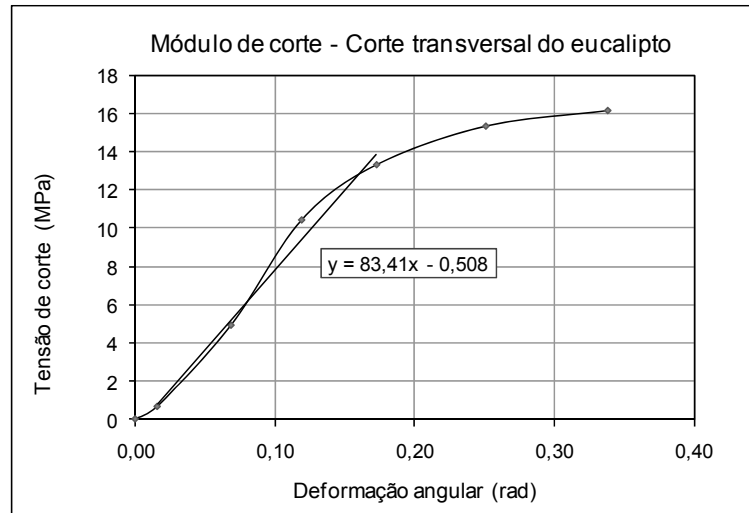


Figura 4.64 – Representação gráfica do ensaio de corte transversal da madeira de eucalipto.

Na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados do ensaio de corte transversal até ruptura, para madeira de eucalipto, com 15 provetes de dimensões exteriores $50 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$, com dois rasgos laterais para uma largura da secção resistente de 6,5 mm.

Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de corte transversal do eucalipto. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.

Média	18,4	MPa
Máximo	20,8	MPa
Mínimo	16,1	MPa
Desv.padrão	1,65	MPa
CV	9%	%
5º percentil inferior	16,1	MPa

Deve ter-se em atenção que perto da zona de cedência, mesmo com o efeito diminuído pelo corte dos rasgos, o provete ganha uma forte deformação por esmagamento por compressão transversal, o que foi evidenciado por um ligeiro alargamento local da dimensão transversal do provete e mesmo separação de fibras. Esta perturbação dificulta as medições, quer da deformação linear, quer da rotação angular da direcção das fibras.

Para um conjunto de ensaios feitos para o pinho bravo, o resultado correspondente à curva tipo e valores médios encontrados, é mostrado na Figura 4.65.

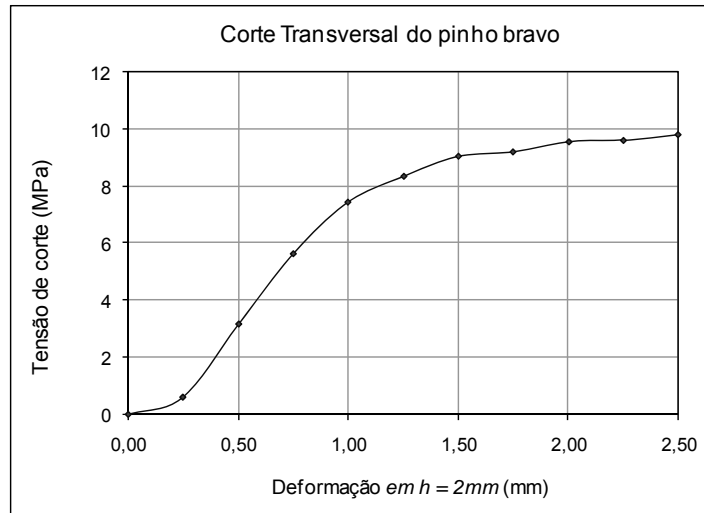


Figura 4.65 – Representação gráfica representativa do ensaio de corte transversal do pinho bravo.

Tal como aconteceu na madeira de eucalipto, a razão de não se dar uma separação do provete em duas partes, como se pode ver na representação gráfica pela linha contínua e horizontal da tensão, deve-se ao facto das fibras se ondularem e passarem a trabalhar à tracção. Ou seja, a partir do ponto de cedência por corte, à volta de 7 MPa, o ensaio perde a características para que tinha sido preparado, há um esmagamento excessivo por compressão na zona de contacto com o acessório metálico aplicador da força, tal como se percebe observando a Figura 4.62.

4.5.3 Corte por enrolamento

O corte transversal num plano que contém ou é paralelo à direcção das fibras, é designado neste trabalho por corte por enrolamento, por analogia da designação utilizada na bibliografia inglesa “rolling shear”. Não foi encontrada nenhuma designação em língua portuguesa, mas esta designação tal como a ideia transmitida pelo termo em inglês faz todo o sentido, pois a ruptura faz-se com as sucessivas camadas de fibras a rolarem sobre si próprias e umas sobre as outras, veja-se a representação em modelo na Figura 4.66.

O corte por enrolamento pode ser causador de fracturas em determinadas ligações, a partir de aplicação de forças relativamente baixas, nomeadamente quando se abrem cortes a meia madeira, fixações com acessórios metálicos, ou pode ainda ocorrer pontualmente por diferenças retracção entre camadas com diferentes humidades.

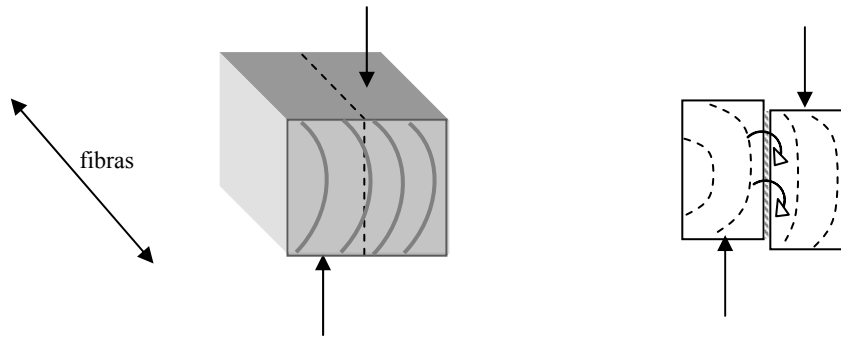


Figura 4.66 – Modelo de aplicação de carga, dando origem a tensões de corte por enrolamento.

A madeira é relativamente frágil a este tipo de esforço, uma vez que há uma cedência repentina, com separação das duas metades do provete se a carga máxima for mantida constante, tal como representado para a madeira de eucalipto na Figura 4.67.

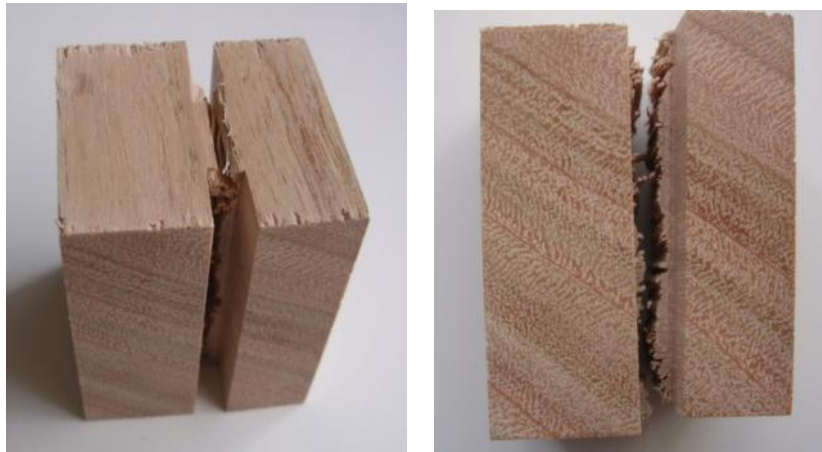


Figura 4.67 – Provete de eucalipto após ensaio de corte transversal por enrolamento.

Na Tabela 4.16 apresentam-se os resultados do ensaio de corte transversal por enrolamento, até ruptura, para madeira de eucalipto com 20 provetes de dimensões exteriores $50 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$ com dois rasgos laterais para uma largura da secção resistente de 15 mm.

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de corte por enrolamento do eucalipto. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.

Média	9,6	MPa
Máximo	10,2	MPa
Mínimo	8,8	MPa
Desv.padrão	4,01	MPa
CV	42 %	%
5º percentil inferior	8,7	MPa

Os mesmos procedimentos seguidos para ensaio de corte transversal da madeira de eucalipto foram seguidos para o pinho bravo, tendo-se utilizado madeira de taxa de crescimento médio (massa volúmica de cerca de 625 kg/m^3), sendo um lote de 20 provetes com cerne e outros 20 provetes com borne. Como não foram detectadas diferenças com uma tendência bem definida entre o lote de cerne e o de borne, optou-se por tratar todos os resultados em conjunto. Na Figura 4.68 mostram-se as curvas típicas para este ensaio, que, ao contrário do corte transversal num plano perpendicular ao eixo (descrito na secção anterior), tem um fim abrupto, com separação das peças após cedência, exemplo na Figura 4.69.

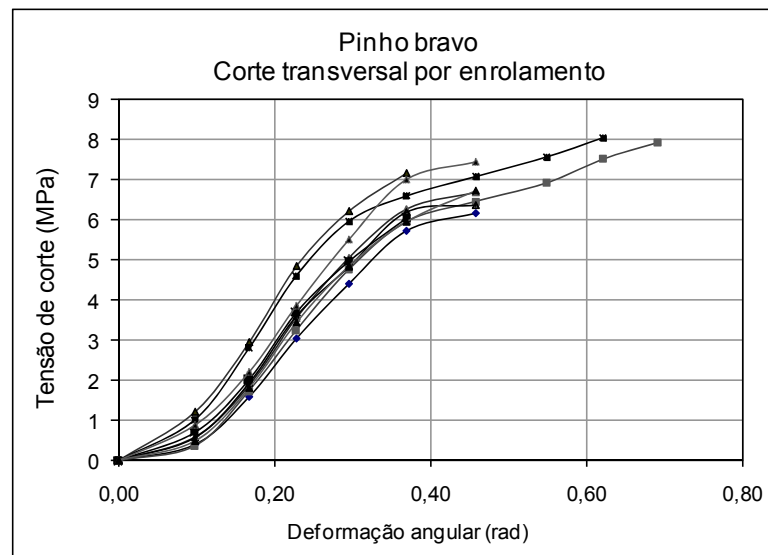


Figura 4.68 – Representação gráfica do ensaio de corte transversal por enrolamento, para o pinho bravo.



Figura 4.69 – Provete de pinho bravo após ensaio de corte transversal por enrolamento.

Os resultados dos ensaios efectuados com pinho bravo apresentam-se na Tabela 4.17, com o respectivo tratamento estatístico.

Tabela 4.17 - Resultados do ensaio de corte por enrolamento do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de corte à ruptura.

Média	6,9	MPa
Máximo	8,0	MPa
Mínimo	6,1	MPa
Desv.padrão	0,69	MPa
CV	10 %	%
5º percentil inferior	6,1	MPa

Na representação gráfica do ensaio de corte transversal por enrolamento, Figura 4.70, considerou-se em abcissas o ângulo de rotação das fibras na zona de cedência. Esta forma de tratamento dos dados permite determinar o coeficiente angular da linha na zona aproximadamente proporcional da tensão com o ângulo de deformação, o que permite a determinação do módulo de corte a partir da sua definição teórica. O módulo de corte é por definição como que uma constante elástica relativamente à deformação angular devia à tensão de corte. O valor encontrado graficamente foi de ($G_{TR} = 23$ MPa), designado por módulo de corte ou também por módulo de distorção, que será objecto de ensaios específicos para o corte paralelo às fibras, como descrito na secção seguinte.

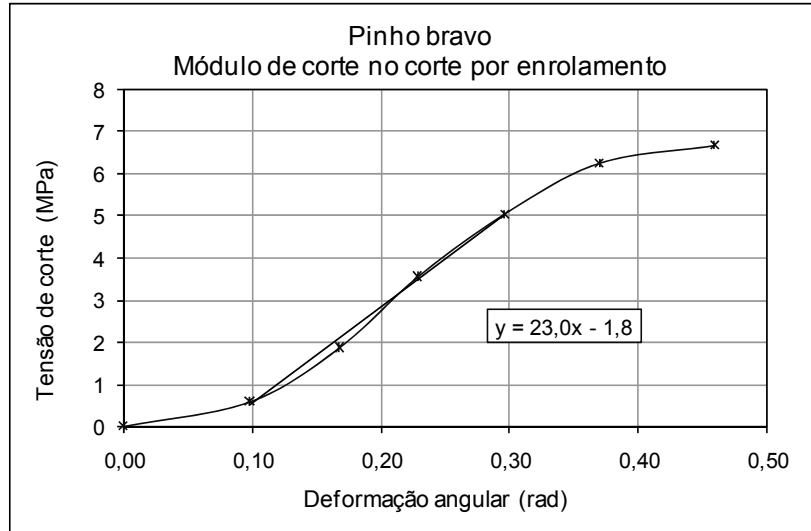


Figura 4.70 – Curva típica do ensaio de corte transversal por enrolamento e o módulo de corte.

4.5.4 Módulo de corte do corte paralelo

A norma EN408:2003 define um procedimento para determinação experimental do módulo de corte através do ensaio de flexão em três e quatro pontos, determinando previamente, o módulo de elasticidade local e o módulo de elasticidade aparente. Este cálculo é bastante laborioso, passando ainda por uma representação gráfica de determinados parâmetros, tal como representado na Figura 4.71 para um ensaio com pinho bravo. Este procedimento para determinação do módulo de corte foi já detalhadamente explicado neste trabalho, na secção 3.15.3.

Para construir o gráfico foi necessário realizar um ensaio de flexão a três pontos, obtendo-se o módulo aparente de elasticidade, com um valor médio de $E=13\ 684$ MPa, sendo realizados ensaios com distâncias entre apoios (L) sucessivamente de 630 mm, 560 mm, 490 mm, 420 mm, 350 mm, 280 mm e 210 mm, representados no gráfico da Figura 4.71.

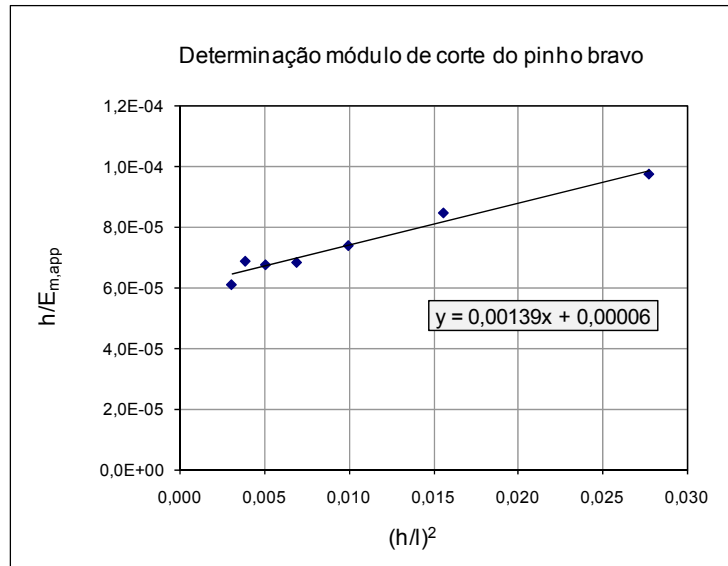


Figura 4.71 – Gráfico auxiliar para determinação dos parâmetros de cálculo do módulo de corte, segundo o procedimento da norma EN 408:2003.

Do gráfico anterior resultou o coeficiente angular da linha recta de tendência, que estabelece a proporcionalidade entre uma função do comprimento entre apoios com outra função relativa ao módulo de elasticidade aparente.

$$G = 1,2 / \operatorname{tg} \alpha \quad (4.3)$$

sendo portanto,

$$G = \frac{1,2}{0,00139} = 863 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

Na Tabela 4.18 mostram-se os resultados de outros ensaios com pinho bravo, para planos diferentes de corte, tangencial e radial.

Tabela 4.18 – Módulo de corte do pinho bravo, calculado segundo a norma EN 408:2003.

Pinho bravo	G_{LT} (MPa)	G_{LR} (MPa)
Módulo de corte	797	653

Tendo em conta a morosidade e trabalho para determinar o módulo de corte com este procedimento através de repetidos ensaios de flexão, o autor deste trabalho realizou um programa de ensaios para validar um novo procedimento utilizando uma nova geometria de provete, que teve por fundamento as definições teóricas do módulo de corte, já descritas na secção 3.15.3. Este novo provete é apresentado na geometria e dimensões padrão na Figura 4.72, tendo um perfil

semelhante a uma viga em I. As dimensões apresentadas são indicativas, pois deverão ser feitas adaptações para cada espécie de madeira, em função da sua própria rigidez e resistência, de forma a não se darem deformações indesejáveis, perturbadoras para os resultados que se pretendem medir. Concretamente, o que se pretende obter com a máxima precisão é o ângulo de rotação da zona sujeita a corte paralelo (explicado na Figura 4.72). As abas longitudinais “banzos” têm como função transmitir a força paralela às fibras até à zona em corte, mas não se podem deformar, quer por compressão, quer por deformação em forma de “S”. A partir de cargas elevadas é previsível que apareçam forças de tracção transversal na zona de ensaio, podendo perturbar a realidade dos registos tomadas. Hipóteses como o ensaio inclinado não deram resultado vantajoso.

Para que o novo provete proposto seja válido, assim como os resultados obtidos com os seus ensaios, têm de ser feitas verificações da não ocorrência de deformações por compressão ou encurvadura, para que se permita considerar, sem grande erro, que a principal deformação se dá como o exemplificado no esquema do lado direito da Figura 4.72 (b).

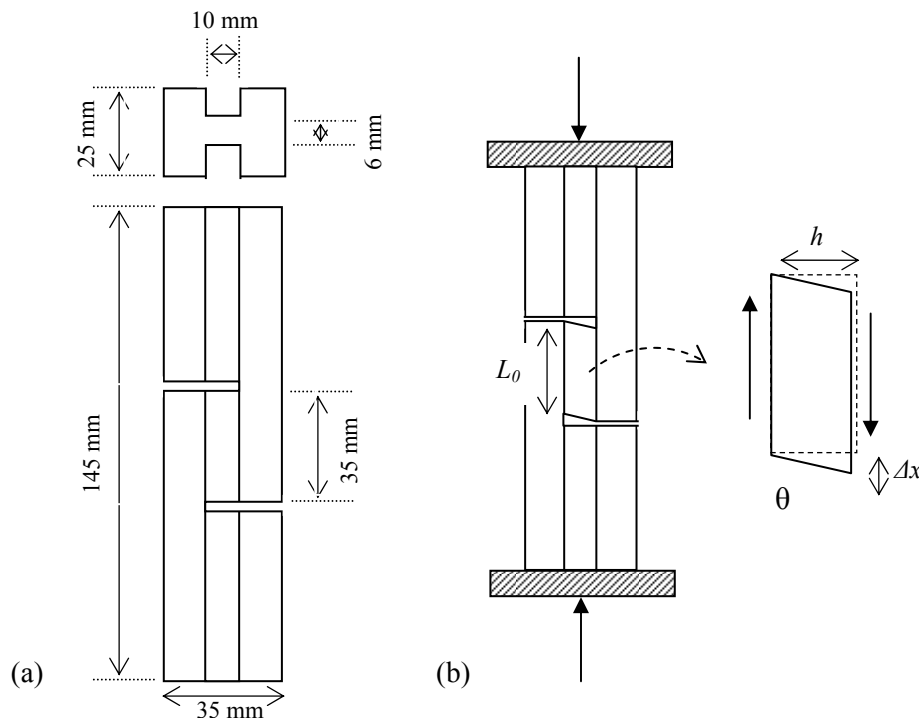


Figura 4.72 – Novo provete para determinação do módulo de corte no corte paralelo às fibras.

Segundo a teoria, equação 4.5, a tensão de corte relaciona-se com o ângulo de deformação através da constante G que é o módulo de corte.

$$\tau = G \cdot \theta \quad (4.5)$$

Para pequenos ângulos os valores θ podem ser calculados através da medição de um deslocamento relativo Δx entre duas faces afastadas de uma distância h .

$$\theta = \frac{\Delta x}{h} \quad (4.6)$$

o que permite encontrar o módulo de corte como sendo o coeficiente angular da recta de proporcionalidade entre a tensão de corte e o ângulo de deformação correspondente, numa representação gráfica como a da Figura 4.73, para 4 diferentes provetes de madeira de eucalipto.

Os resultados para a madeira de eucalipto foram bastante consistentes, pois os valores da tensão de ruptura ao corte corresponderam ao obtido em ensaios específicos normalizados e não se registaram sinais de deformações ou cedência que pudessem indicar interferência importante de outros esforços e mais precisamente no cálculo do ângulo de deformação da região submetida a corte paralelo.

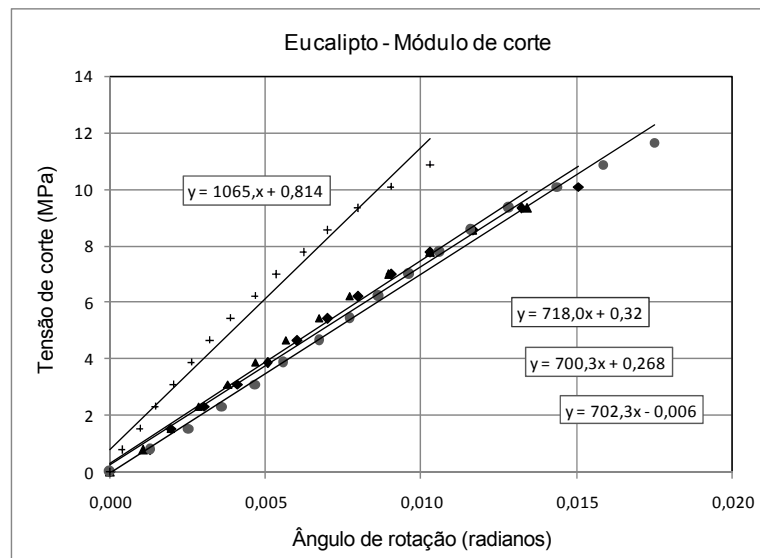


Figura 4.73 – Módulo de corte encontrado por procedimento seguindo a definição teórica e com o novo provete.

Os resultados interessantes e consistentes, obtidos para a madeira de eucalipto, não se confirmaram nas primeiras tentativas para o pinho bravo, pois as tensões de ruptura ao corte paralelo e o módulo de corte deram valores muito inferiores ao esperado. Pareceu haver grande influência da deformação elástica à tracção transversal. Para compensar esta possível fragilidade à tracção transversal, foi aplicada uma ligeira força de compressão transversal (praticamente só para manter a integridade da geometria do provetes, compensando componentes de tracção), por

meio de um pequeno grampo. O provete de pinho, com indicação da forma de fixação do sensor de deformação, é mostrado na Figura 4.74.



Figura 4.74 - Provete modificado de pinho bravo para determinação do módulo de corte.

Na Figura 4.75 mostra-se a representação gráfica dos resultados obtidos para o cálculo do módulo de corte com o provete do tipo do representado na Figura 4.72, tendo-se obtido o valor de $G = 1190$ MPa para um plano de corte não perfeitamente alinhado nem com o plano perfeitamente tangencial nem com o plano perfeitamente radial.

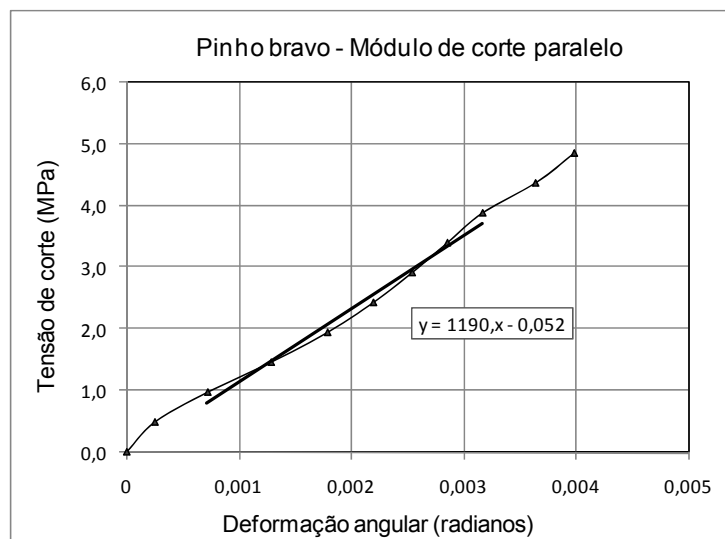


Figura 4.75 – Módulo de corte do pinho bravo, obtido com o novo provete.

4.6 Compressão transversal

Tal como descrito no Capítulo III, na revisão bibliográfica relativa ao ensaio de compressão transversal, as três das normas mais referenciadas, a norma inglesa, a norma americana e a norma Europeia, definem procedimentos semelhantes com diferenças na geometria e dimensões dos provetes. Basicamente a norma inglesa define um provete quadrado enquanto as normas americana e a Europeia definem provetes paralelepípedicos, mas a norma americana ensaia este provete ao baixo e a norma Europeia ensaia o provete ao alto.

No desenvolvimento experimental deste trabalho foram usados procedimentos semelhantes a cada uma das diferentes normas referidas, dependendo das vantagens em cada caso conforme disponibilidade da madeira com padrão de corte mais conveniente (tangencial ou radial) e também para avaliar a variação de comportamento elástico e resistente em diferentes tipos de lenho (medula, lenho juvenil, cerne e borne), ou ainda para permitir colocação de extensómetros directamente sobre a madeira em duas direcções perpendiculares entre si.

Recorde-se então, que segundo a norma Inglesa B.S. 373:1957, o ensaio de compressão transversal é efectuado sobre um provete que é um cubo de 50 mm de lado. A aplicação de carga é feita através de dois acessórios metálicos aplicados em duas faces do cubo, devendo realizar-se ensaios nas faces radiais e ensaios nas faces tangenciais. A carga é aplicada a uma velocidade constante de 0,0635 mm/min. A curva de carga deformação deve ser traçada até uma deformação de 2,54 mm, correspondendo a uma deformação relativa de 0,05 mm/mm. Qualquer carga máxima atingida antes da deformação limite de 2,54 mm deve ser considerada como carga de ensaio. Devem ser registados os seguintes parâmetros (alguns após representação gráfica):

- área da secção sujeita à compressão (A)
- direcção da compressão (radial ou tangencial)
- carga no limite de proporcionalidade (P')
- carga correspondente à deformação de 2,54 mm (P'')
- carga máxima, se atingida antes da deformação de 2,54 mm (P)

Os cálculos a efectuar são seguintes:

- Tensão de compressão no limite de proporcionalidade,

$$f_{c,90} = \frac{P}{A} \quad (4.7)$$

- Tensão de compressão para uma deformação de 2,54 mm,

$$f_{c,90}'' = \frac{P''}{A} \quad (4.8)$$

- Tensão de cedência para a carga máxima,

$$f_{c,90,\max} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (4.9)$$

Segundo a norma ASTM D143 o ensaio de compressão transversal é efectuado num provete de 2 x 2 x 6 polegadas (ou 50 x 50 x 150 mm). A força de compressão transversal é aplicada através um acessório metálico de 50 mm de largura, colocado transversalmente à direcção das fibras da madeira, a igual distância dos dois topos. A face onde é aplicada a força é de corte radial, ou seja, a força actua paralelamente à direcção tangencial das camadas de crescimento. A velocidade de ensaio é de 0,305 mm/min. Deve ser traçada uma curva carga-deformação até um valor de deformação de 2,5 mm. A tensão de compressão é tomada como sendo o cociente entre a força de esmagamento e a área de contacto do acessório metálico com a face da madeira (seja a largura do aplicador vezes a largura do provete), calculada pela equação 4.10. A diferença para a norma inglesa é o esmagamento não chegar aos topos do provete, portanto, há um efeito de resistência acrescida pela continuidade das fibras na zona fronteira de contacto do aplicador, pelo que resultará uma tensão superior.

$$f_{c,90}'' = \frac{P''}{A} \quad (4.10)$$

Segundo a norma europeia EN 408:2003 para caracterização de madeiras para estruturas, o ensaio de compressão transversal deve ser feito num provete de 70 mm de comprimento na direcção paralela às fibras (l), 45 mm de largura (b), e 90 mm de altura (h), sendo esta dimensão medida num plano tangencial, Figura 4.76.

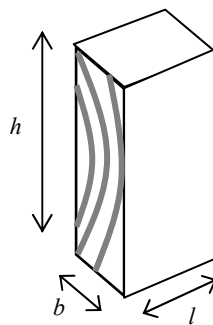


Figura 4.76. – Provette para ensaio de compressão transversal.

A medição de deformação é feita através de extensómetros ou outro aparelho suficientemente preciso colocado entre dois pontos centrados em altura e distantes entre si de

cerca de $0,6 \times h$. A carga deve ser medida com uma precisão de pelo menos 1% da carga máxima medida, ou precisão de 0,1 % da carga máxima se estiverem a ser lidas cargas inferiores a 10 % da carga máxima prevista. A velocidade de aplicação da carga deve ser calculada a partir de ensaios preliminares, de modo a que todo o ensaio decorra num tempo aproximado de 3 a 5 minutos. A tensão de compressão é dada pela expressão,

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \cdot l} \quad (4.11)$$

Nos ensaios experimentais de compressão transversal realizados nesta tese, pretendeu-se estudar com detalhe a diferença de comportamento entre as direcção tangencial e radial, pelo que num provete de peça única, a partir de árvores com um diâmetro máximo de 400 mm, não seria possível manter uma direcção tangencial numa altura de 90 mm como definido na norma EN 408, pelo que se optou por um bloco maciço formado por colagem de elementos com a mesma orientação de camadas de crescimento, tal como mostrado na Figura 4.77.

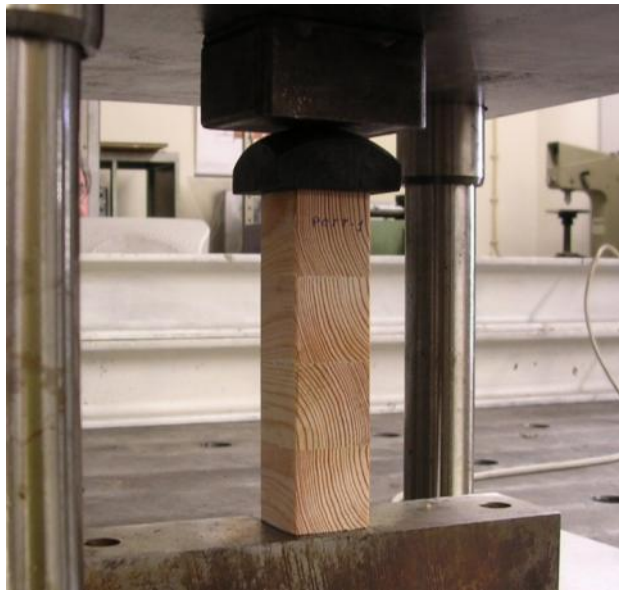


Figura 4.77 – Provete de elementos colados para compressão transversal na direcção tangencial.

Relativamente às características do pinho bravo dos ensaios de compressão transversal mostrados na Figura 4.77, tratou-se de madeira de lenho adulto de média alta densidade (650 a 700 kg/m³), com elevada textura (lenho final ≥ 35 %) e sem defeitos. Por este motivo os valores registados para a ruptura foram muito elevados, como mostrado na Figura 4.78, correspondente a este mesmo provete. Tal como previsto a tensão máxima é atingida lentamente após grande

deformação. Mesmo com um provete relativamente esbelto não é fácil dar-se um colapso repentino com total perda de capacidade resistente.

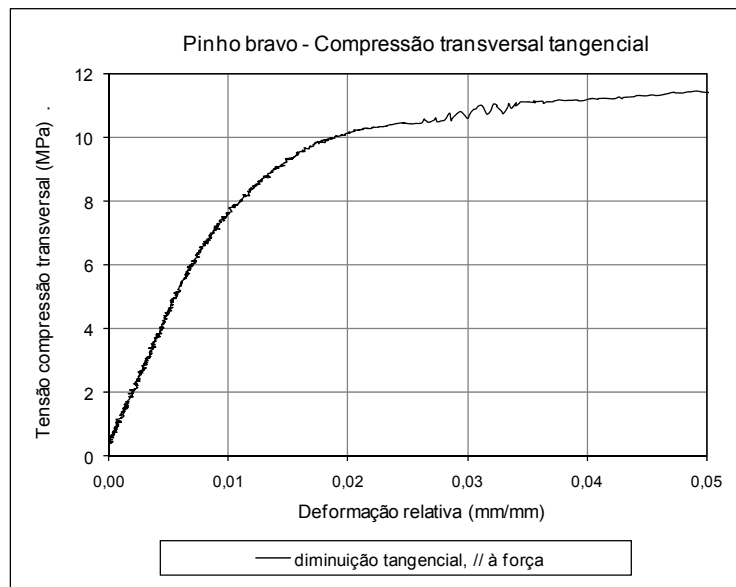


Figura 4.78 – Curva de tensão deformação por compressão transversal do pinho bravo até ruptura.

Na Figura 4.79 mostra-se o estado de deformação do provete de ensaio de compressão transversal referido anteriormente, tendo atingido o valor de deformação relativa de 0,005 mm/mm, que é o valor de referência definido na norma EN 408 como máximo a considerar como carga de cedência.



Figura 4.79 – Estado de deformação por compressão transversal do pinho bravo até à carga máxima.

O ensaio de compressão transversal é complexo e perturbado pelo facto de se dar uma forte deformação na direcção perpendicular à da força, o que faz com que a área da secção seja mais elevada do que o que se considera teoricamente para calcular a tensão de compressão. Na Figura 4.80 mostram-se as deformações relativas, respectivamente na direcção de aplicação da carga de compressão e numa das direcções perpendiculares à da força, neste caso na direcção radial, num ponto que se identifica na Figura 4.79 por um segmento de linha recta traçada sobre a superfície.

Como referido anteriormente, a tensão foi calculada com base na área da secção inicial, antes do início da deformação por expansão lateral. Na verdade a tensão real é inferior à mostrada nos gráficos, mas o seu cálculo rigoroso levaria a cálculos muito complexos, com a integração do coeficiente de Poisson, mas que na utilização prática pouco significado teria, face aos desvios atribuídos à variabilidade própria da madeira.

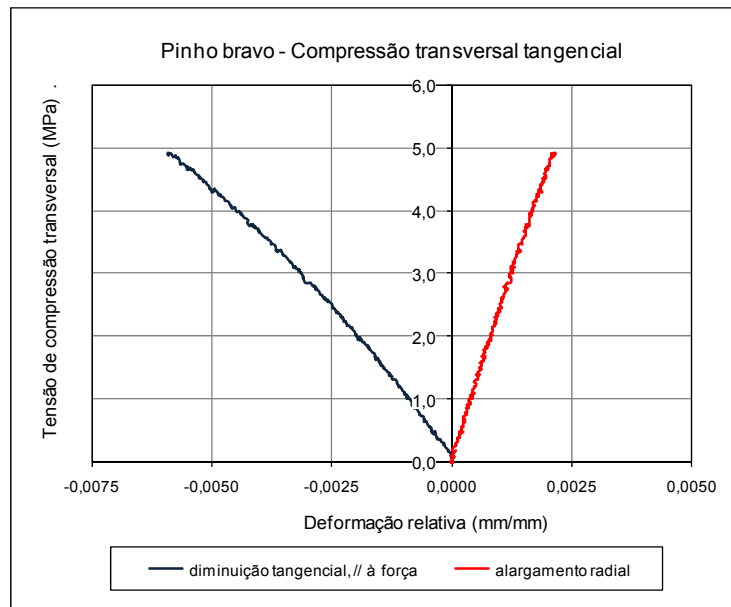


Figura 4.80 – Curvas de deformação por compressão transversal. Encurtamento na direcção da força e expansão na direcção perpendicular à da força.

Com madeira de características semelhantes à utilizada nos ensaios de compressão transversal na direcção tangencial, realizaram-se ensaios de compressão transversal na direcção radial, como exemplificado no provete mostrado na Figura 4.81, já depois de terminado o ensaio.



Figura 4.81 – Compressão transversal de pinho bravo na direcção radial.

Relativamente aos ensaios com madeira idêntica ao da Figura 4.81, mostra-se na Figura 4.82 o gráfico de tensão deformação até à carga máxima. Não foi realizado o ensaio até 0,005 % de deformação, tal como definido na norma EN 408, porque o provete apresentava uma deformação extremamente elevada sem aumento da carga aplicada, a partir de uma deformação relativa de 0,03 (mm/mm).

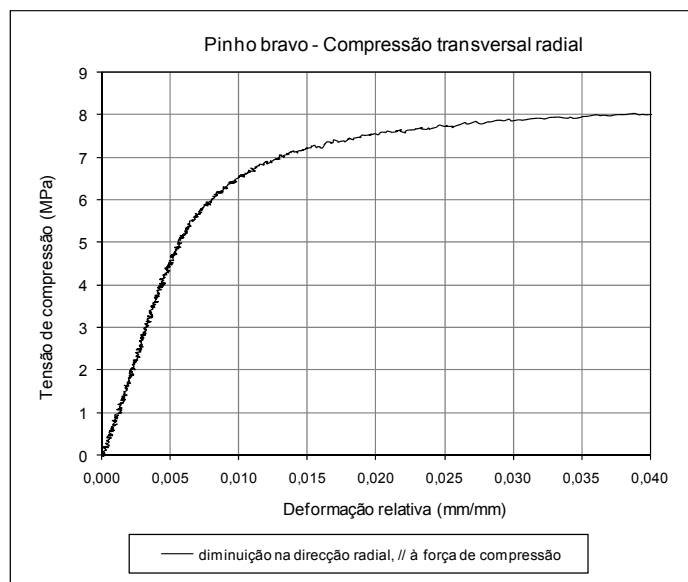


Figura 4.82 – Compressão transversal de pinho bravo na direcção radial.

Tal como feito relativamente ao ensaio de compressão transversal na direcção tangencial, também neste ensaio, para a direcção radial, foram medidas as deformações, quer na direcção da força quer na direcção perpendicular (neste caso tangencial), nos locais do provete traçados com segmentos de recta, Figura 4.81. O gráfico de relação entre a tensão e as deformações é mostrado na Figura 4.83.

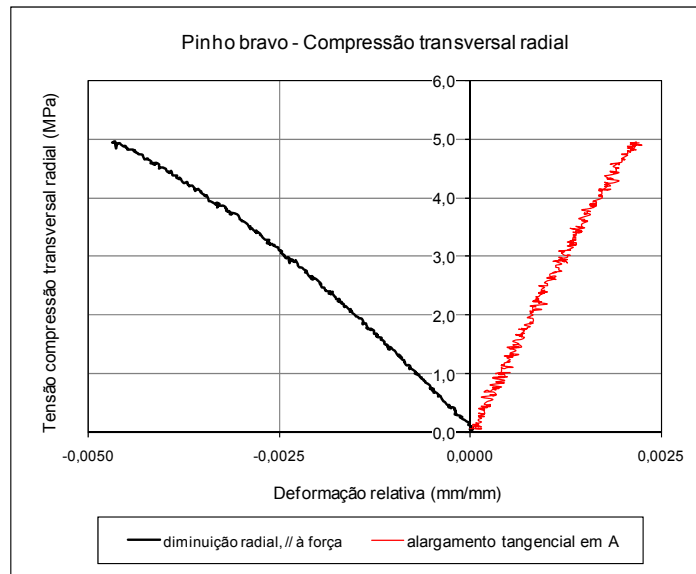


Figura 4.83 – Curvas de tensão deformação por compressão transversal. Encurtamento na direcção da força e expansão na direcção perpendicular à da força.

Por definição, a relação entre o aumento relativo de dimensão na direcção perpendicular à da força aplicada e a diminuição relativa de dimensão na direcção da aplicação da força, representa o coeficiente de Poisson entre estas duas direcções. Os resultados correspondentes aos dados apresentados da Figura 4.83 permitem portanto o cálculo do coeficiente de Poisson, tal como apresentado na forma gráfica na Figura 4.84, em função do aumento de tensão de compressão aplicada. As oscilações da linha do gráfico são devidas a trabalhar-se no limite de precisão dos extensómetros de medição da deformação. O valor de coeficiente de Poisson a considerar entre a expansão tangencial e a contracção radial ronda os 0,50. Não foi portanto possível obter um valor exacto e constante ao longo da compressão, tal como se espera que aconteça com os materiais isotrópicos e sem variabilidade natural.

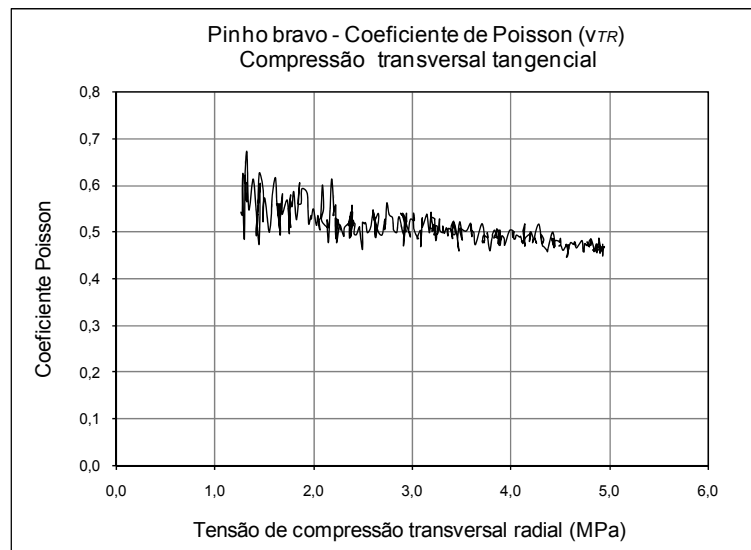


Figura 4.84 – Coeficiente de Poisson resultante do cociente entre a expansão relativa tangencial e a contracção relativa radial, no ensaio de compressão transversal radial do pinho bravo.

No final de ensaios com duas dezenas de amostras de pinho bravo com ligeiras diferenças de textura e densidade, mas não incluindo madeira do lenho juvenil nem de muito baixa densidade (correspondendo a texturas muito baixas com camadas de crescimento largas), chegou-se à Tabela 4.19, que representa os valores esperados para pinho bravo correspondente à qualidade correspondente à definida na norma NP 1435 como classe EE.

Tabela 4.19 - Resultados do ensaio de compressão transversal do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma EN 408.

Compressão em toda a secção		
Média	8,2	MPa
Máximo	11,5	MPa
Mínimo	6,6	MPa
Desv.padrão	1,73	MPa
CV	21,1	%
5º percentil inferior	6,7	MPa

Na comparação dos valores de compressão transversal nas direcção tangencial e na radial, é interessante deixar registado que embora haja muitos valores individuais de compressão radial superior à tangencial, no tratamento estatístico de grandes números há uma tendência para os valores de compressão na direcção tangencial apresentarem valores superiores aos da direcção radial em cerca de 20 %.

Como referido na parte introdutória deste secção, outro conceito de realização do ensaio de compressão transversal é o seguido pela norma americana ASTM D 143, em que a compressão é feita por um acessório que não cobre totalmente a face onde é aplicada a força de compressão, tal como mostrado esquematicamente na Figura 4.85.

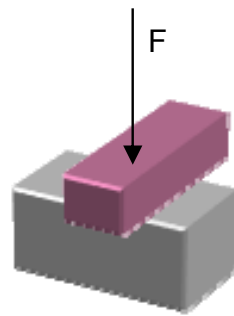


Figura 4.85 – Esquema de ensaio de compressão transversal com aplicador a meio da face de contacto.

Na Tabela 4.20 mostram-se os resultados de ensaios de compressão transversal em pinho bravo de características semelhantes ao utilizado nos ensaios cujos resultados são mostrados na Tabela 4.18, com diferença de o procedimento seguido ser o correspondente à norma ASTM, em que a compressão é aplicada através de um acessório metálico que atravessa o provete a meio da sua face de compressão, tal como referido. Registe-se a significativa diferença de valores, o que é explicado pelo facto das fibras manterem, neste segundo procedimento, a sua continuidade o que aumenta a resistência (nas camadas superiores há um comportamento de algum modo semelhante a uma flexão). Este método, embora não correspondendo exactamente ao que se define teoricamente como compressão transversal aproxima-se bastante das situações reais de serviço de estruturas, em que a pressão de outros componentes é descarregada a meio de uma viga, pelo aperto de ligadores por parafusos, ou ainda, por anilhas usadas juntamente com os próprios parafusos.

Tabela 4.20 - Resultados do ensaio de compressão transversal do pinho bravo. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma ASTM D 143.

	Compressão a meio do provete	Unidades
Média	18,9	MPa
Máximo	27,1	MPa
Mínimo	16,4	MPa
Desv.padrão	2,83	MPa
CV	15,0	%
5º percentil inferior	16,4	MPa

Relativamente aos resultados dos ensaios com a madeira de eucalipto mostram-se os resultados dos ensaios realizados segundo o procedimento em que a compressão transversal foi feita em toda a superfície do provete. Na Figura 4.86 vê-se uma representação gráfica representativa do comportamento do eucalipto em relação a este esforço mecânico. Como sempre acontece na compressão transversal, e já discutido anteriormente, é difícil definir exactamente o ponto que corresponde à tensão de cedência, pelo que se seguiu a recomendação da norma EN 408 de parar o ensaio numa deformação relativa de 0,05 mm/mm.

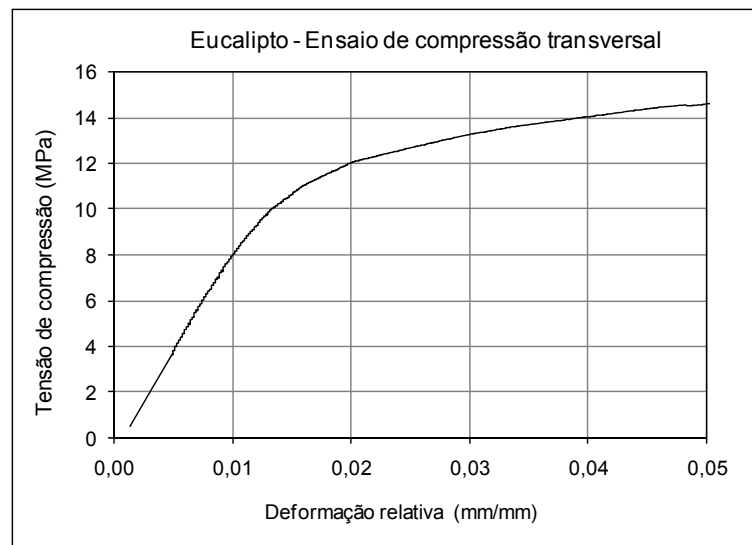


Figura 4.86 – Curva de tensão - deformação por compressão transversal do eucalipto.

Apresenta-se na Tabela 4.21 o resumo dos resultados obtidos para a compressão transversal do eucalipto. Registe-se que estes resultados do eucalipto foram obtidos por compressão em toda a superfície transversal, procedimento da norma EN 408, razão pela qual não podem ser comparados com o resultados do pinho bravo da Tabela 4.20, mas sim com os da Tabela 4.19. Comparativamente, para um mesmo material, a compressão numa zona limitada dá valores de tensão máxima mais elevados do que o que aconteceria se a compressão fosse em toda a superfície, devido à influência da zona de fronteira que está fora do aplicador.

Tabela 4.21 - Resultados do ensaio de compressão transversal do eucalipto. Média e valores limites da tensão de compressão. Método da norma EN 408.

	Tensão de compressão	Unidades
Média	16,5	MPa
Máximo	27,8	MPa
Mínimo	13,6	MPa
Desv.padrão	4,15	MPa
CV	25,2	%
5º percentil inferior	13,9	MPa

O módulo de elasticidade à compressão transversal só apresenta valores próximos da proporcionalidade para tensões até cerca de metade da tensão máxima (ver Figura 4.86). Uma forma alternativa de representar os resultados da evolução dos valores do módulo de elasticidade à medida que se aumenta a tensão de compressão, consiste em tomar a origem (deformação nula para ausência de tensão) sempre fixa e sucessivos pontos da curva de tensão deformação como limites de proporcionalidade, constrói-se um gráfico com o aspecto representado na Figura 4.87. Esta apresentação tem a vantagem de ver a evolução da constantes de proporcionalidade e considerar a zona mais estável (horizontal) e/ou da zona de serviço real, como valor indicativo do módulo de elasticidade a utilizar. Neste sentido pode considerar-se, para cálculo estrutural com madeira de eucalipto, o valor de 800 MPa como o valor do módulo de elasticidade à compressão transversal.

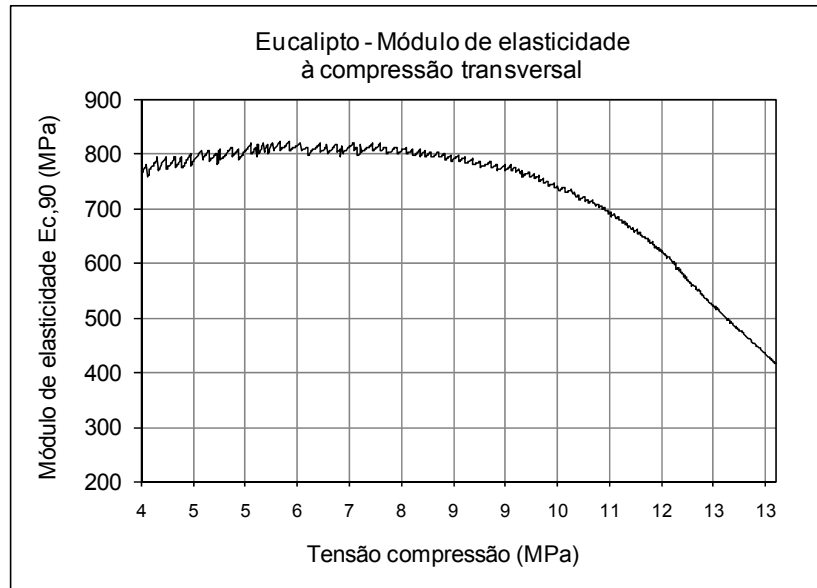


Figura 4.87 – Evolução do valor do módulo de elasticidade à compressão transversal da madeira de eucalipto, em função da tensão de compressão.

4.7 Flexão

A metodologia seguida para o estudo e desenvolvimento experimental da flexão teve por base os fundamentos teóricos e reflexão feitos na secção 3.13 do Capítulo III. Assim, para a maior parte dos ensaios de desenvolvimento experimental, e para um melhor entendimento da complexidade de tensões presentes na flexão, foram seguidos essencialmente os procedimentos definidos na norma Europeia EN 408:2003. As opções práticas prenderam-se com a identificação e caracterização da qualidade da madeira utilizada nos ensaios e com os equipamentos utilizados para medição das deformações, incluindo, além da flecha de flexão, as deformações da própria secção do provete. Numa primeira fase foram utilizados extensómetros colados para avaliar as extensões nas camadas, superior e inferior e um transdutor de deslocamentos de elevada precisão (0,001 mm) para medição das flechas de deformação. Outros ensaios tiveram como objectivo encontrar os valores das tensões provocadas pelo esforço transversal e tensões de corte paralelas. Numa fase mais avançada dos ensaios, e após validação com resultados anteriores, passaram a utilizar-se extensómetros electromecânicos, por serem igualmente precisos relativamente aos extensómetros colados mas serem de muito mais fácil e rápida aplicação e ainda por serem mais económicos.

A montagem base de ensaio corresponde à Figura 4.88, e os cálculos do módulo de elasticidade global e da determinação da tensão de ruptura, foram feitos segundo as expressões (4.12) e (4.13) respectivamente, de acordo com o definido na norma EN 408:2003.

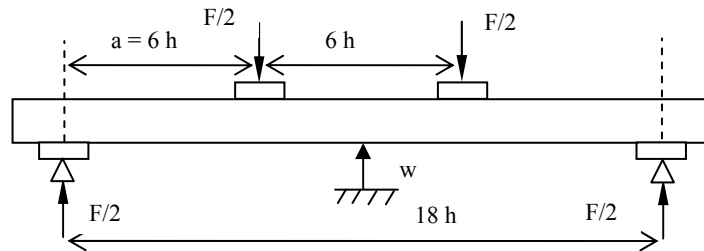


Figura 4.88 – Montagem para a determinação do módulo de elasticidade global, segundo a norma EN 408:2003.

$$E_{m.g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (4.12)$$

e,

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad \text{ou} \quad f_m = \frac{3aF_{\max}}{bh^2} \quad (4.13)$$

em que,

- a* distância entre um ponto de aplicação da carga e o suporte mais próximo num ensaio de flexão, em milímetros;
- b* largura da secção transversal num teste de flexão, ou a menor dimensão da secção transversal, em milímetros;
- E_{m,g}* módulo de elasticidade global em flexão, em Newton por milímetro quadrado;
- F* carga, em Newton;
- F_{max}* carga máxima, em Newton;
- f_m* tensão de resistência à flexão, em Newton por milímetro quadrado;
- h* altura da secção transversal, em milímetros;
- l* vão em flexão, em milímetros
- W* módulo da secção, em milímetros cúbicos;
- w* flecha de deformação, em milímetros.

Utilizaram-se para os diferentes ensaios de flexão velocidades de aplicação da carga que cumpriram o requisito normativo de velocidade inferior a $0,003.h$ (mm/s).

Destes ensaios retiraram-se tensões de ruptura, os módulos de elasticidade à flexão e foram observadas e registadas todas as origens da ruptura e outras ocorrências dignas de nota.

4.7.1 Variação radial e características à flexão do eucalipto

Tendo em conta a sempre presente variabilidade das características da madeira, foi feita uma série de ensaios para avaliação do padrão de variação do módulo de elasticidade à flexão

numa direcção radial, desde a proximidade da medula, incluindo lenho juvenil, até ao lenho das camadas mais afastadas da medula – borne exterior. Assim de uma mesma prancha de eucalipto foram cortados e identificados vários provetes de pequena secção ($15 \times 15 \text{ mm}^2$). Foi feito o tratamento de resultados do módulo de elasticidade ao que se juntou informação relativa à massa volúmica de cada provete. Na Figura 4.89 dá-se uma imagem do conjunto de amostras de eucalipto correspondendo exactamente à sua posição relativa na prancha de origem.



Figura 4.89 – Amostras de eucalipto tiradas sequencialmente de uma mesma prancha na direcção radial completa, para ensaios de flexão.

Na Figura 4.90 mostra-se a representação gráfica dos valores do módulo de elasticidade em função da distância de cada provete ao centro geométrico das camadas de crescimento, passando pela medula, para um toro de eucalipto com cerca de 580 mm de diâmetro. Confirmou-se assim a tendência já referida para outras propriedades mecânicas, em particular para o eucalipto, em que a região central do tronco apresenta madeira com mais fraco desempenho mecânico, que atinge os valores mais elevados no final do cerne e volta a diminuir ligeiramente para a parte exterior do borne.

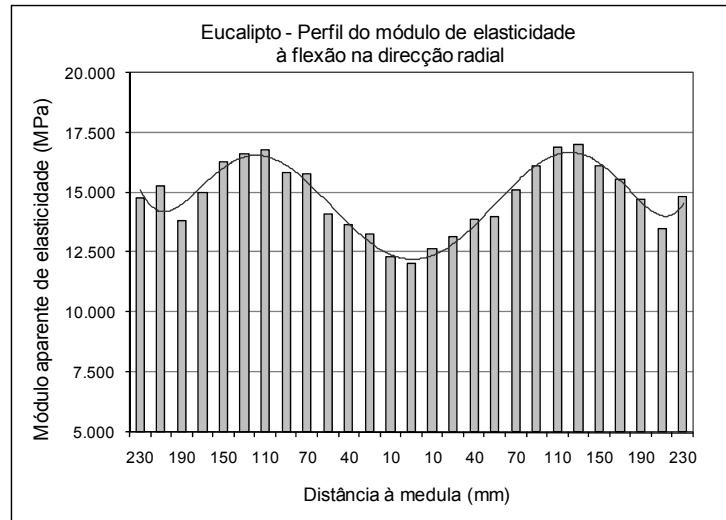


Figura 4.90. – Perfil de variação do módulo de elasticidade com distância à medula, numa direcção radial (provetes de uma mesma prancha).

Para um outro conjunto de amostras foi feito uma preparação e tratamento semelhantes aos do ensaio anterior, com conjuntos de provetes de diferentes pranchas mas correspondentes a uma mesma distância da medula, no sentido de avaliar a correlação entre a variação da massa volúmica da madeira e a sua rigidez à flexão, do que resultou a representação gráfica mostrada na Figura 4.91. As colunas correspondem ao valor da massa volúmica em kg/m^3 e a linha aos valores de módulo de elasticidade correspondentes. Ficou claramente evidenciado que existe uma forte correlação entre a densidade e o bom desempenho mecânico da madeira de eucalipto sem defeitos, confirmando também o aumento da rigidez com o afastamento da medula.

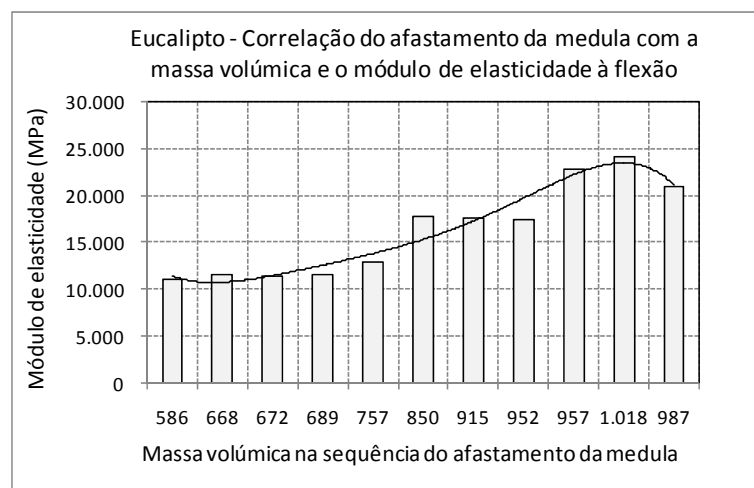


Figura 4.91 – Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, sequencialmente na direcção radial de uma mesma prancha.

Uma vez que os ensaios de flexão para determinação do módulo de elasticidade não são ensaios destrutivos, antes de se fazer o ensaio até ruptura fizeram-se vários ensaios na zona elástica de deformação. Uma série inicial foi feita com os provetes numa posição determinada, ao qual se seguiu uma nova série com os mesmos provetes rodados de 180°. A ideia era explorar o efeito de uma repetição de flexão em direcção oposta, para se saber se se mantinha a rigidez ou se esta se alterava e em que sentido. O resultado foi o representado na Tabela 4.22, salientando-se a extrema semelhança de resultados, provando que o conjunto de provetes tinha uma identidade própria de comportamento mecânico, que se repete com idêntico comportamento desde que não afectado por fluência, relaxação, ou micro-rupturas internas.

Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de flexão repetido com os mesmos provetes rodados de 180°.

Eucalipto	Módulo de elasticidade a 0°	Módulo de elasticidade a 180°
<i>Unid.</i>	(MPa)	(MPa)
<i>Médias</i>	19.683	19.686
<i>Desv. Padrão</i>	1.540	2.168

Os mesmos 22 provetes utilizados para o ensaio anterior, com valores de teor em água médio de 12,5 % e sem defeitos, foram submetidos a novo ensaio de flexão, sendo agora levados até ruptura. Os valores do módulo de elasticidade foram de novo calculados e também a tensão de ruptura à flexão, com os resultados apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Resultados do ensaio de flexão de um conjunto de amostras de eucalipto.

Eucalipto	Módulo de elasticidade	Tensão de ruptura
<i>Unid.</i>	(MPa)	(MPa)
<i>Médias</i>	18 615	1 250
<i>Desv. padrão</i>	1 568	124

Após os estudos de propriedades do eucalipto em situações particulares, realizou-se um tratamento estatístico de todos os resultados de cerca de meia centena de amostras, no sentido de encontrar valores representativos das características médias e dos valores de segurança para cálculo estrutural, correspondendo a madeira sem nós ou pequenos nós são, com exclusão de peças contendo a medula, sem colapso nem fendas, com conhecimento de ter tido um processo de secagem lento e cuidadoso até valores de teor em água entre 12 e 14 %. Assim, os valores do

módulo de elasticidade à flexão encontrados neste estudo, para a madeira de eucalipto, foram os que se apresentam na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Resumo e tratamento estatístico dos ensaios de módulo de elasticidade à flexão para a madeira de eucalipto.

Eucalipto	Módulo de elasticidade à flexão	
Média	18.176	MPa
Máximo	22.878	MPa
Mínimo	15.781	MPa
Desv. padrão	2.012	MPa
CV	11	%
5º percentil inferior	15.872	MPa

4.7.2 Variação radial e características à flexão do pinho bravo

Tal como se fez para a madeira de eucalipto, achou-se importante conhecer o perfil de variação radial de características do pinho bravo à flexão, desde a zona de cerne puro, passando pela mistura de cerne e borne e finalmente amostras só de borne. Para este conjunto de ensaios partiu-se de uma prancha representativa do que é habitual encontrar na transformação industrial do pinho bravo. Assim, prepararam-se 10 provetes de pinho bravo retirados lado a lado de uma mesma prancha, tal como representado em secção transversal na Figura 4.92, com vista a seu ensaio à flexão estática. As taxas de crescimento eram semelhantes, sendo as variações de massa volúmica devidas essencialmente à presença de substâncias extractivas e espessura da parede celular (725 kg/m^3 nos elementos de 100 % cerne, até 635 kg/m^3 para os elementos de 100 % borne). Embora tratando-se de madeira de uma mesma prancha e sem defeitos, os resultados do módulo de elasticidade à flexão revelaram-se diferentes, Tabela 4.25, mas seguindo um padrão previsível e consistente. A correlação do módulo de elasticidade com a massa volúmica e com a taxa de crescimento é quase perfeita.

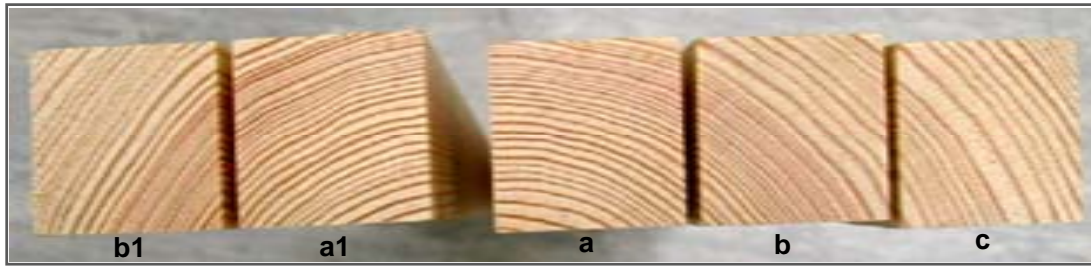


Figura 4.92 - Padrão de crescimento de pinho bravo para a série de ensaios do módulo de elasticidade.

Tabela 4.25 – Exemplo de variação de rigidez à flexão do pinho bravo, em função da localização numa mesma prancha.

	Cerne / borne	Cerne	Cerne	Cerne / borne	Borne
Massa volúmica (kg/m ³)	650	725	713	705	635
Módulo de elasticidade (MPa)	16 435	17 545	17 100	17 775	16 110

A simples observação visual das camadas de crescimento, singularidades e defeitos, e se possível, os valores da massa volúmica, são indicadores importantes para ter uma ideia relativamente segura do comportamento mecânico do pinho bravo. No estudo correspondente à representação da Figura 4.92, para o provete (*a*) a madeira tem uma taxa de crescimento maior, a que corresponde uma menor textura (também menor número de camadas de crescimento por centímetro), resultando um valor de módulo de elasticidade de $E = 17\,100$ MPa, inferior ao do provete (*b*), que apresentando maior densidade e correspondente maior valor da textura, deu um valor de módulo de elasticidade de $E = 17\,7$ MPa.

No exemplo da Figura 4.93 encontram-se os topos de provetes de pinho bravo também submetidos a ensaio de determinação do módulo de elasticidade à flexão de madeira sem defeitos. Foram escolhidas duas amostras representativas de dois casos quase extremos de variação da taxa de crescimento e da textura, com a correspondente diferença nas massas volúmicas. O resultado relativo aos valores do módulo de elasticidade à flexão é elucidativo do que se tem vindo a afirmar, ou seja, a forte correlação entre a textura e a resistência mecânica. As diferenças de massa volúmica nalguns exemplares, só por si, pode não ser suficiente para justificar todas as diferenças de comportamento mecânico, pois a maior ou menor quantidade de extrativos altera fortemente a massa volúmica sem significar maior quantidade de material estrutural activo (número e espessura de parede das células).

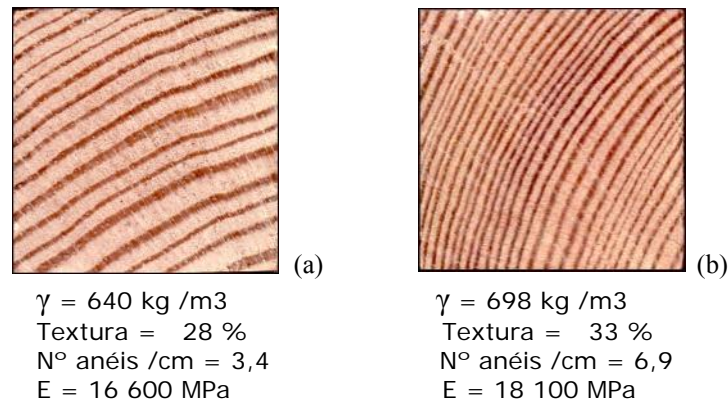


Figura 4.93 – Exemplos de diferentes valores do módulo de elasticidade do pinho bravo em função da massa volúmica e outros indicadores visuais.

Como resultado acumulado de várias dezenas de ensaios do módulo de elasticidade à flexão para pinho bravo sem defeitos, várias densidades e proveniências, com o máximo aproveitamento das pranchas de origem, apresenta-se a Tabela 4.26 os valores submetidos a tratamento estatístico.

Tabela 4.26 – Resumo de valores do módulo de elasticidade à flexão encontrados experimentalmente para o pinho bravo sem defeitos.

Média	16 794	MPa
Máximo	18 102	MPa
Mínimo	13 860	MPa
Desv. padrão	1 170,8	MPa
CV	7,0 %	%
5º percentil inferior	14 985	MPa

4.7.3 Distância entre apoios e aplicação de cargas

Todas as normas de ensaio laboratorial de flexão estabelecem uma distância entre apoios relacionada com a altura da secção do provete. No caso da norma EN 408, para o ensaio com aplicação de carga em dois pontos (também designada flexão a quatro pontos, contando os apoios), a distância entre apoios é estabelecida como 18 vezes a altura da secção. Os valores do módulo de elasticidade são assim estabelecidos para uma relação bem determinada com as características do perfil, mas nas aplicações práticas as estruturas de madeira têm toda a

variedade de vãos. Esta liberdade tem de ser dada em benefício das aplicações específicas e da exigência estética, mas como não pode ficar em risco a segurança da estrutura, deve conhecer-se a variação do módulo de elasticidade quando os valores reais de relação entre o vão e a altura do perfil não são idênticos aos que levaram ao estabelecimento dos parâmetros de cálculo. Com este objectivo realizou-se uma sequência de ensaios com determinação do módulo de elasticidade à flexão, em função de diferentes distâncias entre apoios para uma mesma altura da secção, começando pelas distâncias maiores. Cada sequência de ensaios foi realizada com um mesmo provete, no sentido de evitar a interferência perturbadora da variabilidade da própria madeira e tendo em conta que para pequenas deformações a madeira mantém a sua rigidez relativa e capacidade de recuperação elástica, tendo-se mantido um intervalo de tempo, entre ensaios sucessivos, suficiente para que tal recuperação ocorresse, pelo menos duas horas). O resultado obtido é o apresentado na Figura 4.94. Constatou-se que o valor de vão de 18 vezes a altura da secção dá os valores mais elevados, que se mantêm sem grande alteração para distâncias ligeiramente maiores, mas que para distâncias curtas a proporcionalidade entre a carga e a deformação correspondente carece de uma correcção do módulo de elasticidade.

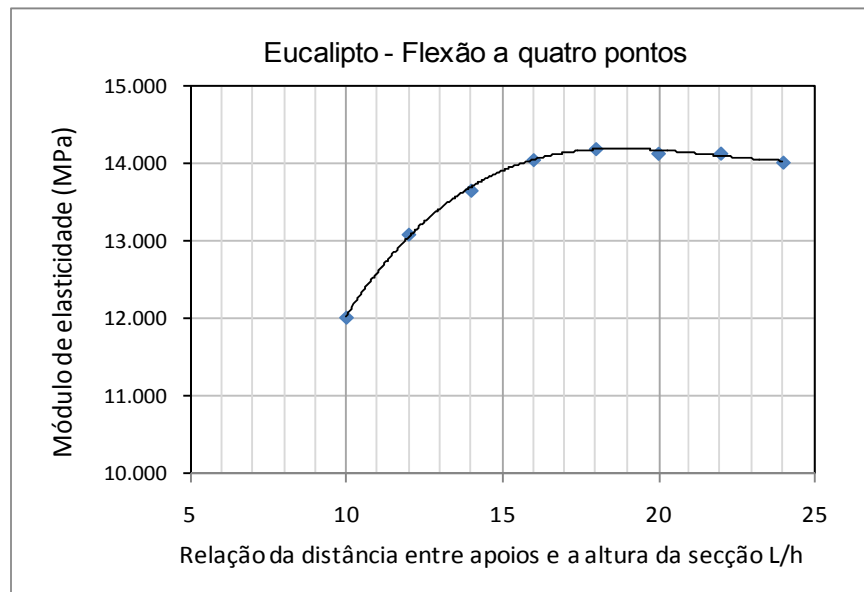


Figura 4.94.- Módulo de elasticidade global em função da relação entre a distância entre apoios e a altura da secção.

Como se afirmou anteriormente, o encurtamento gradual do vão relativamente à altura da secção do provete afecta o valor do módulo de elasticidade. Isto deve-se ao facto de, nas pequenas distâncias, começar a haver uma influência crescente das tensões de corte, que por

equilíbrio estático (não rotação do provete elementar), aparecem nas direcções transversal e paralela às fibras. Esta manifestação das tensões de corte e da elasticidade ao corte foi explorada pela norma EN 408 para determinar o módulo de corte. Recorde-se que para determinação gráfica de um dos parâmetros para aquela determinação é feito um gráfico representativo de ensaios de flexão a três pontos com distâncias entre apoios de $20xh$ até $5xh$ (exemplo na Figura 4.71, na Secção 4.5.4).

A norma EN 408 estabelece três diferentes procedimentos para a determinação do módulo de elasticidade à flexão, dependendo da aplicação de um ou dois pontos de aplicação de carga, e ainda três possibilidades de leitura das flechas de deformação. Dentro das combinações possíveis a norma define três grandezas para avaliação da rigidez à flexão: - o módulo de elasticidade global, em a aplicação de carga é feita em dois pontos a $1/3$ e $2/3$ do vão respectivamente e a flecha medida a meio vão tendo como referência a base dos pontos de apoio; - o módulo de elasticidade aparente com um único ponto de aplicação de carga a meio do vão e a flecha total medida a meio do vão relativamente aos apoios; - e o módulo de elasticidade local, em que são aplicadas duas cargas a $1/3$ e $2/3$ do vão, mas a flecha é medida dentro da zona de momento flector puro entre uma distância centrada de $5/18$ do vão. Estas formas de avaliação dependem também de expressões matemáticas de cálculo diferentes que aplicadas a um mesmo lote de provetes de pinho bravo (massa volúmica 685 kg/m^3), em ensaios perfeitamente dentro da zona elástica, dão valores significativamente diferentes como se mostra com os resultados experimentais, Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Valores do módulo de elasticidade global, módulo de elasticidade local e módulo aparente de elasticidade para o pinho bavo

Pinho bravo	(MPa)
Módulo de elasticidade global	17 474
Módulo de elasticidade local	20 319
Módulo aparente de elasticidade	9 781

4.7.4 Tensões nas camadas externas

No ensaio de flexão o módulo de elasticidade é calculado por expressões matemáticas, não sendo evidente graficamente a presença da lei geral da elasticidade, lei de Hooke. Na realidade existe, tal como para os ensaios de tracção e compressão, uma relação entre a tensão do material e a correspondente deformação relativa. Esta proporcionalidade da deformação com o esforço imposto encontra-se disponível para fácil medição nas camadas externas dos elementos

submetidos ao esforço de flexão. Para confirmar esta dedução com base nos conhecimentos teóricos foram colocados dois extensómetros, um na camada superior do provete e outro na camada inferior, tal como representado esquematicamente na Figura 4.95. Os extensómetros foram colocados na direcção paralela das fibras da madeira, numa zona interior à da aplicação das cargas, onde as tensões se mantêm constantes e é também constante o momento flector. O valor lido pelo extensómetro foi dividido pelo seu comprimento de referência ou nominal, resultando um valor adimensional que designamos por deformação relativa.

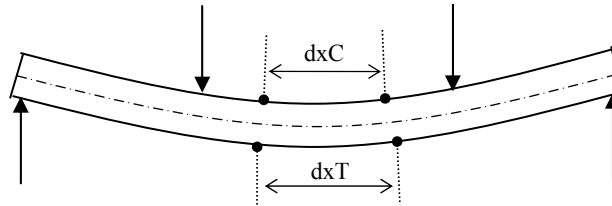


Figura 4.95.- Medições da deformação relativa da camada superficial no ensaio de flexão.

Os resultados dos ensaios feitos segundo a montagem mostrada na figura anterior é o mostrado na Figura 4.96. A primeira constatação interessante é a quase perfeita simetria das deformações relativas na zona de compressão e na zona de tracção, embora os módulos de elasticidade à compressão e à tracção paralelas, determinados em ensaios específicos ao longo deste trabalho, sejam ligeiramente diferentes entre si. Também neste ensaio os valores do módulo de elasticidade à compressão paralela e à tracção paralela nas camadas extremas, determinados pela representação gráfica, são ligeiramente diferentes entre si, mas uito superiores aos valores encontrados nos ensaios de compressão no provete inteiro.

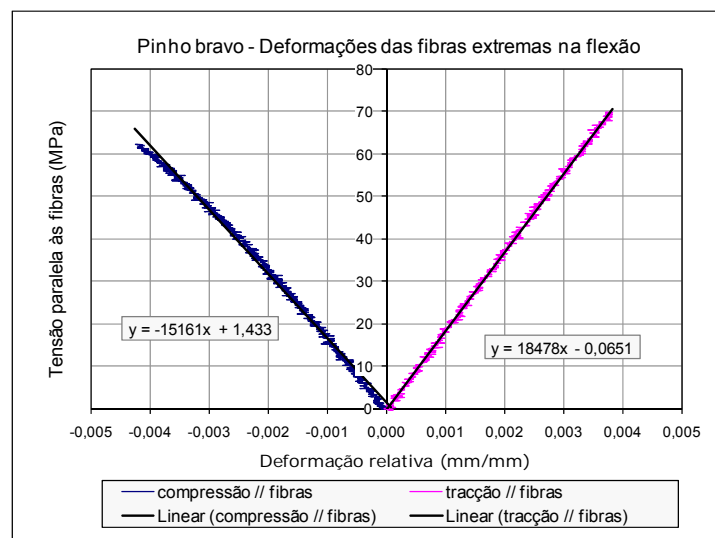


Figura 4.96.- Deformações das camadas extremas no ensaio de flexão de um provete de pinho bravo.

Na Figura 4.97 apresenta-se o resultado da determinação do módulo de elasticidade à compressão paralela para um provete de eucalipto, obtido através da colocação de um extensómetro na camada superior, na zona de momento flector puro (entre as duas cargas aplicadas superiormente), de um provete em flexão a quatro pontos. Esta determinação gráfica do módulo de elasticidade à compressão paralela naquela camada deu um valor de $E = 23\,205$ MPa. Para o mesmo provete, o módulo de elasticidade global à flexão, calculado pelo procedimento e fórmulas definidas na norma EN 408, deu um valor de $E = 18\,200$ MPa.

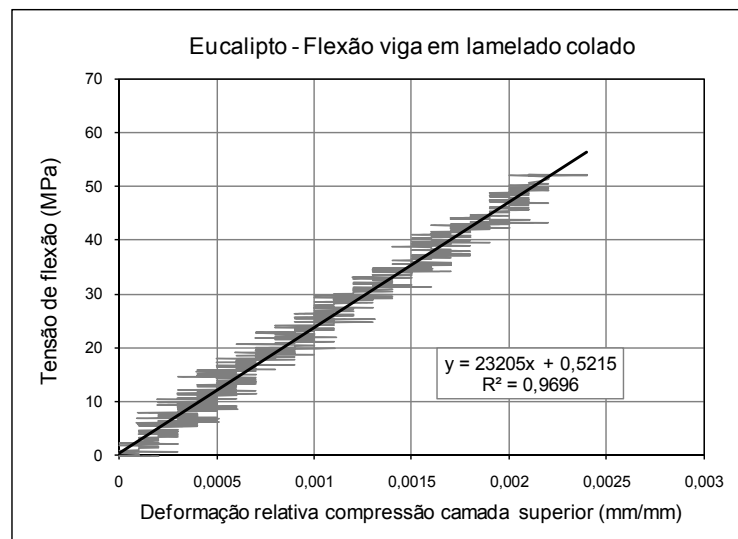


Figura 4.97.- Deformação relativa e módulo de elasticidade da camada extrema do lado de cima, no ensaio de flexão de um provete de eucalipto.

4.7.5 Ensaio de flexão de provetes de perfil modificado

A aplicação de componentes à flexão é das mais generalizadas para a madeira e em que esta tem um desempenho mais competitivo comparativamente com outros materiais estruturais correntes, sobretudo se forem tomados em conta as relações peso próprio / resistência, e ainda a relação entre capacidade resistente e custos dos componentes e da sua instalação. O que preocupa por vezes os projectistas estruturais é a margem de imprevisibilidade do comportamento da madeira, em parte pela possível presença de defeitos indetectáveis, com forte influência na resistência e rigidez à flexão dependendo da sua localização na secção. Também é importante analisar e quantificar a influência de modificações introduzidas nos perfis para permitir ligações, como é o caso da abertura de furos e rasgos para sistemas de fixação e encaixe de outros componentes do conjunto estrutural. Foram realizados alguns ensaios com provetes de flexão modificados,

nomeadamente à flexão com abertura de rasgos laterais em diferentes alturas e profundidades, e ainda as colagens (ou a sua falha) em diferentes localizações do comprimento.

É bem conhecida da resistência dos materiais, a optimização dos perfis para resistir à flexão com menor quantidade de material e menor peso próprio, nomeadamente através dos perfis em I e em H, solução generalizados para as vigas metálicas. Para madeira tornava-se necessário saber a implicação da redução de secção na zona central do perfil, tanto na perda de rigidez como na possibilidade de ruptura por compressão no banzo superior ou por corte paralelo na zona reduzida central. Na Figura 4.98 apresentam-se as secções sucessivamente modificadas de um mesmo provete de pinho bravo de boa qualidade e densidade média a elevada (cerca de 600 kg/m³). O mesmo provete foi ensaiado à flexão com a secção inteira (a), até uma carga correspondente a 50 % da previsível carga de cedência. Depois de um período de estabilização de algumas horas entre ensaios, o mesmo provete foi ensaiado com um rasgo lateral sucessivamente modificado, perfis (b) e (c) respectivamente, Figura 4.98, com a mesma profundidade mas diferentes alturas do rasgo.

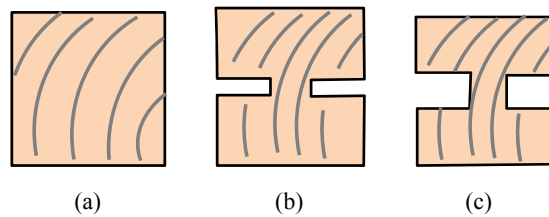


Figura 4.98 – Valores do módulo de elasticidade global, em provete modificado com abertura de um rasgo lateral.

Os resultados do ensaio correspondente à figura anterior são apresentados na Tabela 4.28, onde foi possível confirmar estudos exploratórios anteriores, que indicavam que um rasgo lateral a meia altura da secção (mesmo ficando a largura local reduzida e 33 % da inicial, e se for de pequena altura), afecta muito pouco a rigidez do componente.

Tabela 4.28 – Valores do módulo de elasticidade com provete de secção sucessivamente modificada.

Pinho bravo		(MPa)
Módulo elasticidade à flexão		
Provete inteiro (650x35 x 35 mm ³)	(a)	15 500
Secção central com 33 % da largura e 2,5 mm de altura do rasgo	(b)	14 300
Secção central com 33 % da largura e 6,25 mm de altura do rasgo	(c)	14 125

Na Figura 4.99 mostra-se a montagem para o ensaio de flexão dos provetes com rasgos laterais. Nos ensaios até ruptura destes provetes com rasgos laterais, registou-se que a ruptura dava por compressão tanto paralela às fibras como transversal às fibras, próximo das zonas de aplicação das duas cargas superiores. Isto aconteceu de uma forma mais acentuada do que acontece por vezes também com provetes de secção inteira.

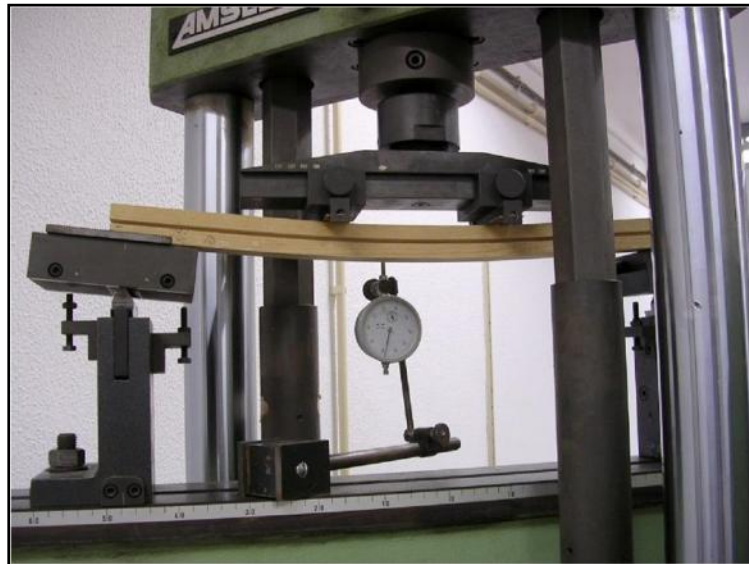


Figura 4.99 – Montagem para o ensaio de flexão do provete com rasgos laterais.

No sentido de avaliar os limites da resistência devida às tensões de corte paralelo, foi realizada uma sequência de ensaios de flexão com uma redução cada vez maior da secção resistente (maior profundidade do rasgo). Os rasgos laterais foram cortados com pequena altura, (1,9 mm) para se concentrarem o mais possível no plano da linha neutra, onde as tensões de compressão e de tracção são de menor intensidade e onde as tensões de corte são mais elevadas. As superfícies de ruptura apareceram nos extremos dos provetes, prolongando-se até perto do ponto de aplicação de carga desse mesmo lado, com uma configuração típica semelhante ao que é mostrado na Figura 4.100. Para atingir a ruptura por corte paralelo foi necessário reduzir a largura da secção central até menos do que 20 % da largura total. A superfície de ruptura afasta-se do plano da linha neutra, por razão de encontrar planos de resistência mais fraca orientados segundo as camadas de crescimento na zona da camada de lenho inicial. Foi importante registar que, com frequência, a ruptura não se dava pela secção geométrica de menor área.

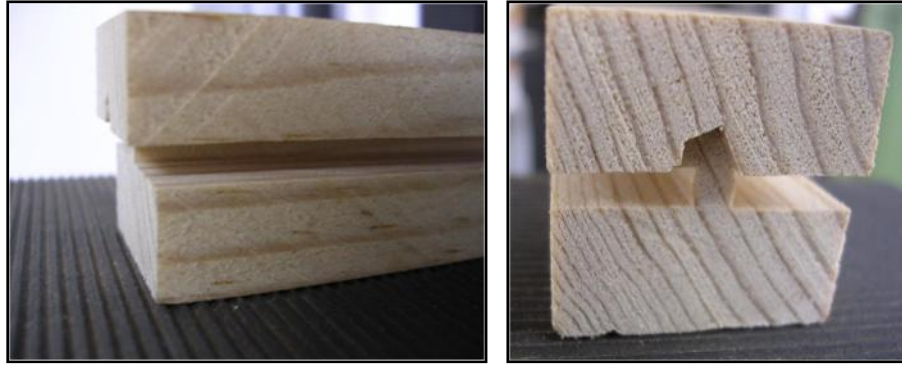


Figura 4.100 – Superfície irregular de cedência por corte paralelo no ensaio de flexão.

Perante os resultados anteriormente descritos podem tirar-se algumas conclusões importantes para a aplicação prática de madeiras em aplicações estruturais à flexão, como sejam:

- (1) As tensões de corte têm menor importância do que as de tração e de compressão porque em geral a área dos esforços rasantes é muito elevada relativamente ao necessário para mater a capacidade resistente;
- (2) A optimização do perfil em I ou em H para madeira tem de ser utilizada com reserva tomando em conta que se pode dar o esmagamento por compressão transversal na zona de aplicação de cargas (ainda mais acentuado nos provetes que têm o rasgo mais perto da face superior);
- (3) A ligação de componente num entalho a meia altura da viga não afecta grandemente a capacidade resistente à flexão;
- (4) Numa viga composta por colagens sobrepostas (lamelado colado), a superfície de colagem não é o ponto mais crítico em nível de esforço.

Outro aspecto interessante avaliado experimentalmente, em ensaios de flexão, foi quantificar a maior ou menor importância da eficácia da colagem na rigidez e na resistência de um perfil composto por dois elementos sobrepostos. Como já se afirmou anteriormente, a rigidez à flexão depende das tensões de corte e do correspondente módulo de corte, que se manifesta na direcção paralela às fibras. O ensaio realizado consistiu em sobrepor conjuntos de dois perfis de módulo de elasticidade à flexão conhecidos e fazer colagens a partir dos extremos, mas até determinada distância desses extremos, nomeadamente até $1/3$ e $1/9$ do vão a partir de cada uma das extremidades, tal como mostrado em esquema nas Figuras 4.101 e 4.102 respectivamente.

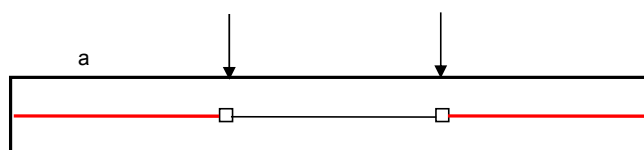


Figura 4.101 – Provete composto para ensaio de flexão, com zona colada a 1/3 do comprimento.

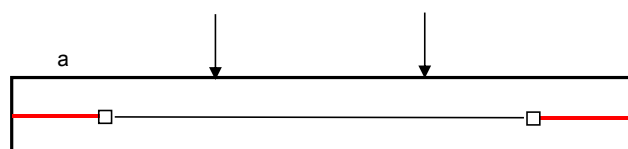


Figura 4.102 – Provete composto para ensaio de flexão, com zona colada a 1/9 do comprimento.

Os resultados dos ensaios anteriormente explicados, com colagens numa camada situada na meia altura do perfil, para diferentes comprimentos a partir dos extremos do vão, deram valores indicados na Tabela 4.29. Registe-se que, para evitar a dispersão pela variabilidade da madeira, esta tabela corresponde à mesma madeira ou amostras retiradas de uma mesma posição relativa de uma mesma prancha. Quanto aos resultados, foi surpreendente que mesmo não havendo colagem numa zona entre os dois pontos de carga superiores, Figura 4.101 (colagem a 1/3 dos extremos), o valor do módulo de elasticidade do conjunto manteve-se semelhante ao da madeira maciça (cada metade avaliada separadamente), e num ensaio pontual até superou a rigidez original de um dos elementos. Quando se reduziu a zona colada para 1/9 do comprimento do vão a partir dos seus extremos, o módulo de elasticidade sofreu uma quebra, mas ainda com valor significativo de rigidez, tendo em conta a limitada zona colada.

Tabela 4.29 – Valores do módulo de elasticidade do pinho bravo à flexão com provetes compostos com colagens parciais.

Pinho bravo - Módulo de elasticidade à flexão		
Média da madeira de origem	18 500	MPa
Colagem a 1/3 do vão nos extremos	19 000	MPa
Colagem a 1/9 do vão nos extremos	12 500	MPa

Relativamente aos ensaios anteriores atingiram-se valores de flechas de deformação de $L/80$ (curvatura já muito significativa) sem se dar a cedência. Recorde-se que o máximo permitido em cálculo estrutural pelos eurocódigos e por razões de segurança e estéticas é uma flecha de

L/300. Como conclusão podemos afirmar que as tensões de corte dificilmente serão responsáveis pela cedência na flexão e ainda que qualquer falha do material ou deficiência da colagem na zona entre cargas e a meio da altura do perfil pouco afectam a rigidez e segurança do elemento à flexão. Estes resultados estão de acordo com as conclusões obtidas pelos ensaios à flexão dos provetes com rasgos laterais a meia altura, explicados na secção anterior, onde a indução da ruptura por corte na superfície central exigia uma redução drástica da largura central num perfil tipo H.

4.8 Fluência

No caso dos componentes estruturais em madeira, o efeito mais visível e de maior risco é o resultante do esforço de flexão, que se traduz num cálculo da flecha e resistência se a carga tiver uma duração limitada a horas ou minutos, ou a um comportamento de fluência em flexão, se a carga permanecer constantemente aplicada durante longo tempo, meses ou anos.

Para realização do estudo experimental de fluência foi concebido um equipamento consistindo basicamente numa mesa onde se produz a flexão em quatro pontos, dois dos quais correspondem aos pontos das acções e outros dois referentes aos apoios. A aplicação de carga foi feita com massas de ferro, ou também chamados “pesos mortos”. Este equipamento e princípio de funcionamento foi original dado que não foram encontradas referências bibliográficas que permitissem seguir-se orientações de experiências já realizadas. O detalhe das características encontra-se descrito mais adiante na Secção 4.8.2.

Os provetes utilizados para os ensaios de fluência tinham dimensões semi-industriais (comprimentos até cerca de 1,8 m). O equipamento tem possibilidade de regulação de diferentes parâmetros (intensidade da carga, tipo de carregamento, utilização com diferentes dimensões dos provetes, regulação das posições dos pontos de aplicação de carga e dos apoios), sendo avaliada a flecha de deformação ao longo do tempo, a intervalos pré-estabelecidos. Foram realizados ensaios em vigas maciças e lamelados colados, de pinho bravo e eucalipto. No estudo realizado avaliou-se o comportamento à fluência num período de três anos, em ambiente interior, consequentemente com pequenas variações ambientais humidade e temperatura ao longo do ano.

4.8.1 Análise experimental

Na realidade, torna-se difícil e demorado fazer uma caracterização do comportamento à fluência da madeira, tanto pelos inúmeros factores com influência no fenómeno (intensidade da carga

permanente, variação das condições termo-higrométricas do ambiente, características intrínsecas da própria madeira, tipo de esforço imposto, etc.), tudo agravado pelos prolongados períodos de tempo dos ensaios. Há também a dificuldade em ensaiar um elevado número de provetes, pois os equipamentos ficam ocupados por longos períodos de tempo.

No presente estudo, e para contornar o elevado número de parâmetros com efeito na fluência, optou-se pela realização de ensaios em condições relativamente estáveis de ambiente interior. No que diz respeito aos carregamentos permanentes optou-se por uma carga correspondente a cerca de 30% da carga máxima prevista para ruptura para provetes de madeira maciça, e carga correspondente a cerca de 20% da carga máxima prevista para ruptura para um conjunto de 10 provetes de madeira lamelada colada, de pinho e de eucalipto.

4.8.2 Concepção do equipamento

Para este estudo da fluência foram preparados dois equipamentos, um que consiste numa robusta bancada de ensaio fabricada com perfis metálicos soldados, dispoendo suportes com regulação da distância entre apoios do provete entre 1000 a 2800 mm, também com regulação da distância entre pontos de carregamento, podendo variar entre 340 e 560 mm, tal como representado esquematicamente na Figura 4.103. Os pontos de contacto do provete com os apoios e pontos de carregamento fazem-se por intermédio de cilindros com um diâmetro de 30 mm e uma pequena barra de ferro simplesmente presa entre a madeira e o cilindro. Para permitir a aplicação de carga durante vários meses optou-se por um sistema de pesos mortos. A força a aplicar ao provete para flexão resulta de um sistema de ampliação da carga imposta pelos pesos, através de um disco com duas golas a diferentes diâmetros, que amplia a carga 4,9 vezes. A ligação entre os pesos e o sistema de aplicação da carga sobre o provete, é feita por um sistema de cabos de aço com reduzido atrito, auxiliado por roldanas nos locais em que há variação da direcção das forças.

A deformação do provete foi monitorizada nos primeiros dias recorrendo a um sensor e sistema electrónico de aquisição frequente de dados e com a ajuda de um computador, para além de um comparador mecânico com um curso máximo de 50 mm para as medições mensais ao longo de vários anos, ambos com uma precisão de 0,01 mm.

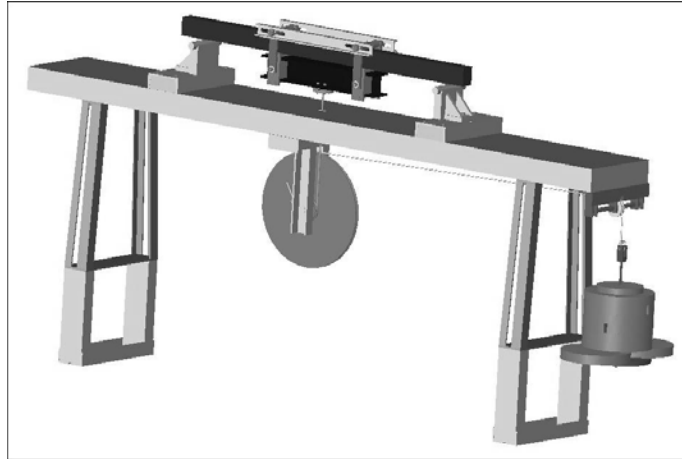


Figura 4.103 – Montagem da bancada de ensaios de fluência à flexão de um único provete.

Na Figura 4.104 mostra-se em detalhe a montagem de um provete de lamelado colado em pinho bravo, na bancada de ensaio de fluência. É bem visível a elevada flecha de deformação que corresponde à aplicação de uma carga de cerca de 30% da carga previsível de ruptura.



Figura 4.104 – Detalhe da mesa de ensaios de fluência com o provete de lamelado de pinho bravo.

Um segundo equipamento inovador foi concebido para permitir fazer um ensaio simultâneo de oito provetes com a utilização de uma mesma carga estática, Figura 4.105. Neste sistema, vários componentes metálicos permitem uma flexão oposta de cada conjunto de dois provetes, o que reduz para quase metade o número de peças necessárias e também o atravancamento total da montagem. Os sistemas digitais de medição da flecha foram ligados a um sistema de aquisição de dados, para armazenamento num computador através de um software concebido pelo Departamento de Electrónica da Universidade do Minho, que permite uma pré-

programação da sequência temporal de aquisição. Para garantir que uma inesperada cedência por eventual ruptura de um qualquer dos provetes pudesse colocar em risco todo o ensaio dos restantes provetes ou até a segurança dos operadores de laboratório, existem uma barras que se encontram articuladas com folga relativamente ao seu comprimento total quando orientadas em linha recta. Estas barras articuladas não interferem como ensaio, mas em caso de eventual cedência de um provete elas substituem a força suportada por este e permitem a estabilidade de todo o conjunto. O único inconveniente desta montagem é que as cargas aplicadas aos diferentes provetes não são exactamente iguais, ou seja, há que acrescentar sequencialmente os pesos dos elementos dos andares mais baixos aos provetes dos andares superiores (incluindo madeiras e acessórios metálicos), que embora não significativos foram levados em conta.

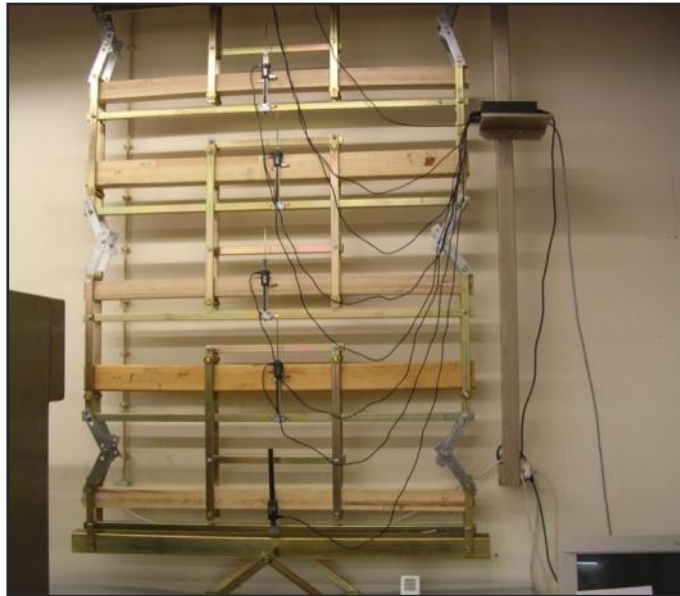


Figura 4.105 – Detalhe da mesa de ensaios de fluência com o provete de lamelado de pinho bravo.

4.8.3 Material e condições de ensaio de fluência

Os primeiros ensaios de fluência foram efectuados com provetes de madeira maciça de pinho bravo, de diferentes qualidades, alguns deles com lenho juvenil e pequenos nós aderentes. Os ensaios de fluência em madeira maciça foram precedidos de ensaios de flexão estática para determinação do módulo de elasticidade e tensão de ruptura em alguns dos provetes de um mesmo conjunto de características visuais semelhantes, tendo por objectivo a determinação do valor da carga de fluência a aplicar ao provete e que se estabeleceu dever ser proporcional à rigidez e resistência da amostra em estudo. Destes ensaios quatro provetes foram identificados

como apresentando os valores mais baixos do módulo de elasticidade. Destes quatro foi seleccionado um para o ensaio de fluência.

A Figura 4.106 mostra a aparência dos topos dos provetes, incluindo o M6, que foi o seleccionado para o ensaio de fluência. Este provete tinha uma massa volúmica de 620 kg/m^3 , e o seu lado “D” encontrava-se já perto da medula, contendo portanto algum lenho juvenil. Esta amostra não tinha qualquer nó visível, nem fendas e o fio era paralelo às arestas longitudinais.



Figura 4.106 – Topo do provete M6, de pinho bravo, utilizado no ensaio de fluência de madeira maciça.

O valor do módulo de elasticidade à flexão encontrado para este provete M6 foi de 6490 MPa para ensaio pelo lado “A” e de 6380 MPa para o ensaio realizado pelo lado “C”. Tratou-se portanto de uma madeira das menos resistentes utilizadas em todos nos ensaios realizados ao longo deste trabalho. Os ensaios de flexão até à rotura, para determinação do módulo de elasticidade em vigas fabricadas do mesmo lote da que foi submetida ao ensaio de fluência, permitiram recolher as principais propriedades de caracterização do provete submetido ao ensaio de fluência, conforme se apresenta no Tabela 4.30.

Tabela 4.30 – Condições de aplicação de carga permanente da viga de pinho bravo “M6”, para ensaio de fluência na flexão a quatro pontos.

Distância entre apoios (mm)	1300
Distância do apoio ao ponto de carga (mm)	430
Altura da secção (mm)	75,4
Largura da secção (mm)	80,8
Módulo de elasticidade calculado (MPa)	6490
Tensão máxima previsível à flexão (MPa)	75
Tensão no limite de elasticidade (previsível) (MPa)	25
Tensão constante real, resultante da carga (MPa)	27
Percentagem relativamente à carga máxima previsível	36%

Também foram determinados os módulos de elasticidade de provetes maciços e lamelados colados, com carregamento até valores de tensão não superiores a 25 % das tensões máximas

estimadas, de modo a poder relacionar a intensidade de cedência por fluência com as características próprias da madeira.

O fenómeno da fluência tem uma evolução de velocidade variável no tempo, muito rápida no início, estabilizando num período intermédio e voltando a acelerar em caso de descompensação de cargas, com aproximação à cedência.

Para melhor visualização do fenómeno de fluência, o tratamento de resultados apresenta-se em geral na forma gráfica. No eixo horizontal representa-se o tempo decorrido, mas em muitos estudos opta-se colocar neste eixo os valores do logaritmo do tempo decorrido, pois permite ver em detalhe a evolução na fase inicial e simultaneamente ter uma melhor visualização da tendência de evolução da deformação do provete a médio e longo prazo e até antecipar a previsão da sua cedência. Quando se pretende encontrar de novo o tempo determina-se o inverso do logaritmo.

No eixo vertical representa-se a flecha de deformação, mas de duas formas diferentes. Quando o tempo em observação é de alguns dias prefere-se colocar no eixo vertical a deformação total a partir do provete sem qualquer carga. Quando o tempo de referência é longo optou-se por colocar a deformação acrescentada por efeito da fluência. Em cada gráfico é dada a indicação precisa do critério utilizado.

4.8.4 Resultados experimentais

Na Figura 4.107 mostra-se o resultado do provete referenciado anteriormente e mostrado na Figura 4.106. O valor do logaritmo do tempo em minutos, quando igual a 12 corresponderia a um período de tempo de 113 dias. Por observação da tendência de inclinação da curva, percebe-se que a deformação iria aumentar desproporcionalmente, pelo que o tempo de integridade do provete nunca chegaria ao valor correspondente ao logaritmo de 13, que é de 300 dias. Na realidade este provete apareceu partido algumas semanas depois do último registo apresentado no gráfico.

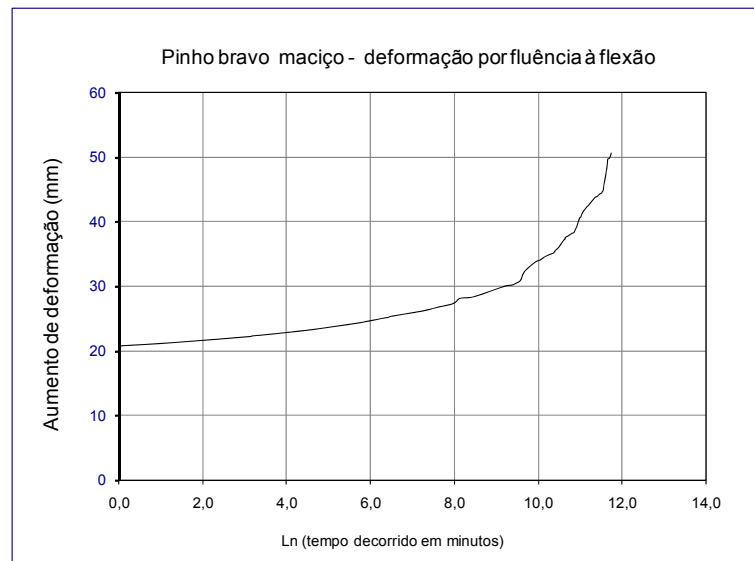


Figura 4.107 – Resultado do ensaio de fluência na viga em pinho maciço M6, ao fim de um período de 85 dias.

Na Figura 4.108 mostram-se os resultados dos ensaios dos restantes provetes de pinho bravo maciço. Neste gráfico teve-se em conta que o logaritmo neperiano igual a zero não corresponde ao momento de início do carregamento, ou seja, o momento zero para contagem do tempo.

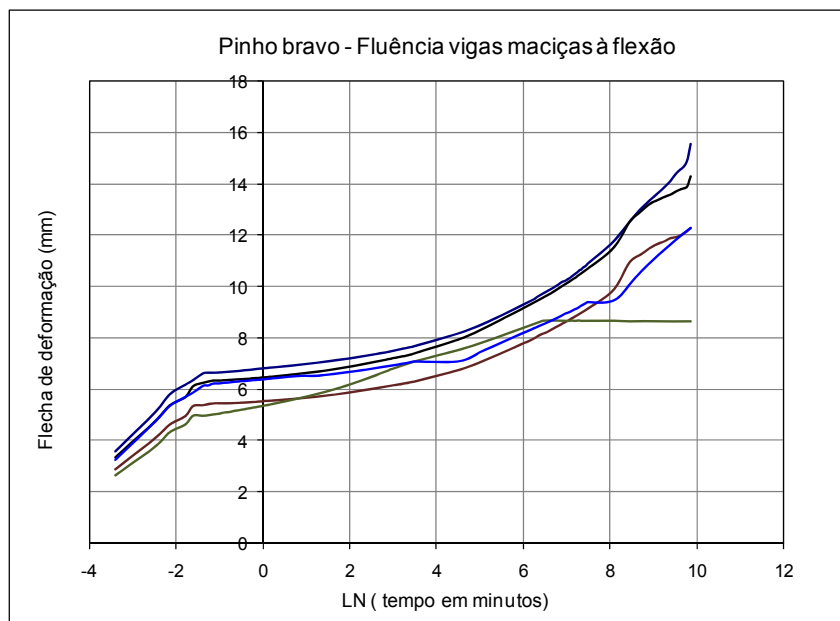


Figura 4.108 – Resultado do ensaio de fluência de provetes maciços de pinho bravo, ao fim de um período de 85 dias.

Embora a representação gráfica com o eixo do tempo decorrido em escala logarítmica tenha as vantagens descritas anteriormente, perde-se informação do detalhe no final da escala. Assim, a solução poderá ser a elaboração de diferentes gráficos, com intervalos de tempo reduzidos para os momentos em que se dão alterações das condições de carregamento ou das condições ambientais e utilizar os intervalos de tempo grandes apenas quando se pretende ter uma visão do comportamento a longo prazo. Nesta linha de abordagem construíram-se três representações gráficas com os dados de um mesmo ensaio. Dois dos provetes foram escolhidos de madeira com módulo de elasticidade relativamente baixo e dois provetes com módulo de elasticidade dos mais elevados que se encontrou do universo total das amostras de pinho. Na Figura 4.109 utilizou-se uma escala de tempo até 120 minutos, correspondendo ao início do ensaio de fluência.

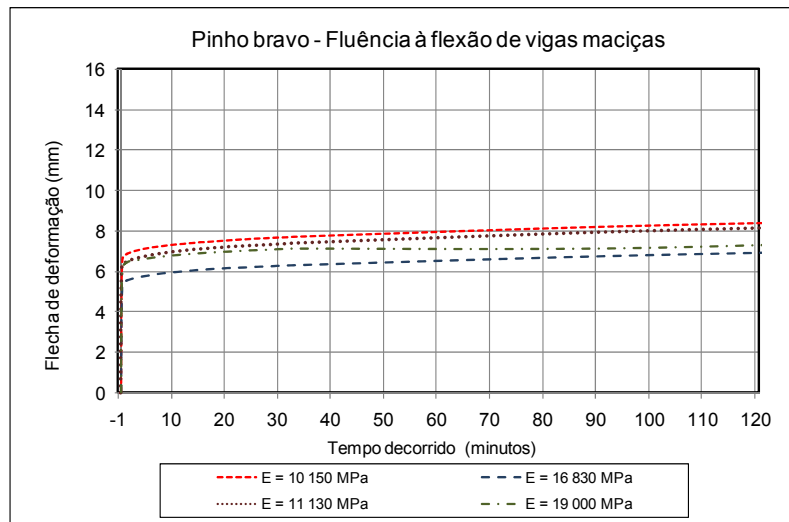


Figura 4.109 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.

Na Figura 4. 110, relativa aos mesmos provetes e mesmo ensaio a escala de tempo foi de 25 horas. Finalmente na Figura 4.111 a escala de tempo utilizada para a representação foi até aos 31 dias.

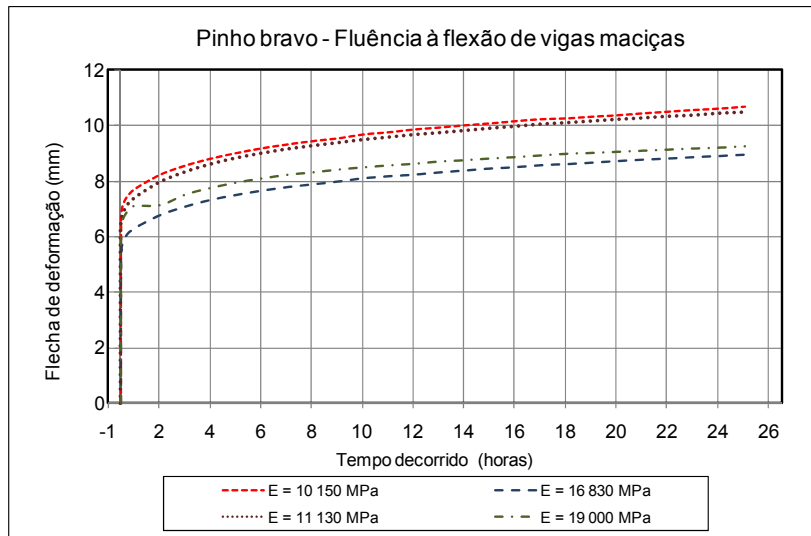


Figura 4.110 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.

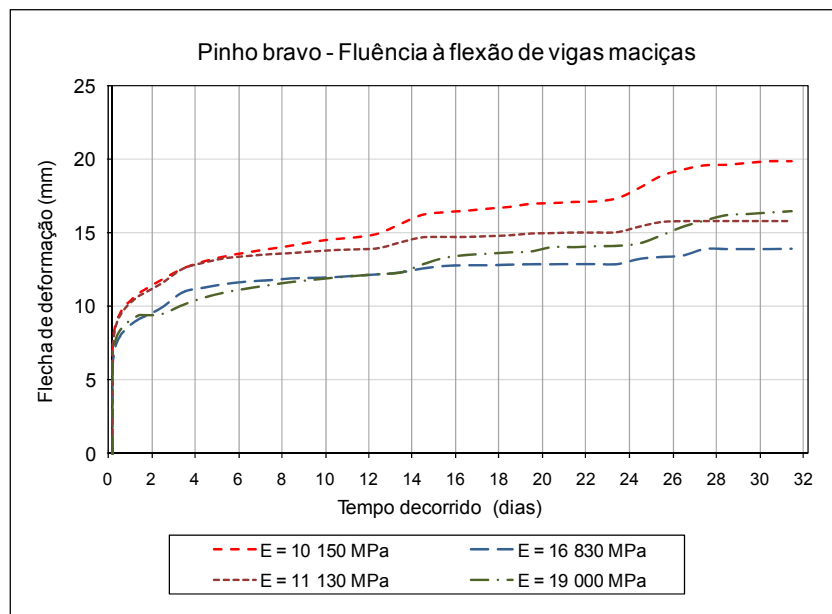


Figura 4.111 – Resultado do ensaio de fluência nas vigas em pinho maciço de diferentes densidades e rigidez.

Como se pode comprovar nos três gráficos anteriores, embora o ensaio seja o mesmo e com os mesmos provetes, a aparência da representação é muito diferente e cada gráfico tem uma particularidade de informação importante e complementar. Nas representações de minutos e de horas apenas se percebe a diferença de flecha devida à diferente rigidez de cada provete, ou seja, as curvas seguem a tendência da deformação inicial. Na representação à escala de um mês já se evidenciam as variações de deformação que dependem da variação de condições ambientais

(fluência mecano-sortiva) e também se torna claro que há uma tendência para o provete com módulo de elasticidade mais baixo sentir o efeito da fluência de forma muito mais acentuada. Aliás, como a carga imposta foi a mesma aos quatro provetes e estes tinham resistências próprias diferentes, isto corresponde, em percentagem, a condições de carga muito mais elevadas para os provetes mais fracos.

Na Figura 4.112 mostra-se o resultado de evolução da deformação devida à fluência para duas vigas em lamelado colado de pinho bravo, num período de tempo alargado de pouco mais de três anos, em ambiente interior. A tensão permanente correspondeu a cerca de $\frac{1}{4}$ da tensão previsível de cedência em ensaio de curta duração. Estes provetes tinham as superfícies protegidas com uma velatura e mesmo assim notou-se que nos períodos do ano correspondentes a maior humidade ambiente (Inverno) houve uma maior cedência de deformação que era sucessivamente recuperada no período mais quente e seco do Verão.

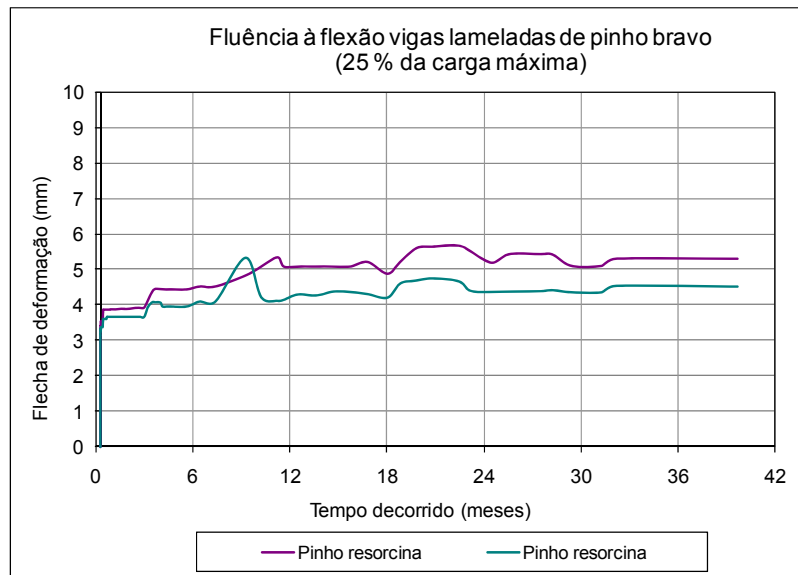


Figura 4.112 – Resultado do ensaio de fluência em duas vigas de lamelado colado de pinho bravo.

Na Figura 4.113 mostra-se o resultado de evolução da deformação devida à fluência para duas vigas em lamelado colado de eucalipto, num período de tempo alargado de pouco mais de três anos, em ambiente interior. A tensão permanente correspondeu a cerca de 30 % de tensão previsível que provocaria a cedência em ensaio de curta duração.

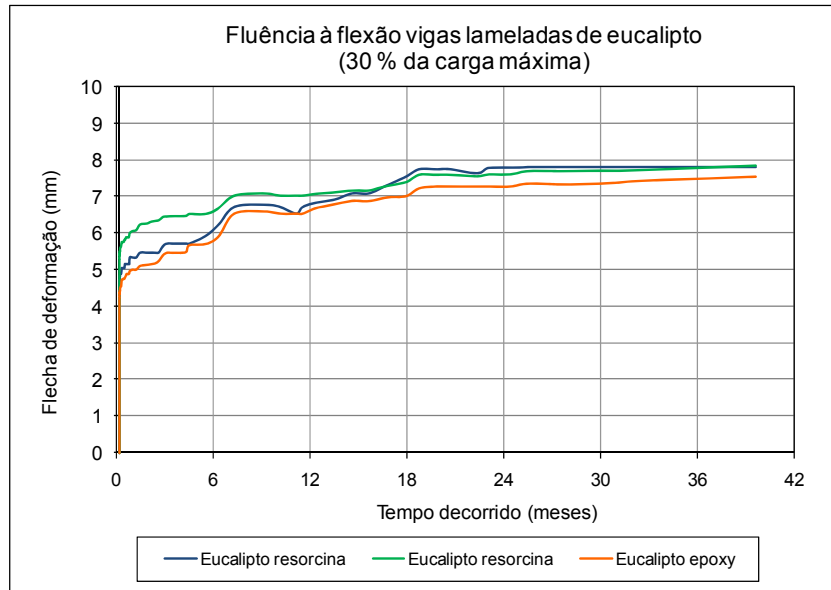


Figura 4.113 – Resultado do ensaio de fluência em três vigas em lamelado colado de eucalipto.

4.8.5 Reflexões sobre o modelo de deformação por fluência

A primeira conclusão a tirar desta sequência de ensaios experimentais, talvez a mais importante, é que para componentes estruturais em madeira, maciça ou em lamelado colado, cargas permanentes de 20% a 30 % da carga previsível de rotura, são cargas excessivas, podendo levar a flechas importantes não admissíveis visualmente, ou mesmo ao colapso num prazo de dois a três anos. Por exemplo para o ensaio nas condições da Tabela 4.30 e representado na Figura 4.107, a flecha inicial foi logo de 27 mm, quando a flecha limite admitida pelas regras de dimensionamento do Eurocódigo baseado na norma EN 408 seria de 4,3 mm se for seguida a regra da flecha não poder ser superior a $L/300$.

Outra indicação relevante do comportamento mecânico de um determinado elemento estrutural de madeira, nomeadamente à fluência, é o que pode ser avaliado através da observação visual do topo e superfícies laterais do componente em madeira. Por exemplo, a taxa de crescimento, a proximidade à medula ou ao lenho juvenil, a presença de nós, o fio diagonal, ou outras anomalias, têm um efeito decisivo na falha por efeito da fluência. Existe uma clara relação entre o módulo de elasticidade e a capacidade de suportar em boas condições uma carga permanente de longa duração.

A forma gráfica de apresentação com o tempo decorrido em abcissas na forma logarítmica, permite avaliar a tendência de evolução da capacidade de suportar a carga a longo prazo. A inversão da concavidade da curva para a posição vertical, significa que se deu um

desequilíbrio e também que a velocidade de deformação tende a aumentar no sentido da cedência do componente em ensaio (ou em serviço).

Capítulo V

Interpretação dos resultados. Modelos

5.1 – Introdução

Como se viu nos capítulos anteriores o comportamento mecânico da madeira é extremamente trabalhoso de caracterizar, tanto pela variabilidade de espécie para espécie, como dentro de cada espécie, como ainda do local de proveniência do material de uma única árvore. Se por um lado a madeira é dos materiais estruturais mais eficientes se tomarmos em conta o seu peso próprio relativamente à sua capacidade de suportar cargas, por outro lado essa boa eficácia é variável de acordo com o tipo de esforço exigido e da sua direcção da aplicação, como é próprio dos materiais orientados. Em suma, a madeira é um material ortotrópico, com estrutura interna orientada não só segundo uma geometria linear (direcção das fibras), mas também numa geometria circular (material formado por camadas concêntricas). Nesta formação por camadas contam-se ainda dois materiais de características diferentes que são o lenho inicial e o lenho final, que a maior parte das vezes se apresentam em proporções com elevado grau de variabilidade relativamente a um padrão médio.

É com os condicionamentos referidos no parágrafo anterior que mesmo assim se torna necessário definir modelos que permitam melhor compreender e prever o comportamento mecânico da madeira. Enquanto, com materiais homogêneos, a elasticidade determinada numa única direcção e tipo de ensaio simples (normalmente tracção), é um bom indicador para a previsão das restantes propriedades necessárias ao projecto e cálculo estrutural, no caso da madeira, mesmo tratando-se de amostras sem defeitos, as estimativas do comportamento mecânico passam no mínimo por uma atenta observação visual, pelo conhecimento da massa volúmica para um teor em água conhecido, e, pelo menos, do comportamento elástico à flexão e de uma característica indicativa da coesão transversal., Estudos muito recentes, tais como (Frese, 2008), defendem uma boa aproximação à caracterização mecânica para fins estruturais da madeira, apenas com a observação visual, o conhecimento da densidade e do módulo de elasticidade dinâmico (determinado pela velocidade de propagação do som).

As características físicas e mecânicas da madeira variam regularmente do centro geométrico do tronco para a sua periferia segundo um padrão razoavelmente caracterizado e confirmado em muitos dos ensaios realizados no Capítulo IV desta tese.

Ao caracterizar a madeira de uma forma genérica para utilização corrente, pode ser suficiente uma avaliação média das suas propriedades, através da utilização de algumas amostras de ensaio de grandes dimensões, onde as variações naturais e pequenos defeitos localizados ficam distribuídos. Outra possibilidade consiste no recurso a um elevado número de amostras da matéria-prima base dos elementos construtivos, sendo os resultados sujeitos depois a tratamento estatístico, com a respectiva caracterização e definição dos valores de segurança para cálculo estrutural, que depois se aplicam a todas as dimensões de madeira e elementos colados através de relações pré-estabelecidas. As normas Europeias mais recentes para cálculo de estruturas (EN 1194:2002 – Anexo B, Quadro B.2), já reflectem esta abordagem quando definem uma relação entre as classes de resistência do lamelado colado combinado em função das classes de resistência das lamelas utilizadas na sua fabricação, segundo a classificação definida na norma EN 338. Por exemplo, para a madeira lamelada-colada da classe GL24 podem ser utilizadas lamelas de classe C24 nas faces superior e inferior, e lamelas de classe C18 nas camadas interiores.

Para uma compreensão mais rigorosa do comportamento mecânico da madeira, mesmo da madeira sem defeitos, é necessário considerar um modelo mais próximo da realidade, tendo em conta que este material é formado, nos climas temperados, por sobreposição de camadas alternadas de dois elementos com propriedades diferentes, lenho inicial e lenho final. Para elaboração do modelo devem considerar-se pelo menos três grupos de variáveis:

- (1) a variação mais ou menos regular devida ao afastamento do centro geométrico das camadas de crescimento, incluindo células diferentes desde o lenho juvenil ao lenho adulto;
- (2) o raio de curvatura das sucessivas camadas, o que condiciona uma certa distribuição das tensões mecânicas; e a espessura relativa de cada uma das camadas.
- (3) a aplicação de forças sobre a madeira, incluindo a intensidade, a direcção, duração e velocidade de aplicação dessas forças.

Nos parágrafos seguintes faz-se uma avaliação do efeito da anisotropia da madeira relativamente ao seu comportamento real, para as características que mais são afectadas por esta constituição irregular da madeira, seja, nas tracções e compressões nas direcções paralela e perpendicular às fibras e ainda ao corte paralelo. A madeira é um compósito, não só no ponto de vista microscópico, considerando os componentes básicos celulose e lenhina e ser um material

alveolado, mas também no ponto de vista macroscópico onde as diferenças de propriedades entre o lenho inicial e o final conferem à madeira o verdadeiro significado de um bi-material.

A modelação do comportamento da madeira pode ser feito em diferentes escalas e cada uma dará origem a estudos muito diferentes, embora os resultados tenham de ser coincidentes ou pelo menos compatíveis. Basicamente podem considerar-se teoricamente a escala atómica, micro, meso e macro. De outro modo, na escala micro atendemos a fenómenos à escala de 0,01 a 0,1 μm , ou seja das fibrilas às fibras da madeira, entre 0,01 mm e 0,1 mm falamos do se passa ao nível das células da madeira e das camadas de crescimento e entre 0,1 mm e alguns centímetros falamos de pequenas fendas, nós e desvios de fio. Os modelos de que se fala neste trabalho situam-se ao nível meso e macro, pois mais do que uma interpretação teórica do comportamento resistente da madeira foi dada prioridade às particularidades que afectam definitivamente a aplicação estrutural e a sua segurança.

5.2 Modelo para a tracção e compressão de um bi-material

5.2.1 Variação das propriedades ao longo do eixo de ensaio

Quando se submete à tracção pura no domínio elástico um bi-material, composto por dois elementos justapostos a topo, com a mesma secção e módulos de elasticidade diferentes entre si, Figura 5.1, o que acontece é que há uma deformação total resultante da soma das deformações de cada um dos materiais.

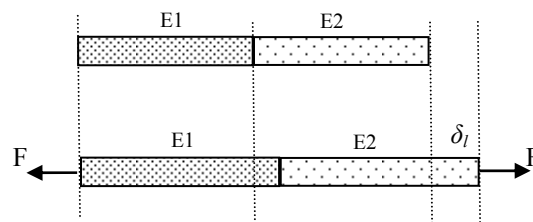


Figura 5.1 – Bi-material topo a topo sujeito a tracção pura.

A deformação total,

$$\delta t = \delta l_1 + \delta l_2 \quad (5.1)$$

sendo δ_t a deformação total e δ_1 e δ_2 as deformações de cada um dos elementos.

De acordo com a aplicação da lei de Hooke,

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{com,} \quad \varepsilon = \frac{\delta l}{l_0} \quad (5.2)$$

Resultando as deformações,

$$\delta_t = \frac{\sigma l_{01}}{E_1} + \frac{\sigma l_{02}}{E_2} \quad (5.3)$$

Tendo em conta que a tracção é feita no domínio elástico e desprezando as diferenças entre os coeficientes de Poisson dos dois materiais (o que é equivalente a manterem-se iguais as áreas das secções 1 e 2), deve concluir-se que a tensão de tracção é idêntica nos dois materiais e cada um deles suporta a carga total F.

A distribuição de forças é a seguinte,

$$F = F_1 = F_2 \quad \text{e} \quad \sigma_1 = \sigma_2 \quad (5.4)$$

Da expressão (5.3) conclui-se que se o material 1 tiver um módulo de elasticidade mais elevado do que o material 2, então a sua deformação é menor, embora se mantenham iguais as tensões de tracção. Se se chegar à rotura esta ocorrerá pelo material que atingir a sua tensão máxima em primeiro lugar, podendo ser ou não pelo material de módulo de elasticidade mais baixo e que por este motivo se deformou mais.

5.2.2 Variação de propriedades paralela ao eixo de ensaio

Quando um conjunto formado por dois materiais com diferentes módulos de elasticidade são colocados em paralelo e submetidos a uma carga única, a deformação é a mesma para os dois materiais, tal como mostrado no modelo da Figura 5.2.

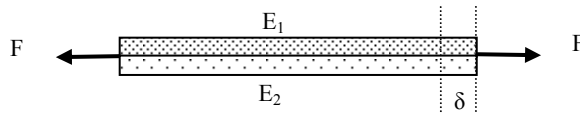


Figura 5.2 – Bi-material paralelo sujeito a tracção pura.

Tendo em conta que cada material solicitado individualmente teria uma deformação diferente, quando estão solidários em todo o seu comprimento haverá então um “arrastar” de um material pelo outro, ou seja, tensões de corte entre eles para se manterem com a mesma deformação total. Do mesmo modo cada um dos materiais está sujeito a uma tensão de tracção diferente. Não considerando para já as tensões de corte, irá ser demonstrado que a contribuição

dos dois materiais para suportar a carga total F é também diferente, sendo certo que um deles irá atingir a ruptura antes do outro.

Da aplicação das leis da elasticidade resulta,

$$\begin{aligned} \delta_1 = \delta_2 & \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \\ l_{01} = l_{02} & \end{aligned} \quad (5.5)$$

Na Figura 5.3 mostra-se a representação gráfica a situação em análise, onde se torna bem claro os diferentes níveis de tensão a que cada material se encontra submetido.

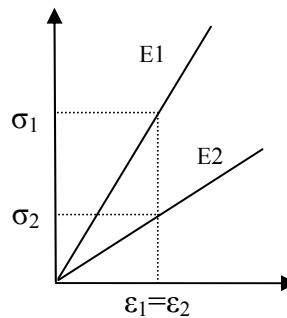


Figura 5.3 – Tensões e deformações para um bi-material.

Se,

$$E_1 > E_2 \quad (5.6)$$

então,

$$\sigma_1 > \sigma_2 \quad (5.7)$$

Dos elementos de reflexão descritos anteriormente conclui-se que sendo,

$$F_{\text{total}} = F_1 + F_2 \quad (5.8)$$

e da relação (5.4),

$$\frac{F_1}{E_1} = \frac{F_2}{E_2} \quad (5.9)$$

se obtém a relação,

$$F_1 = F_{\text{total}} \frac{E_1}{E_1 + E_2} \quad (5.10)$$

Se o material 1 tiver um módulo de elasticidade muito superior ao do material 2, a tensão a que está sujeito é também muito superior, condição (5.6), e passa portanto a ser este material a suportar quase sozinho toda a carga aplicada, equação (5.9).

Quanto à rotura, só depende do valor da tensão máxima de cada um dos materiais, e será atingida no material que apresentar a tensão máxima mais baixa, independentemente da deformação atingida.

5.2.3 Aplicação do modelo ao comportamento da madeira

Como referido no Capítulo II, a madeira é composta por uma sobreposição sucessiva de camadas cilíndricas concêntricas, correspondentes a diferentes fases de crescimento. Nas madeiras dos climas temperados, espécies Resinosas, as camadas de crescimento do início de estação (lenho de Primavera ou lenho inicial) têm uma densidade muito menor do que a camada formada em fim de estação (lenho de Outono ou lenho final), que em geral é de menor espessura. Estas diferenças de densidade devem-se a menor espessura das paredes celulares nas camadas de lenho de início de estação, portanto menor material resistente, o que causa valores mais fracos em todas as propriedades mecânicas.

Embora se reconhece claramente a macro-constituição da madeira como formada por dois materiais de características muito distintas, há óbvias dificuldades em definir exactamente as quantidades de lenho inicial e de lenho final, não só pela transição gradual entre as duas camadas, sobretudo na passagem de lenho inicial para final (no sentido do crescimento das camadas), como pela forma curva e irregularidades nas camadas, como se vê no exemplo mostrado na Figura 5.4.

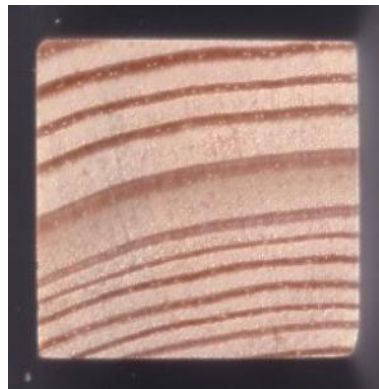


Figura 5.4 – Constituição em camadas do pinho bravo.

Se por um lado se revelaria de grande utilidade prática a caracterização independente dos dois materiais, lenho inicial e lenho final, as características geométricas, curvatura, distribuição irregular e variação gradual, tornam extremamente difícil avaliar as propriedades individuais de cada componente deste compósito natural que é a madeira.

O modelo do comportamento da madeira como um bi-material só é verdadeiro para espécies de climas temperados, em que se registre anualmente uma paragem vegetativa que produza uma clara e acentuada heterogeneidade do material formado ao longo do ciclo de crescimento de um ano. É claramente o caso do pinheiro bravo cultivado em Portugal. No entanto, mesmo no clima temperado com alternância bem marcada das estações do ano, o eucalipto não apresenta o padrão de variação do pinho. Nesta espécie cultivada em Portugal,

embora com diferentes ritmos, há um crescimento contínuo ao longo do ano, não se registando variações cíclicas anuais de camadas de crescimento com diferentes densidades. Aliás, mesmo a contagem dos anéis de crescimento numa secção transversal bem polida torna-se difícil e imprecisa quanto à identificação do lenho de início e de fim de estação, havendo mesmo falsos anéis a variações dentro de um único ciclo vegetativo.

Para o pinho bravo é muito útil a contagem e observação do padrão de crescimento das camadas anuais, tal como afirmado por (Mateus, 1961) e (Carvalho, 1997). Estes autores definiram mesmo um conceito de textura aplicado ao pinho bravo, que traduz a percentagem de lenho final em relação ao lenho total, representado em percentagem, e que traduz com razoável precisão uma correlação com a densidade e com as propriedades mecânicas. Esta informação da variação cíclica juntamente com a densidade média é largamente utilizada por outras ferramentas, umas não destrutivas como a densitometria de raios X e outras com algum dano localizado, como a microdensitometria pelo aparelho resistógrafo, o Pilodyn ou ainda a dureza superficial.

Na Figura 5.5 mostra-se o resultado de ensaios realizados no âmbito deste trabalho, respeitante à correlação entre a textura e o módulo de elasticidade à tracção paralela às fibras. Na Figura é mostrada a correlação entre a textura, e o módulo de elasticidade à tracção paralela às fibras, registando-se claramente a linha de tendência e correlação positiva entre as duas grandezas.

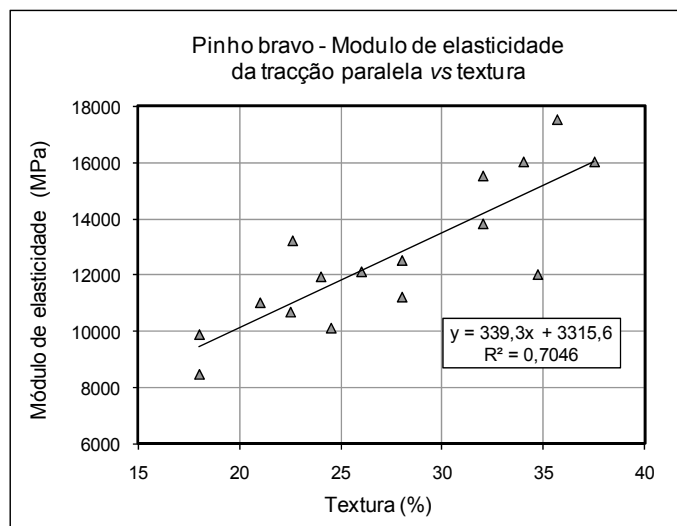


Figura 5.5 – Resultado experimental da relação entre o módulo de elasticidade e a textura, em ensaios de tracção paralela de pinho bravo.

Pela sua extrema dificuldade de realização, não foi possível com os meios disponíveis para este trabalho, fazer uma avaliação experimental das propriedades específicas do lenho inicial e as do lenho final.

A extrapolação da linha de tendência dos resultados apresentados na Figura 5.5, permitem encontrar uma estimativa do comportamento elástico à tracção de 6700 MPa para o lenho inicial (textura 10 %) e de 18 600 MPa para o lenho final (textura de 45 %), tal como representado na Figura 5.6. Na prática é muito difícil encontrar, para a madeira de pinheiro bravo, valores de textura inferiores a 10 % e superiores a 45 %. Embora sem confirmação experimental, aqueles valores limites não são de estranhar, uma vez que (Louzada, 1991) encontrou os valores mais baixos para a massa volúmica do lenho inicial da ordem dos 420 kg/m³ e os valores mais altos da massa volúmica do lenho final da ordem dos 880 kg/m³, enquanto a massa volúmica da parede celular das células é de cerca de 1500 kg/m³, relações de 2,8 vezes e 2,1 vezes respectivamente.

Tentativas de realização de ensaios separados das propriedades da camada de lenho inicial e da camada de lenho final revelaram-se de difícil concretização, não só pela geometria curva de diferentes raios de curvatura, como da dificuldade em definir as zonas limites de cada zona, o que leva a uma extrema dificuldade em fazer um corte de provetes garantidamente de um dos materiais. Aliás, este assunto, só por si, seria merecedor de um trabalho específico de investigação.

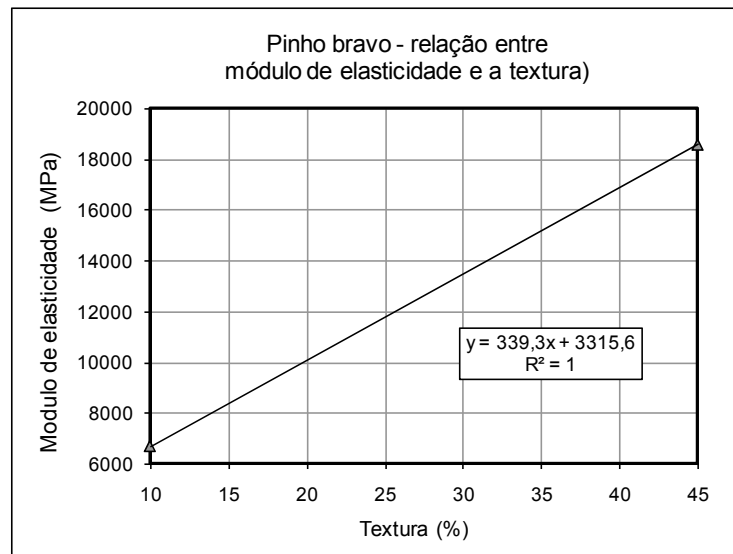


Figura 5.6 – Modelo teórico da correlação entre o módulo de elasticidade e a textura, para encontrar as propriedades do lenho inicial e do lenho final no pinheiro bravo.

A evidência do que foi dito é revelada na observação das zonas de fractura, que na ausência de outras perturbações estruturais ocorrem inevitavelmente nas zonas mais fracas correspondentes às camadas menos densas do composto que é a madeira.

5.2.4 Considerações gerais

O modelo apresentado na secção 5.2.1 aplica-se à tracção e compressão transversais, enquanto o modelo apresentado em 5.2.2 corresponde com muita precisão à tracção e compressão paralela às fibras.

Num material compósito com os elementos dispostos em paralelo relativamente à aplicação de cargas a suportar, como acontece na tracção paralela às fibras, é o componente de módulo de elasticidade mais elevado (lenho final) que vai tomar a seu cargo a maior parte da transmissão do esforço e o que atinge os valores de tensão mais elevados.

As considerações feitas anteriormente confirmaram-se experimentalmente nos resultados da tracção transversal do pinho bravo, nas direcções radial e tangencial, apresentados na Tabela 4.10 e Tabela 4.11, respectivamente. Para madeira de características de crescimento semelhantes as médias de resistência são as que se indicam na Figura 5.7.

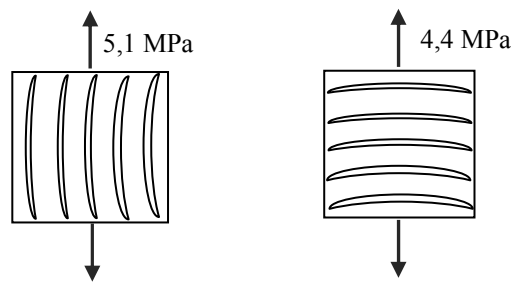


Figura 5.7 – Valor média das tensões de ruptura do pinho bravo na tracção transversal radial e tangencial.

O modelo de constituição de um bi-material não dá, só por si, resposta completa à elevada variabilidade do comportamento da madeira, porque seria também necessário levar em conta as alterações locais, mesmo que muito pequenas, como as devidas a singularidades (nós, desvios da direcção de alinhamento dos elementos fibrosos, e outras), e ainda à geometria circular do plano transversal e cónica dos planos axiais, ocasionando localmente comportamentos que se afastam do modelo. Mesmo assim, confirma-se claramente a correlação positiva entre a quantidade de lenho final, com a densidade e com os mais elevados valores das características mecânicas da madeira.

5.3 Modelo para a flexão estática

A flexão é em mecânica dos materiais um dos comportamentos mais complexos de construir modelos, pelo facto de ser um esforço complexo em que as forças aplicadas têm uma direcção

perpendicular à forma predominante do elemento e em que, para contrariar essas forças, contribuem um conjunto de esforços combinados e interdependentes como sejam tensão de tracção e compressão paralelas à direcção do comprimento do elemento e ainda tensões de compressão transversal na zona de aplicação de carga e nas reacções dos apoios e ainda tensões de corte em diferentes direcções conforme a localização considerada, tal com representado esquematicamente na Figura 5.8.

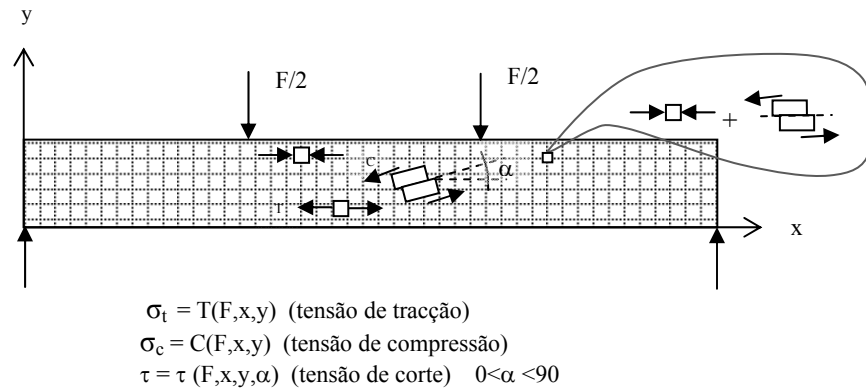


Figura 5.8 – Indução de tensões de tracção, compressão e corte em direcções e conforme a localização no elemento submetido à flexão.

Os procedimentos das normas de ensaio de flexão recomendam a colocação de calcadores intermédios entre o aplicador de carga e a superfície da madeira, para minimizar o efeito de concentração de tensões e os consequentes danos por esmagamento local. As normas para ensaio de pequenos provetes definem um aplicador semi-cilíndrico com um raio de 30 mm, enquanto a norma EN 408 para ensaios em dimensões estruturais define como aplicador uma placa metálica com um comprimento igual ou superior à largura do provete e uma largura não superior a metade da altura do provete.

Mesmo com a utilização dos acessórios anteriormente referidos é habitual constatar a ocorrência de esmagamentos por compressão transversal da madeira, na zona de aplicação de carga, tal como representado esquematicamente na Figura 5.9.

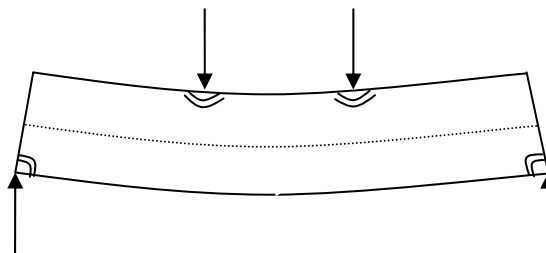


Figura 5.9 – Representação das zonas de esmagamento por compressão transversal num ensaio de flexão.

Na continuação do que foi referido anteriormente, o esmagamento por compressão transversal nos pontos de carregamento para a flexão, provoca uma ligeira curvatura no alinhamento das fibras, num ponto de forte concentração de tensões, incluindo a tensão de compressão paralela às fibras. Perto do limite da resistência à flexão, esta compressão sob desalinhamento das fibras desencadeia o início da cedência por encurvadura progressiva a partir da camada mais perto da superfície, estendendo-se para o interior. Embora as marcas de esmagamento por compressão transversal apareçam nos ensaios de flexão de quase todas as espécies de madeira, o início de cedência por esmagamento e encurvadura das fibras, na direcção paralela às fibras, é particularmente evidente nas madeiras com muito elevada resistência à tracção paralela, como é o caso do eucalipto onde esta ocorrência foi verificada experimentalmente, Figura 5.10.

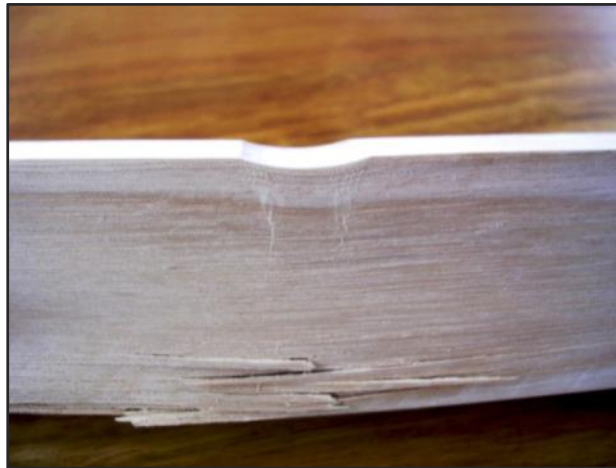


Figura 5.10 – Zona de esmagamento por compressão paralela e transversal num ensaio de flexão de eucalipto.

5.3.1 Modelos de ruptura por flexão

A ruptura por flexão resulta da combinação de um grande conjunto de parâmetros cuja relevância relativa e contribuição para a causa inicial da cedência depende em grande parte de factores aleatórios devidos à variabilidade natural da madeira e à distribuição de pequenas singularidades e defeitos. Não existe portanto um padrão único característico da ruptura por flexão, tal como acontece para a compressão e tracção.

Na sequência das considerações feitas na secção anterior, referentes à Figura 5.9, um dos modelos de início de cedência por flexão tem a ver com a perturbação causada pela concentração

de tensões nos pontos de carregamento. Acontece portanto o esmagamento por compressão e encurvadura das fibras, como mostrado na Figura 5.10. A partir deste ponto não se consegue fazer aumentar mais a carga, enquanto a deformação continua a sofrer aumento. Num conjunto de componentes estruturais interligados, numa situação real, uma forte deformação conduz a uma redistribuição da aplicação das cargas e o componente que cedeu primeiro vê a sua carga diminuída, passando a ter capacidade de a suportar. Voltando à viga individual, o progressivo aumento da curvatura por flexão, faz aumentar a zona de esmagamento com deformação plástica nas camadas superiores, e assim obriga a deslocar para baixo a linha neutra, o que por sua vez origina tensões extremas de tracção na camada inferior, e tensões de corte, dando como resultado a cedência catastrófica, que reduz de um instante ao outro a capacidade de resistir à carga aplicada.

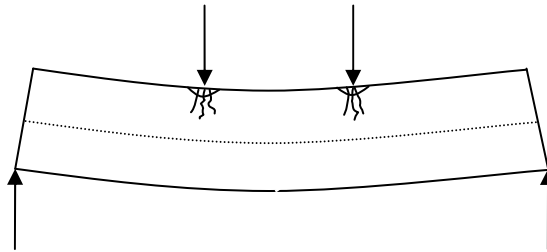


Figura 5.10 – Início de cedência à flexão por esmagamento por compressão das fibras.

Em muitos casos a cedência na flexão parece iniciar-se por uma ruptura instantânea por tracção paralela às fibras na camada inferior na zona central entre as cargas aplicadas, tal como representado na Figura 5.11. Esta forma de ocorrência da ruptura pode ser facilitada por presença na camada inferior de algum ligeiro desvio da direcção das fibras devido à presença ou simples proximidade de um nó, ou ainda por presença de lenho juvenil ou medula. Após a perda de continuidade das fibras, as duas partes da camada inferior, por recuperação elástica, tendem a retomar a posição recta, o que por sua vez provoca tensões de tracção transversal junto ao limite superior da falha por tracção, tal como representado na Figura 5.12.

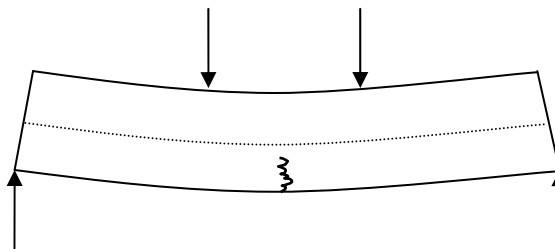


Figura 5.11 – Hipótese de início de falha por tracção paralela.

Se ocorrer uma falha por tracção, como a madeira é particularmente sensível à tracção transversal, logo instantaneamente acontece também a falha por tracção transversal, ficando a superfície de fractura muito semelhante ao modelo da Figura 5.12. As tensões de tracção transversal fazem aumentar a zona de fractura e separação de camadas, por um mecanismo semelhante ao do fendimento.

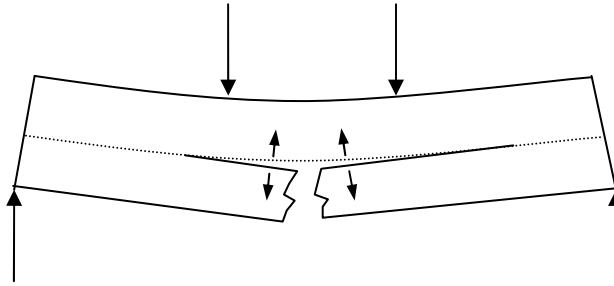


Figura 5.12 – Tensões transversais após falha por tracção.

Na Figura 5.13 mostra-se como a presença de um pequeno defeito e o conseqüente desvio da direcção das fibras da madeira podem provocar um efeito local de tracção transversal à direcção das fibras ao qual a madeira cede com baixas tensões, dando depois origem ao mecanismo de ocorrência de falha semelhante ao descrito para a Figura 5.12. A presença de um nó perto da superfície representa uma falta de continuidade para as tensões de tracção nesse zona, mas provoca também um desvio da orientação das fibras da madeira, e desta forma, as componentes de tensão de tracção dadas pelo círculo de Mohr em direcções não paralelas às faces da peça, podem chegar a atingir os valores máximos da tracção transversal às fibras, dando origem à falha.

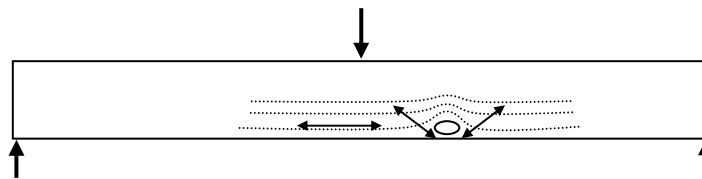


Figura 5.13 – Inclinação local do fio da madeira, por motivo de contorno a um nó, dando origem a componentes de tracção transversal à direcção das fibras.

Uma demonstração do mecanismo de fractura em flexão por efeito das tensões de tracção transversal foi feita por simulação da perda de continuidade da camada inferior, através da abertura de uma pequena ranhura transversal, Figura 5.14. Isto é o que pode acontecer na realidade pela simples presença de um pequeno nó, ou madeira particularmente frágil nesta zona

por algum defeito natural ou introduzido por deficiente laboração. Nesta figura a grande superfície horizontal de fractura aparece por descolamento de camadas, sem que muitas vezes se identifique a verdadeira origem inicial da cedência por outros tipos de esforço.

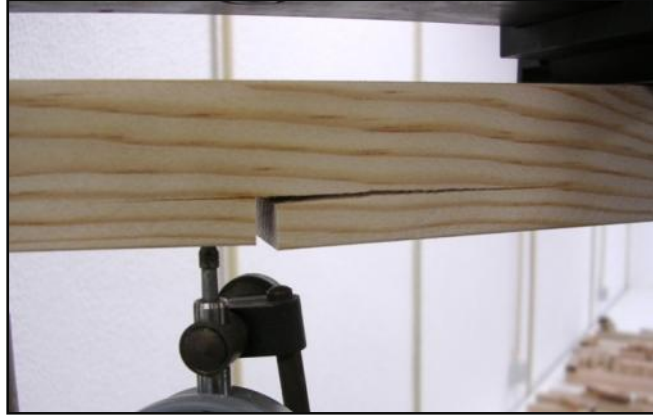


Figura 5.14 – Fractura por tracção transversal no ensaio de flexão, induzida por abertura de um pequeno entalhe.

A zona entre as cargas aplicadas para provocar a flexão foi referida como uma zona de tensões estáveis onde teoricamente não deveriam ocorrer fracturas por compressão, mas no entanto, embora pouco frequentes, elas podem ocorrer. Isto acontece se houver um efeito local perturbador da capacidade resistente à compressão, como pode acontecer devido a um pequeno nó ou à curvatura local das fibras pela proximidade de um defeito. Este efeito está representado na Figura 5.15 em que a concentração de tensões provoca um aumento muito grande da tensão e assim dá-se a cedência local por esmagamento das fibras.

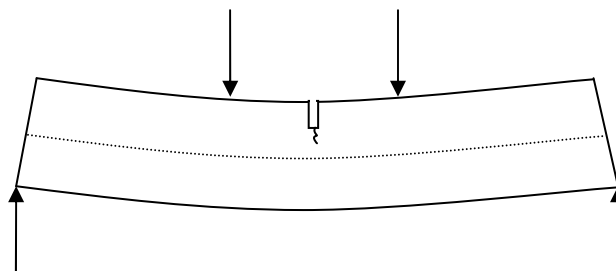


Figura 5.15 – Indução da falha por compressão, através do corte de um entalhe.

O modelo de cedência apresentado na figura anterior foi simulado através da abertura de um pequeno entalhe num perfil submetido à flexão a quatro pontos, tendo-se observado a cedência por compressão, como mostrado na Figura 5.16.

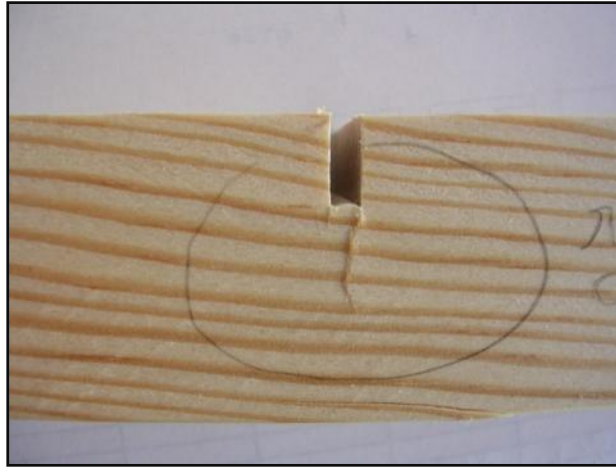


Figura 5.16 – Fractura por compressão no ensaio de flexão, induzida por abertura de um pequeno entalhe.

O efeito da concentração e estado complexo de tensões nos pontos de carregamento da flexão foram analisados por técnicas de fotoelasticidade com modelos de polímero birrefringente sensível à luz polarizada, tendo-se efectuado ensaios em diferentes níveis de carga. Para cargas aplicadas de pequena a média intensidade, normalmente correspondentes a menos de 30 % da carga de ruptura esperada, as tensões aparecem com uma distribuição semelhante ao representado na Figura 5.17. Na região entre pontos de carga a distribuição é regular e uniforme em quase toda a região.

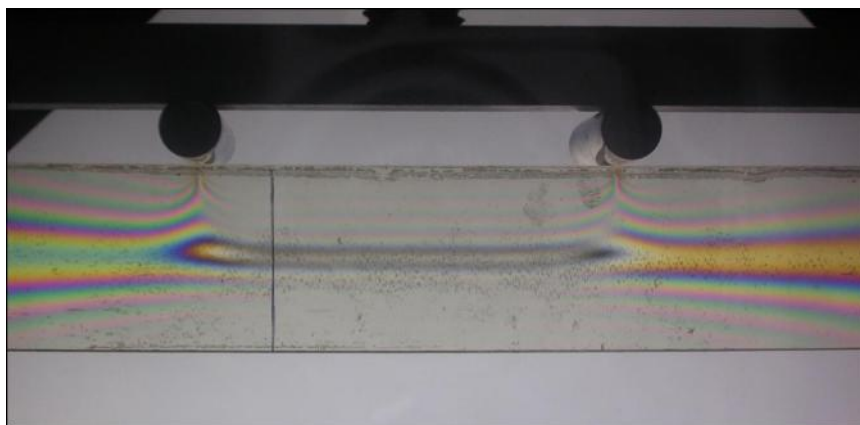


Figura 5.17 – Concentração de tensões vista por técnica de foto-elasticidade, numa fase de médio carregamento.

Para estados de tensões mais próximos da carga máxima à flexão registaram-se por modelos de foto-elasticidade um aparecimento de tensões já de elevada intensidade na zona entre

pontos de carregamento, mas mesmo assim quase constantes entre aqueles pontos. Neste material de características isotrópicas não se regista o deslocamento da linha neutra. Na zona central de tensões estabilizadas há uma simetria relativamente ao plano neutro, Figura 5.18. Embora com valor de estudo teórico das tensões, a simulação por fotoelasticidade não serve para representar o comportamento real da madeira.

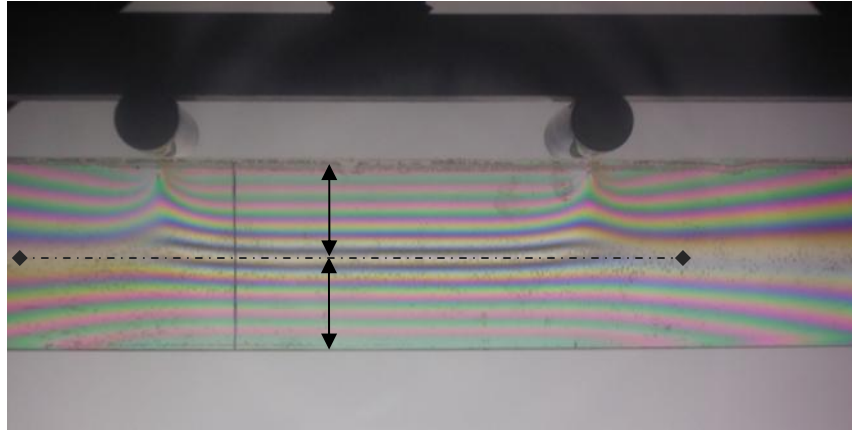


Figura 5.18 – Concentração de tensões vista por técnica de foto-elasticidade, numa fase de limite de resistência

No caso da madeira é frequente uma primeira cedência com deformação plástica por compressão, o que anula a contribuição dessa zona para a resistência à flexão, portanto é como se o perfil diminuísse a altura da secção a partir de cima, e conseqüentemente, para manter o equilíbrio entre as tensões de compressão e de tracção há uma deslocação da superfície neutra para o lado inferior, Figura 5.19.

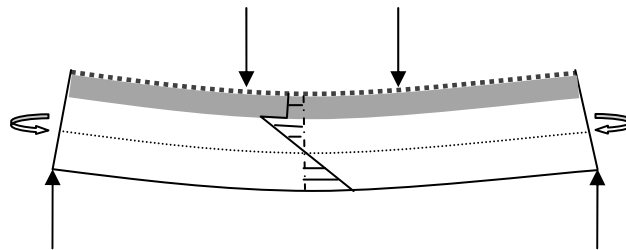


Figura 5.19 – Zona esmagada por compressão (sombreado) e deslocação da superfície neutra.

A análise da equivalência do estado de tensões feita pela teoria de Mohr e já discutida nas secções 3.5 e 3.20, do Capítulo III desta tese, indica que se forem tomadas como referência planos com diferentes ângulos aparecem componentes de tensões em direcções perpendiculares. Na Figura 5.20 exemplifica-se o modelo das tensões do ponto, numa zona de tracção perto da superfície, num provete sujeito a momento de flexão puro. À medida que se considera a rotação do ponto aparecem as tensões de tracção transversal e de corte. Para um ângulo de 20° a

componente de tracção calculada é de 12 % da tensão de tracção paralela às fibras e para um ângulo de 30° já é de 25 % daquela tensão. Num ângulo de 45° as tensões de corte chegam a 50 % da tensão de tracção inicial. Em materiais homogêneos isto não constituiria qualquer problema, mas num material acentuadamente orientado como é a madeira, pode ser a causa de falha.

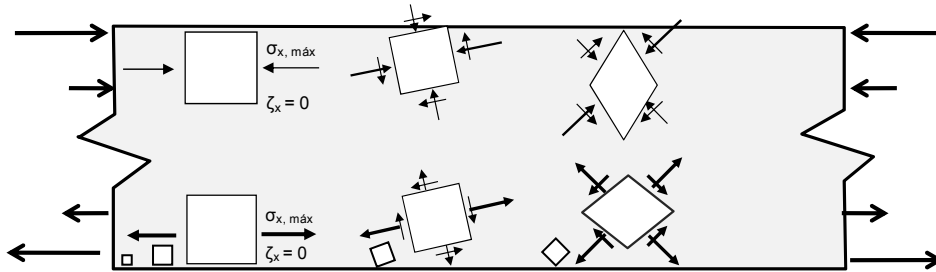


Figura 5.20 – Modelo do estado de tensões num ponto perto da superfície, de uma secção em flexão pura, considerando diferentes planos de referência.

5.3.2 Optimização de perfil para a flexão

Nos ensaios realizados foi evidente que as zonas mais sensíveis e bem localizadas, por onde se inicia quase sempre a cedência, quer por falha de compressão transversal, quer por falha de compressão paralela, são as zonas próximas ou mesmo no contacto com a aplicação das cargas. Assim, numa aplicação estrutural será sempre aconselhável providenciar uma sobreespessura, ou placa de material mais rígido, para distribuir as tensões no ponto de carregamento. Mesmo assim, a teoria da resistência de materiais e as localizações de início da fractura observadas experimentalmente, são bem claras quanto à sua localização das zonas mais sensíveis, pelo que se podem construir modelos de perfis e secções variáveis para aproximação a vigas de tensão constante, que no caso particular da madeira terão de tomar em conta as diferenças entre a resistência em diferentes direcções e tipo de esforço imposto (tracção/compressão e paralelo/transversal).

Na Figura 5.21 mostra-se a proposta de uma viga de secção continuamente variável ao longo do seu comprimento. Como as tensões máximas de cedência por compressão são inferiores às da tracção, pode otimizar-se o perfil com uma secção de maior largura na zona superior onde as tensões são de compressão, tal como mostrado na Figura 5.22.

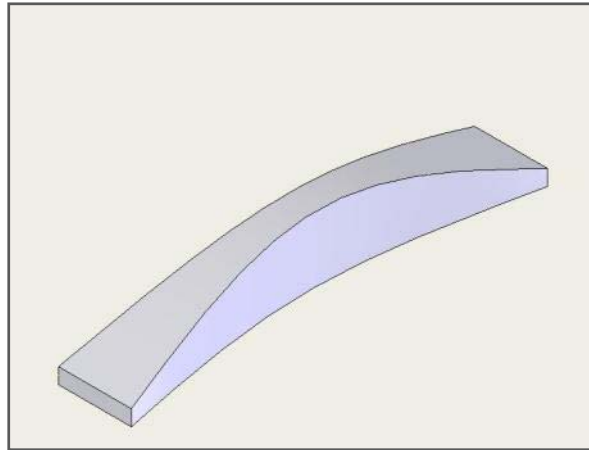


Figura 5.21 – Perfil para flexão otimizado, de secção variável com faces curvas.

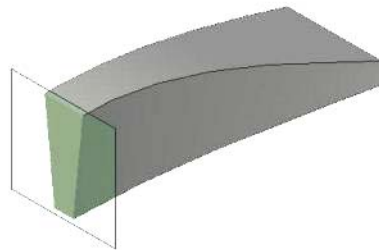


Figura 5.22 – Secção central do perfil, com largura otimizada para compressão e tracção.

Tendo em conta a dificuldade prática de construção de uma viga de perfil variável de forma gradual, mostra-se na Figura 5.23 uma forma simplificada de optimização do perfil, que tendo as faces planas é de muito mais fácil execução industrial.

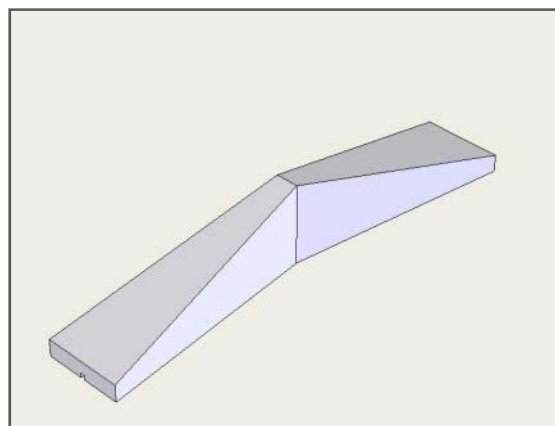


Figura 5.23 – Perfil para flexão otimizado, de secção variável com faces planas.

Este perfil é particularmente eficaz para suportar uma carga aplicada pontualmente a meio vão, mas também pode haver uma adaptação com desvio da zona de maior altura para o ponto de aplicação de uma carga descentrada do meio vão, como mostrado na Figura 5.24.

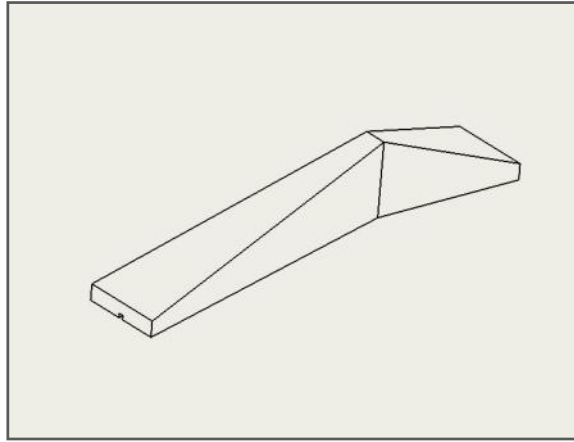


Figura 5.24 – Perfil para flexão otimizado, de secção variável com faces planas a carga aplicada fora do meio vão.

Para calcular a tensão de flexão em função da localização no provete teremos de partir das condições mostradas na Figura 5.25.

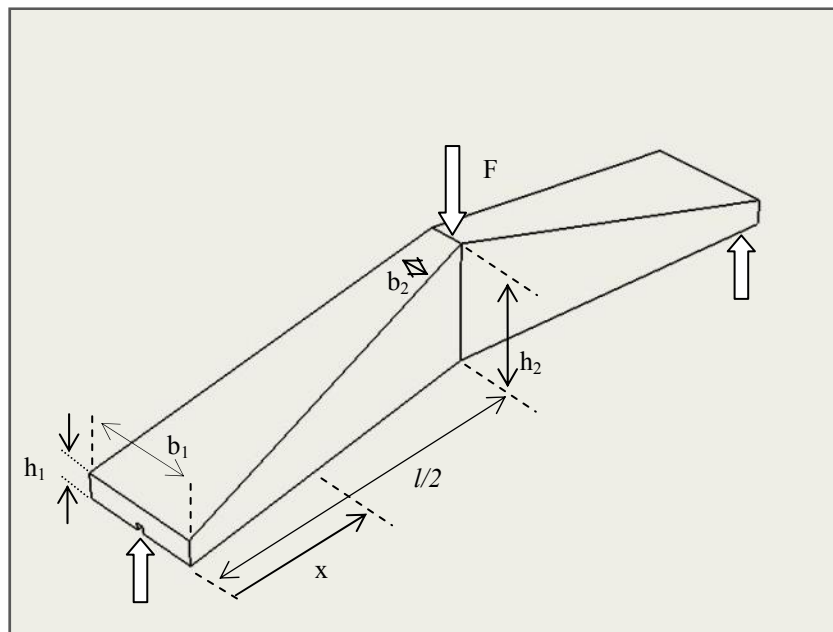


Figura 5.25 – Parâmetros para cálculo de tensões em viga de perfil otimizado.

Para determinar as tensões máximas de tracção e compressão utilizam-se as equações clássicas da mecânica dos materiais,

$$\sigma = \frac{M \cdot z}{I} \quad (5.11)$$

σ – tensão paralela;
 M – momento flector;
 I – momento de inércia da secção;
 z – cota da altura da secção.

Havendo desde logo a necessidade de definir a posição da linha neutra para poder determinar o parâmetro (y) que indica a distância da fibra neutra à camada da fibra de tensão mais elevada. A fibra neutra em cada posição do comprimento da viga passa pelo centro de gravidade da secção nesse local, portanto, no caso mais simples de a secção ser rectangular teremos ,

$$z(x) = \frac{h_x}{2} = \frac{1}{2} (h_1 + x(h_2 - h_1)) \quad (5.12)$$

sendo assim possível encontrara as tensões máximas de tracção e de compressão em cada ponto que se queira do perfil, após corrigir também o momento de inércia correspondente a esse local.

5.4 Modelo para as tensões de corte

O corte aparece inevitavelmente ligado a outros esforços impostos ao componente de madeira. Se desenhássemos uma malha sobre um elemento de madeira a simulação do esforço de corte corresponde ao modelo físico representado na Figura 5.26. A deformação angular da malha, se mantida na zona elástica, tem uma relação matemática bem estabelecida com o módulo de corte, que define a rigidez à deformação causada pelas tensões de corte.

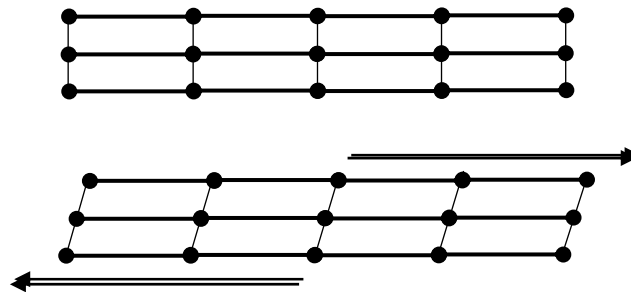


Figura 5.26 – Modelo geométrico de barras para representar o fenómeno de corte.

Neste modelo pode parecer haver uma total independência do comportamento ao corte relativamente às tracções e compressões, paralelas e transversais. Ou seja, a resistência ao corte teria a ver apenas com a maior ou menor dificuldade de rotação dos nós de ligação das barras e o módulo de corte teria a ver com a característica de deformação e recuperação elástica destes nós.

Na prática este comportamento não é assim tão simples, pelo menos para tensões de corte muito elevadas, em que as camadas de contacto terão também um alongamento longitudinal e assim o modelo fica distorcido, aparecendo também tensões de tracção e compressão transversais, tal como representado na Figura 5.27.

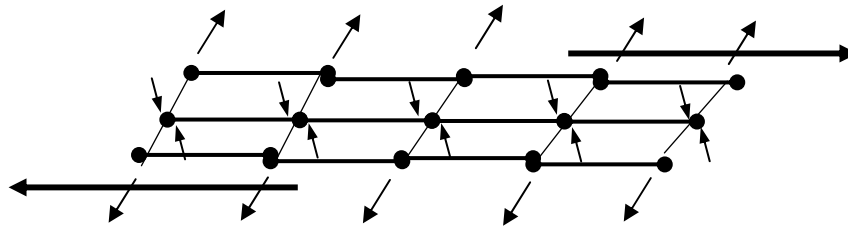


Figura 5.27 – Aparecimento de tensões de tracção transversal numa deformação por corte elevada.

Além do que foi exposto, onde as forças representadas causariam uma rotação do elemento, há portanto a necessidade de garantir o equilíbrio espacial com tensões de corte de sentido contrário em direcções paralelas, tal como representado na Figura 5.28. Assim, tem-se como certo que estão sempre presentes tensões de corte com sentido de rotação contrária às das tensões impostas, sendo criadas automaticamente e sempre com intensidade igual às primeiras.



Figura 5.28 – Necessidade de tensões de corte opostas para equilíbrio espacial de um elemento.

Considerando a zona de meia altura de um elemento em flexão, no alinhamento de um plano neutro e na região afectada pela reacção do apoio, seja, onde ocorre esforço transversal, as tensões no ponto caracterizam-se por uma forte componente de tensão de corte, tal como representado na Figura 5.29. Existem tensões de corte transversais resultantes do esforço transversal e tensões de corte paralelas às fibras resultantes do esforço de corte rasante. A distribuição da intensidade das tensões de corte apresentam-se de forma parabólica semelhante ao

representado na mesma Figura 5.29. Na região de momento flector puro não existem tensões de corte nas direcções paralela às fibras e na direcção transversal, mas estas podem aparecer noutras direcção tal como explicado na secção 5.3.1.

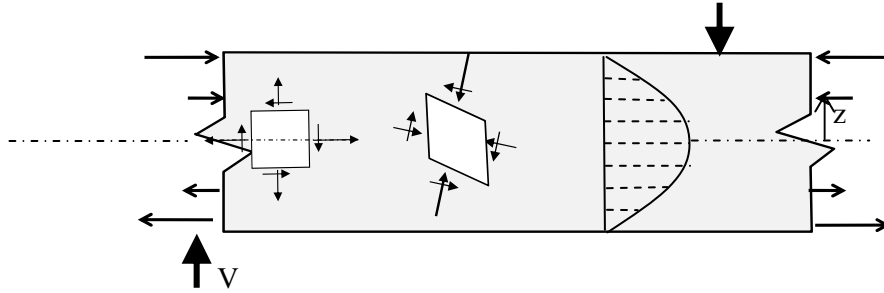


Figura 5.29 – Tensões de corte no plano central de um elemento em flexão, na região em que existe esforço transversal.

A distribuição da tensão de corte pela altura da secção rectangular é dada pela expressão conhecida da mecânica dos materiais.

$$\tau(z) = \frac{6 \cdot V_z}{b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \quad (5.13)$$

com,

V_z – esforço transversal;

b e h – largura e altura da secção respectivamente;

z – distância da linha neutra ao ponto a determinar a tensão de corte.

O valor da tensão máxima aparece portanto para $z = 0$, o que simplifica a expressão para,

$$\tau_{h,máx} = \frac{3 \cdot V_{máx}}{2 \cdot b \cdot h} \quad (5.14)$$

Esta expressão também explica que quando não há esforço transversal ($V_z = 0$), não existem tensões de corte na direcção paralela.

5.4.1 Corte transversal num plano transversal

Numa aplicação real de cargas de muito elevada intensidade e numa posição tal como representado esquematicamente na Figura 5.30, existe um plano de corte AA' onde estas tensões teoricamente atingiriam os valores de cedência, no entanto isto não acontece em madeira sã. O que realmente acontece é um esmagamento por compressão transversal nas zonas de descarga dos outros componentes da montagem. A explicação baseia-se na definição de tensão de corte transversal num plano transversal, tal como explicado na secção do Capítulo III desta tese. Como

a tensão de cedência da tensão de corte neste plano é muito elevada, a madeira cede muito antes desta ser atingida, por compressão transversal e esmagamento das fibras.

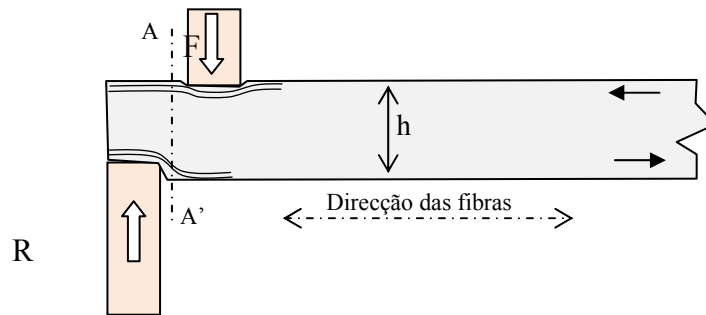


Figura 5.30 – Esmagamento por compressão numa zona de forte tensão de corte transversal.

Ainda relativamente à figura anterior, dados experimentais confirmam que as tensões de corte originadas pelo esforço transversal só se fazem sentir a partir de um afastamento de planos das forças F e R superior a $1,5 \times h$.

5.4.2 Corte transversal num plano paralelo

Esta solicitação é muitas vezes desprezada nos livros e normas de cálculo estrutural em madeira, não por apresentar valores muito elevados de tensão de cedência, o que não é o caso, mas porque a situação de carregamento é pouco usual. Uma possibilidade de aparecimento da tensão de corte por enrolamento pode aparecer num encaixe macho e fêmea de um soalho, tal como o representado na Figura 5.31. As tensões aparecem por situação de carga, por movimento diferenciado de duas régua contíguas, ou ainda, pela própria pressão de encaixe do macho e fêmea. Embora haja também alguma componente de flexão em consola da aba saliente, com a consequente tracção transversal, é muitas vezes a tensão de corte a causadora da falha.

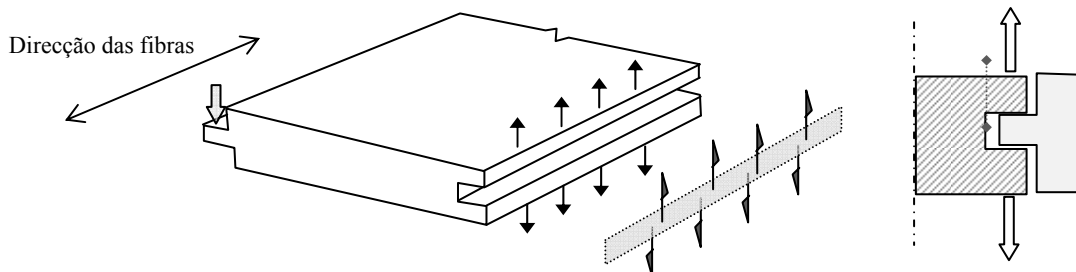


Figura 5.31 – Exemplo de aparecimento de tensões de corte por enrolamento num encaixe macho e fêmea de uma régua de soalho.

Tal como explicado no exemplo anterior, quando o plano de corte transversal é paralelo à direcção das fibras, aparecem as tensões de corte por enrolamento, definidas e suportadas com resultados experimentais na Secção 4.5.3 do Capítulo IV, para o pinho bravo, em que a tensão média de cedência de corte por enrolamento foi de 6,9 MPa, comparativamente menor do que o valor médio encontrado para o corte paralelo, 16 MPa.

5.4.3 Tensões de corte e compressão durante uma solicitação de corte paralelo

A aplicação de forças de sentidos opostos não colineares, cria tensões de corte num plano de escorregamento, mas também inevitavelmente tensões de compressão paralelas e transversais segundo um modelo representado na Figura 5.32 (a). O limiar da cedência vem do tipo de esforço cuja tensão atinja em primeiro lugar o seu limite máximo. A Figura 5.32 (b) mostra como o esmagamento por compressão é atingido nos pontos de contacto com os acessórios de ensaio, antes de se dar a cedência por corte paralelo. Isto verificou-se na realidade, tal como descrito na Secção 4.5.1 do Capítulo IV, para a hipótese de o provete ser um paralelepípedo inteiro. A forma proposta de abertura de rasgos laterais, conforme se provou experimentalmente, fez com que as tensões limites correspondentes ao corte pudessem na realidade ser atingidas, antes do esmagamento por compressão. As linhas curvas sobre a Figura 5.32 (b) representam os pontos de igual tensão de compressão. Este mesmo modelo foi confirmado por análise recorrendo a modelos de análise por elementos finitos (Figuras 4.60 e 4.61) ou a imagens de foto-elasticidade, Figura 5.33 (tendo em conta que o polímero birefringente é muito menos deformável do que a madeira).

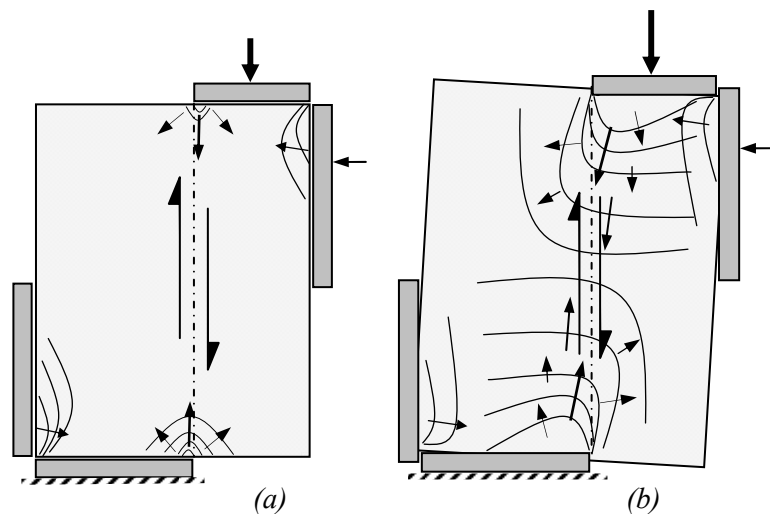


Figura 5.32 – Tensão de corte paralelo e linhas de igual tensão de compressão.

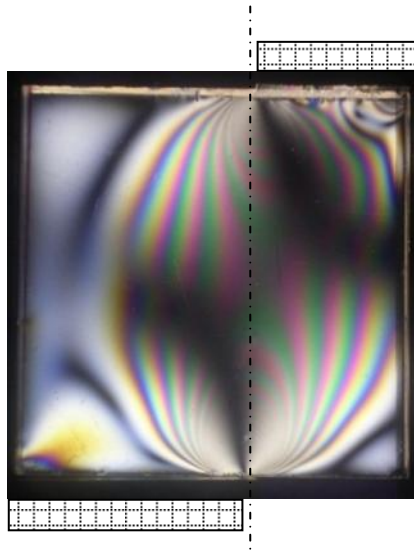


Figura 5.33 – Imagem de foto-elasticidade para a tensão de corte paralelo em linhas de igual tensão.

As considerações feitas anteriormente dizem respeito ao corte paralelo às fibras, que tendo um valor de cedência relativamente elevado, raramente são responsáveis por situações de falha, tal como foi provado no desenvolvimento experimental relativamente à flexão, mesmo de provetes com rasgos laterais (Secção 4.7.5, do Capítulo IV). O corte paralelo começa a ser um local de risco de cedência quando há uma superfície de referência reduzida ou devido a deformação elástica se criar um ponto de concentração de tensões de corte.

O corte transversal começa a ser uma preocupação para a análise de falha da madeira, quando ocorre numa superfície paralela às fibras, ou seja, na situação de corte por enrolamento. Como este valor de cedência pode ser atingido com aplicações e de carga não muito elevadas, a ruptura pode ocorrer logo no estado correspondente ao primeiro desenho da Figura 5.32 (a), ou seja, quando as tensões de compressão apresentam valores longe do seu limite de cedência.

Com base na observação da Figura 5.32 e das considerações feitas relativamente à Figura 5.30, pode construir-se um modelo de transmissão de um esforço de compressão paralela através de dois aplicadores não colineares, como se tratasse de um fluxo de tensões de compressão que se desviam em forma de S, tal como representado na Figura 5.34.

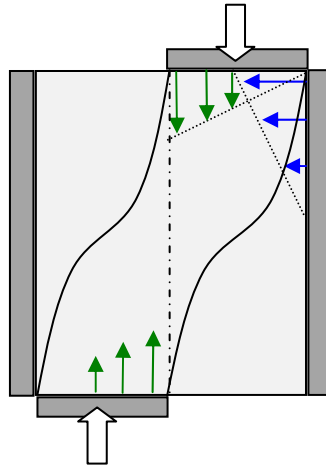


Figura 5.34 - Linhas de transmissão da compressão total.

5.4.4 Tensões de corte criadas por variação das tensões de tracção, de compressão e de momento flector

As tensões de corte aparecem sempre que há uma variação das tensões de compressão ou tracção, ou num componente em flexão, quando há variação do momento flector.

No exemplo representado na Figura 5.35 mostra-se como diferentes gradientes de distribuição de tensões de compressão são responsáveis por diferentes intensidades de tensão de corte paralela à tensão de compressão (equação 5.15), no intervalo em que a função é derivável. Este efeito é facilmente compreensível mesmo por análise gráfica, pois se em duas camadas consecutivas as fibras têm tensões de compressão diferenciadas, a sua consequente deformação dá origem a tendências de escorregamento diferenciado entre essas camadas, o que é contrariado com o aparecimento de tensão de corte.

$$\tau(z) = \frac{\delta C}{\delta z}(z) \quad \text{no intervalo }]-z_1; +z_2[\quad (5.15)$$

com

- $\tau(z)$ – a tensão de corte na cota z ;
- $C(z)$ – função de variação da tensão de compressão;
- δ_z – área elementar da compressão.

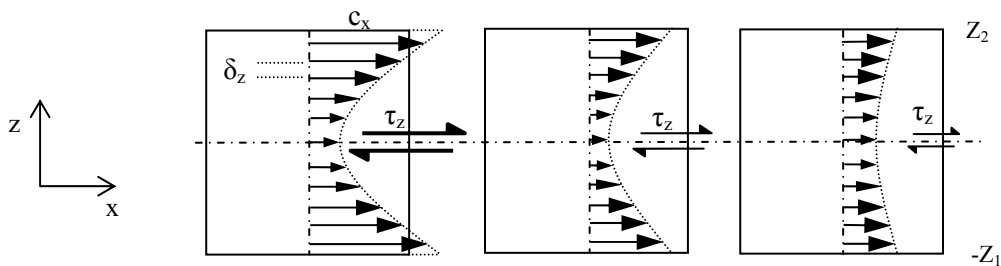


Figura 5.35 – Diferentes intensidades de tensões de corte paralelo, dependendo do maior ou menor gradiente do estado de tensões de compressão normais não uniformes.

Na região da flexão em que se manifesta o esforço transversal também existem tensões de corte em correspondência com as variações das tensões de compressão e de tracção paralelas, segundo um padrão semelhante ao apresentado na Figura 5.36.

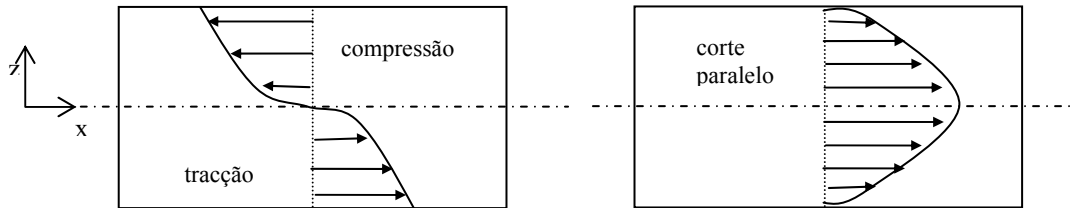


Figura 5.36 – Correspondência entre tensões compressão e tracção com o corte paralelo, na flexão.

A distribuição das tensões de corte é dada pela expressão (5.16) segundo Timoshenko (1976).

$$\tau(z) = \frac{6 \cdot T_z}{b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \quad (5.16)$$

em que,
 $\tau(z)$ – a tensão de corte na cota z ;
 T_z – esforço transversal;
 b – Largura de secção rectangular;
 h – Altura da secção rectangular;
 z – cota da altura da secção.

Relativamente à variação de momento flector, também se viu na Secção 5.4 que depende da presença do esforço transversal e da distância do apoio, através da equação (5.12). Quando há incremento ou diminuição de momento flector na direcção xx , também há componente de tensão de corte nessa mesma direcção.

5.5 Modelo de análise de uma ligação entre madeira e outros materiais

No sentido de permitir ligações fortes nos extremos de componentes complexos há toda a vantagem em associar componentes metálicos nos extremos de componentes em madeira, nomeadamente através de chapas aparafusadas ou outros acessórios mais ou menos elaborados. Sendo a análise semelhante, iremos centrar a discussão num exemplo da ligação colada entre um tubo metálico oco e uma amostra de madeira usada para o ensaio de tracção paralela às fibras, descrito no Capítulo IV. O dispositivo consistiu em dois tubos quadrados ocos, dentro dos quais foi feita uma ligação com enchimento de cola epoxídica entre a madeira e o tubo de aço, conforme o esquema da montagem mostrado na Figura 5.37.

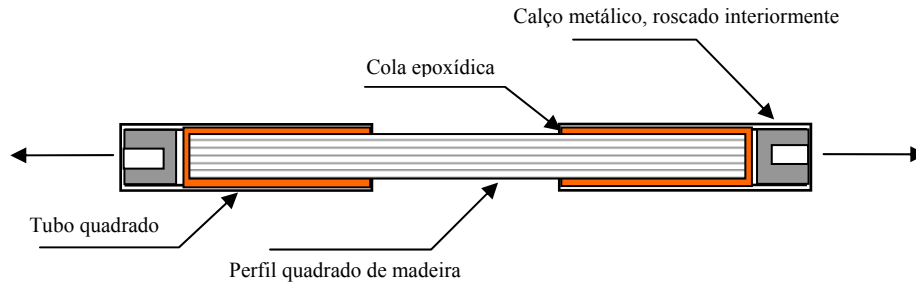


Figura 5.37 – Montagem para o ensaio de tracção paralela da madeira.

Trata-se de transmitir uma força de tracção centrada no eixo do tubo, para uma barra de madeira no seu interior, através de tensões de corte nas paredes laterais do tubo a a superfície lateral da barra, passando pela própria cola. As tensões de corte na superfície da madeira vão-se converter em tensão de tracção homogéneas em toda a secção da madeira, depois de um certo afastamento da zona de ligação, segundo o modelo representado na Figura 5.38. Torna-se necessário explicar como as tensões de corte representadas nas setas de cor preta se vão transformar em tensões de tracção representadas pelas setas de cor azul. As linhas em azul de traço mais fino, correspondem também à deformação elástica nas secções usadas no modelo, pois as deformações são proporcionais às tensões presentes.

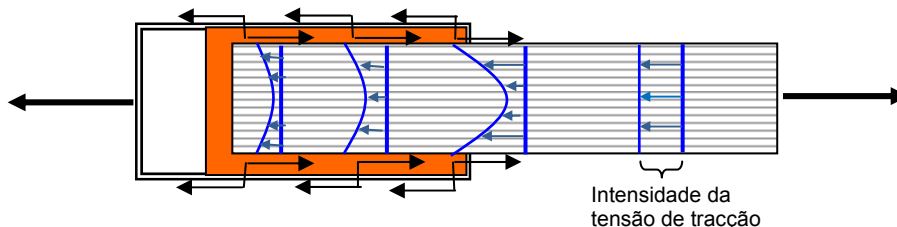


Figura 5.38 – Transmissão da força através de tensões de corte do acessório para a madeira.

A dificultar a elaboração do modelo, além dos valores muito diferentes dos módulos de elasticidade do aço, da cola e da madeira (para o aço o valor é 14 vezes mais elevado do que para a madeira), temos ainda as diferenças de secções resistentes. Os resultados experimentais conseguidos no ensaio de tracção paralela da madeira (Secção 4.2 do Capítulo IV), forneceram importantes dados para elaborar o modelo.

A força total a transmitir pelo acessório metálico chega à madeira pelas suas camadas exteriores. As tensões de corte são mais elevadas na zona de contacto, mas transformam-se em tensões de tracção paralela para o interior da massa da madeira. A maior complexidade da ligação surge pelo facto do módulo de elasticidade da madeira ser muito menor do que o do metal e assim, para uma determinada intensidade de carga, a deformação da madeira ser maior para o

extremo livre da madeira, acrescido ainda por ser aí maior a tensão de tracção. Considerando o modelo da Figura 5.39, após aplicação de uma carga o material E_2 deformando-se mais do que o material E_1 (aço), tende a deslocar o ponto B_2 mais do que o ponto B_1 e assim, criam-se nesta zona do material E_2 (madeira) tensões de corte muito mais elevadas do que na zona do ponto de referência A_1 e A_2 .

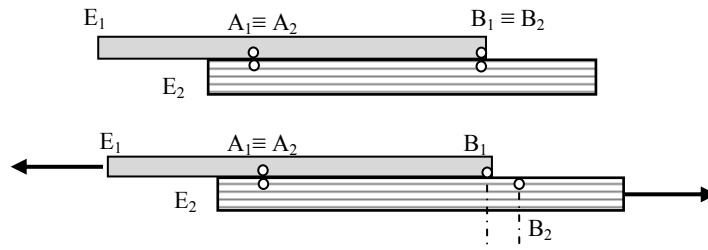


Figura 5.39 – Tendência de deslocação diferencial de dois materiais.

Pelo que foi dito a respeito das Figuras 5.38 e 5.39, o ponto B_2 é um local de concentração de tensões, com as tensões de corte e de tracção mais elevadas.

Ainda relativamente à Figura 5.38, comprovou-se experimentalmente que era próximo dos pontos extremos do metal que a madeira atingiria a rotura por início de tracção ou por corte paralelo, Figura 4.18, no Capítulo IV. A integração de tensões de corte resulta em tensões de tracção ou de compressão, assim como sempre que há uma variação forte da tensão de tracção terá de haver uma tensão de corte, pois umas camadas tenderão a movimentar-se mais do que as camadas contíguas.

As concentrações de tensões aparecem em zonas de forte alteração geométrica, tal como explicado na Secção 3.19 do Capítulo III, relativamente a reduções bruscas de secção ou presença de furos de pequeno diâmetro. No entanto é oportuno referir que pontos de concentração de tensões muito destruidoras da integridade dos materiais têm origem nas zonas de interface de bi-materiais. Isto tanto se faz sentir nas transições de lenho inicial para lenho final, como na zona de ligação de nós da madeira, como ainda quando se liga madeira com um outro material auxiliar de ligação mecânica ou colada.

As concentrações de tensões são responsáveis por constituírem pontos onde as tensões limites podem ser atingidas e assim serem o início de zonas de falha.

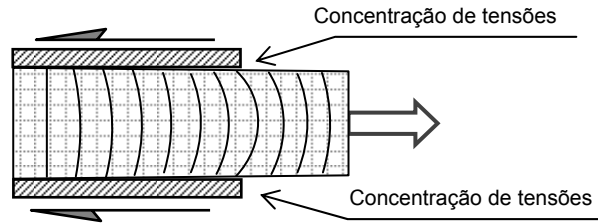


Figura 5.40 – Linhas de deformação e pontos de concentração de tensões.

A traçagem de linhas sobre um provete em ensaio é um método expedito mas fiável de fazer uma avaliação qualitativa das direcções e intensidades das tensões presentes. Na Figura 5.40 reproduz-se em esquema e de forma ampliada o que foi verificado num material elástico representativo do que acontece com a madeira. A maior ou menor curvatura das linhas tem a ver com a variação de intensidade das tensões de corte em cada secção, com um padrão semelhante à representação das tensões da Figura 5.35. Por sua vez a presença de variação das tensões está associada à existência de tensões de corte que apresentam o seu pico na zona de concentração de tensões assinalada na figura.

Na Figura 5.41 mostra-se o resultado das linhas de deformação e deslocação de pontos, numa análise por elementos finitos. A cor azul mais escuro representa os pontos que sofreram menor deslocamento e a sua distribuição relativamente à zona de fixação por corte, enquanto que, com as cores amarela e vermelha se registam as deslocações na zona de tracção uniforme em toda a secção. Na análise de tensões correspondente não se mostrou evidente a forte componente de tensões de corte e o ponto de concentrações de tracção no fim da zona de fixação por corte paralelo.

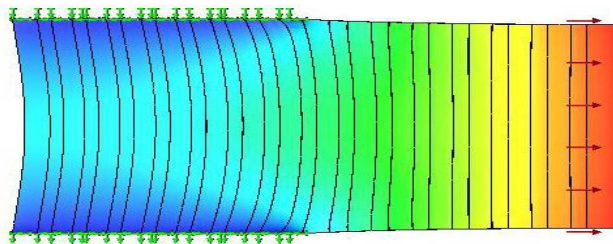


Figura 5.41 – Linhas de deformação e deslocamentos de material numa análise por elementos finitos.

5.6 Modelo de comportamento à compressão paralela às fibras por efeito de irregularidades da secção resistente

Tal como noutras propriedades, os resultados dos ensaios de compressão revelaram variabilidade de comportamento e situações onde não era esperado este comportamento, ou pelo menos, não era esperado num grau tão acentuado. Em provetes retirados próximos uns dos outros, de uma mesma prancha de madeira, registaram-se variações do módulo de elasticidade e da tensão máxima de mais de 30 %. Uma vez que, nem os factores de variação da massa volúmica, nem os principais defeitos explicavam tais anomalias e imprevisibilidade dos resultados, foi feita uma observação a todos os provetes ensaiados. Num caso mais significativo registou-se que um provete perfeito de eucalipto apresentava uma ligeiríssima coloração mais escura a meia altura. Na reconstituição da prancha com os diferentes provetes dela cortados, identificou-se uma zona de nó aderente a mais de 3 cm do provete com resultado anómalo. A conclusão foi que devido à presença de formação interna de um nó aderente havia uma zona densificada muito para além da aparente região abrangida pela presença do nó. Nem os desvios do fio permitiam detectar a variação de densidade local. Este provete deu um valor de módulo de elasticidade quase o dobro do valor esperado para aquela zona do lenho, ou seja, dos valores das peças circundantes, Figura 5.42. Os provetes da fiada a) e b) são mais próximos da medula e deram valores inferiores de módulo de elasticidade e módulo de ruptura do que os provetes da fiada c) e f) retirados mais afastados do centro. Um provete da fiada b) revelou um pequeno nó e os valores da resistência foram esperadamente afectados. O provete da fiada a) mais próximo do provete da fiada b) com um pequeno nó, encontrava-se visualmente perfeito, aliás nunca se saberia da sua proximidade a um nó se tivesse sido retirado ao acaso de uma amostra aleatória.

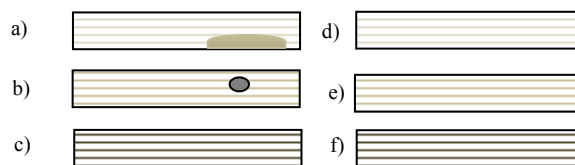


Figura 5.42 – Provetes de compressão paralela, retirados de uma mesma prancha de eucalipto.

Ficou demonstrado experimentalmente que a presença de um nó são e aderente pode contribuir para uma maior resistência do componente à compressão, mas a presença de um furo de um nó ou um furo realizado para uma ligação auxiliar, tem um efeito negativo no desempenho mecânico à compressão. A falta de material obriga a transmissão de carga a fazer-se pela secção

remanescente com a conseqüente concentração de tensões na proximidade da alteração de secção, tal como exemplificado na Figura 5.43.

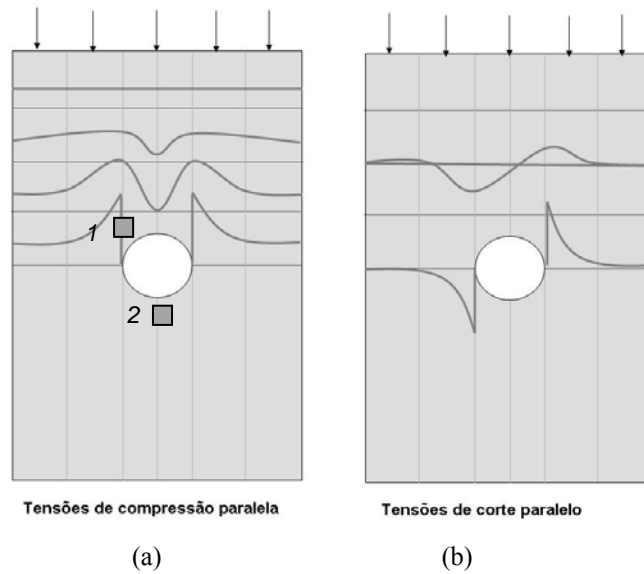


Figura 5.43 – Modelo concentração tensões na compressão à volta de um furo.

Na Figura 5.43 (a) faz-se a previsão das linhas de intensidade das tensões de compressão e na Figura 5.43 (b) as linhas de distribuição das tensões de corte. Tal como referido anteriormente na secção 5.4.4, sempre que há variação das tensões de compressão há presença de tensões de corte e tanto mais intensas quanto maior o gradiente de variação das tensões de compressão. Na Figura 5.44 mostram-se as tensões nos pontos 1 e 2 da Figura 5.44, na parte lateral e inferior ao furo, respectivamente.

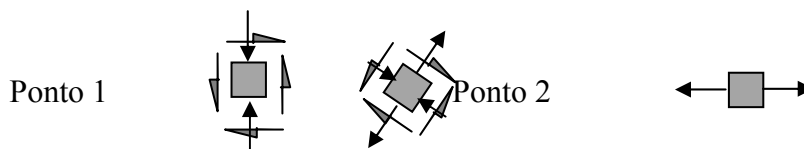


Figura 5.44 – Modelo concentração tensões na compressão à volta de um furo.

Ensaaios de compressão paralela realizados em provetes com furos abertos na zona central vieram a confirmar o aparecimento de ruptura por compressão na zona de concentração de tensões na parte lateral do furo e logo depois o aparecimento de tensões de tracção transversal na zona central, acima e abaixo do furo, o que acabou por provocar a abertura de grande fenda de ruptura por tracção, Figura 5.45.



Figura 5.45 – Ruptura por tracção transversal a partir de um furo em compressão.

Numa análise por elementos finitos, depois de definida a malha fez-se a simulação da carga de compressão numa barra com um furo e avaliaram-se as tensões criadas, Figura 5.46. Por motivo desta análise ser feita pelo critério de von Mises para materiais isotrópicos, apenas aparecem nas imagens com contraste de cor as tensões de compressão, qualquer que seja a sua direcção. É uma observação importante para avaliar as zonas de maior concentração de tensões e as zonas com ausência de tensão, mas não há indicação das zonas com tensões de corte ou tensões de tracção transversal.

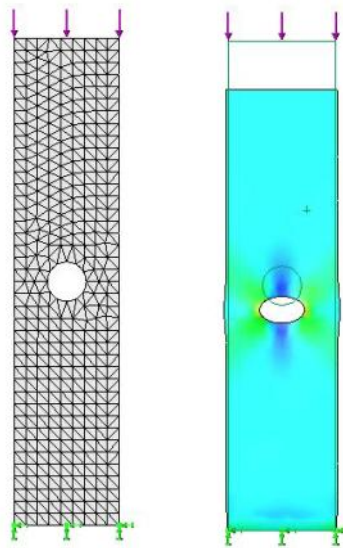


Figura 5.46 – Análise por elementos finitos de concentração de tensões nas imediações de um furo.

5.7 Modelo para o comportamento relativo ao coeficiente de Poisson

O efeito do coeficiente de Poisson pode ser ampliado ou diminuído por efeito de materiais alveolados, ou seja, em que o pressuposto de que não há variação de massa volúmica aparente não se verifique. Nos ensaios experimentais e ainda na informação obtida na pesquisa bibliográfica, notou-se uma grande dificuldade em estabelecer valores constantes e reprodutíveis. A perturbação das particularidades geométricas fazem-se sentir com forte interferência nos resultados.

No ensaio de tracção paralela às fibras e no ensaio de compressão os coeficientes de Poisson ultrapassaram em muitos casos o valor limite teórico para materiais isotrópicos, que é de 0,50, pelo motivo de a madeira não se tratar de um material sólido inteiramente maciço, antes pelo contrário é formado por células ou outros elementos estruturais com um núcleo vazio. Assim no modelo da Figura 5.47, indica-se o que se passa durante as deformações impostas no sentido paralelo às fibras.

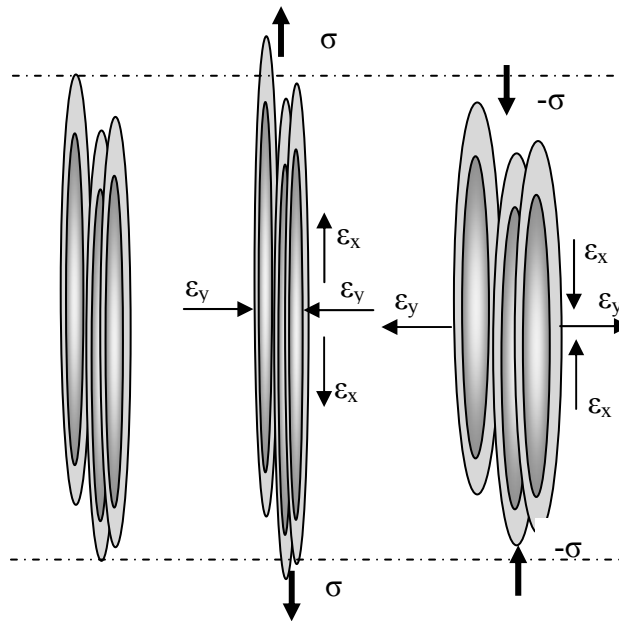


Figura 5.47 - Modelo das deformações transversais em resultado de aplicação de tensões paralelas às fibras e sua interferência no coeficiente de Poisson.

5.8 Modelo para a compressão transversal

Tal como também defendido por (Nairn, 2005), o comportamento da madeira é difícil de prever com rigor, e são difíceis de aplicar os modelos clássicos da mecânica dos materiais isotrópicos,

mesmo a análise por elementos finitos, devido à grande complexidade anatómica e estrutural. Tal como verificado experimentalmente, as representações gráficas da relação entre carga e deformação apresentam diferenças de curvatura que dificilmente poderiam ser explicadas para um material de constituição homogénea. Tem de ser tomada em conta o arranjo estrutural interno da madeira, que é constituída por células com um formato muito alongado e interior oco.

Na compressão transversal, há necessidade de separar três fases distintas, a primeira é aquela em que se dá uma deformação elástica das paredes de todas as células (acontece até tensões muito baixas e a relação é linear), uma segunda fase em que há uma parte de deformação plástica de algumas células (esmagamento do interior oco), e uma última fase em que todas as células se encontram em esmagamento plástico, que corresponde à fase de densificação, tal como demonstrado por (Nairn, 2005), Figura 5.48.

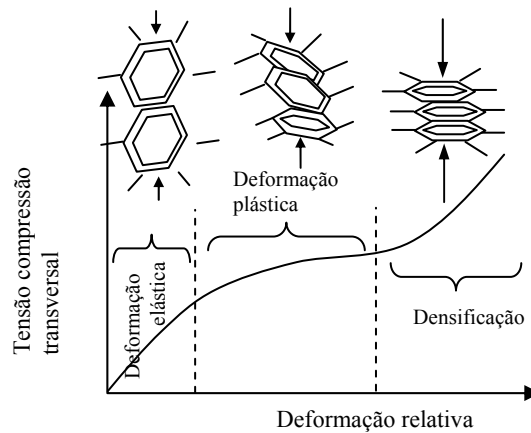


Figura 5.48 - Três fases da compressão transversal e sua relação com a alteração micro-estrutural da madeira (Nairn, 2005).

Em resultado do modelo da Figura 5.48, pode prever-se que a resposta à compressão transversal será muito variável em função da densidade de cada madeira, da direcção tangencial ou radial e ainda da proporção entre a presença relativa de lenho inicial e de lenho final, o que se confirmou experimentalmente na Capítulo IV.

5.9 Modelos para o fendimento.

Na avaliação do comportamento da madeira considera-se como de grande importância o fendimento, que na realidade tem grande proximidade de interpretação com as concentrações de tensões. O caso particular do fendimento na madeira tem a ver com tensões desenvolvidas transversalmente à direcção das fibras e a sua importância deriva da grande anisotropia da madeira e das tensões muito fracas que suporta naquela direcção.

O fendimento pode tornar-se a principal causa de falha estrutural da madeira se não for acautelada a sua presença em situações concretas de carregamento, pois as forças para causar as tensões para uma ruptura com fendimento são muito inferiores às que seria necessário para essa ruptura se dar com uma distribuição uniforme de tensões, que no caso das tensões de tracção transversal já são as mais fracas que a madeira suporta. No entanto, pela complexidade da sua análise, o fendimento continua a não ser calculado, sempre que possível, de forma independente da concentração de tensões.

Para ajudar à reflexão sobre os vários modos de fractura da madeira, a partir dos conceitos teóricos dos diferentes modos de fractura, construiu-se o modelo tendo em conta as direcções ortogonais da madeira. Na Figura 5.49 indicam-se os modos de fractura definidos na mecânica da fractura, mas aqui adaptado às direcções principais da madeira. Para cada modo indicaram-se apenas quatro combinações de direcções principais relativamente ao plano da fenda, quando na verdade são seis as possibilidades teóricas, o que se deve a razões de menor importância das não consideradas.

O Modo I de propagação de fendas, define-se como sendo causado por tensão de tracção perpendicular ao plano da fenda, o Modo II caracteriza-se por tensões de corte no plano da fenda actuando na direcção de propagação, enquanto o Modo III se caracteriza por tensões de corte no sentido anti-paralelo actuando na direcção perpendicular ao da propagação da fenda.

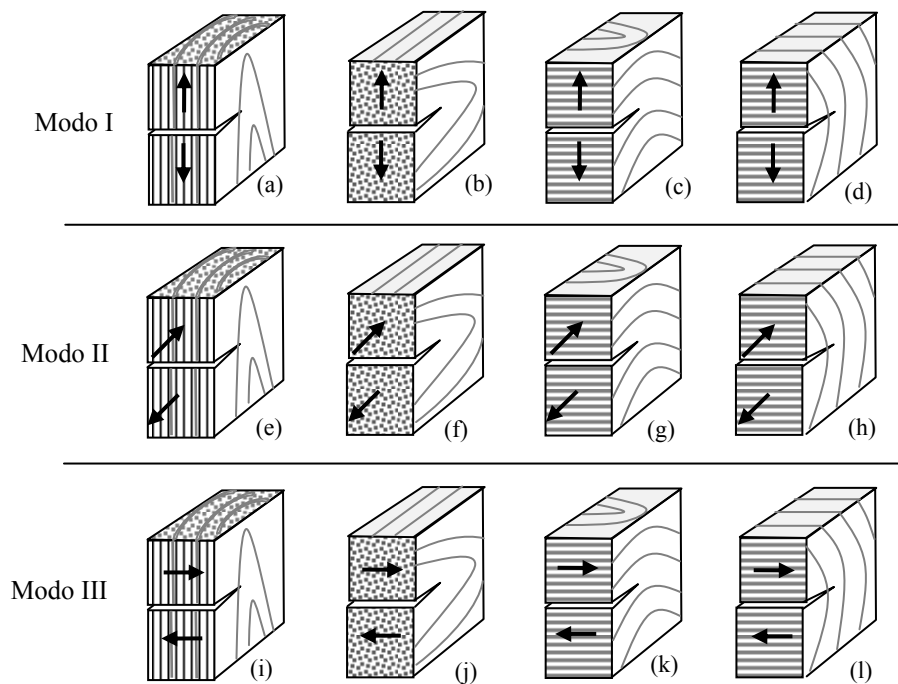


Figura 5.49 – Modos de propagação de fendas adaptado à madeira e às suas direcções ortogonais.

Segundo (Mattheck, 1997) e confirmado por uma análise da figura, o mais grave para o bom desempenho mecânico da madeira é o Modo I na situação em que a abertura da fenda coincide com a direcção radial ou tangencial (c) e (d). No Modo I e no sentido axial (L) é quase impossível provocar propagação de fissura com madeira sã, pela elevadíssima resistência desta (a). Aliás, o Modo I na direcção tangencial (d) é a principal causa de fendas naturais na madeira, causadas apenas pelas tensões devidas à retracção tangencial.

A introdução de um prego ou uma cavilha muito justa num furo da madeira podem causar propagação de fendas do Modo I, pelo que devem ser preocupação do projectista, pois a energia para causar a falha estrutural por este mecanismo é bastante menor do que pelas tensões de tracção transversal, que já por si são as tensões mais susceptíveis para a madeira.

Os modos II e III são complexos de analisar num material orientado como a madeira, mas são em grande medida considerados dentro da análise das tensões de corte paralelo às fibras (Modo II direcção L) e corte por enrolamento (Modo II direcções R e T).

Na Figura 5.50 mostram-se exemplos de duas situações reais onde o Modo I de fractura (a) é muito frequente na aplicação estrutural de madeiras. O primeiro desenho diz respeito aos apoios de vigas a “meia-madeira” o segundo uma carga aplicada sobre uma cavilha.

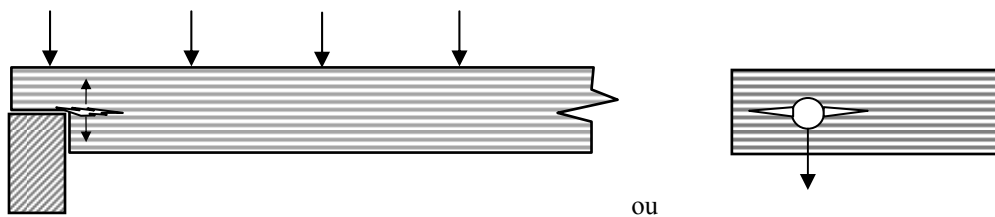


Figura 5.50 – Modo I de fractura numa aplicação estrutural de madeira.

Como se tem referido anteriormente, o facto da madeira ser um material fortemente orientado no sentido longitudinal e de ter uma manifesta sensibilidade às tensões de tracção nas direcções transversais, adicionado à elevada deformabilidade à flexão, faz com que a localização de uma fenda relativamente às superfícies seja de uma importância fundamental para a sua maior ou menor facilidade de progressão, como se representa em modelo na Figura 5.51. Na primeira imagem a fenda mais ou menos a meio da secção, permite que a cada uma das meias espessuras resista na forma de flexão por encastramento. Na segunda figura a camada superior não tem capacidade de resistir por flexão e então o fendimento segue livremente por concentração de tensões de tracção transversal.

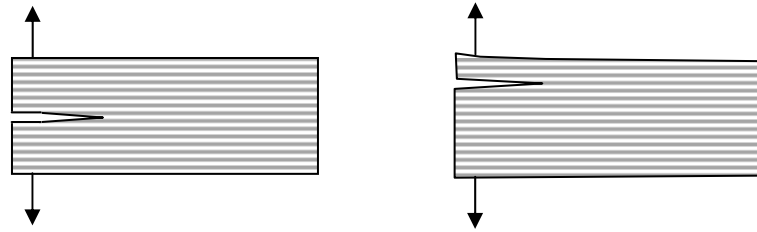


Figura 5.51 – Influência da localização do plano da fenda na sua facilidade de propagação.

Para evitar os problemas identificados anteriormente, a solução de princípio é a de utilizar sempre a madeira inteira sobreposta nas zonas de confluência, o que na prática pode provocar limitações de avançamento por questões de aumento da altura total do conjunto estrutural, Figura 5.52.

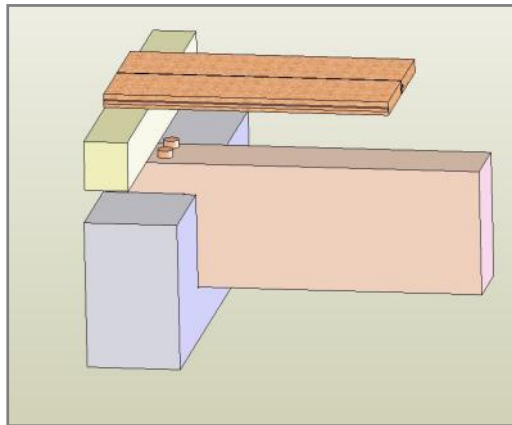


Figura 5.52 – Exemplos de ligações numa montagem estrutural de um pavimento.

Soluções de compromisso devem ser estudadas, permitindo alguma redução de secção, mas em zonas que não permitam o aparecimento de forte concentração de tensões, nem situações de propagação do fendimento, como exemplificado na Figura 5.53.

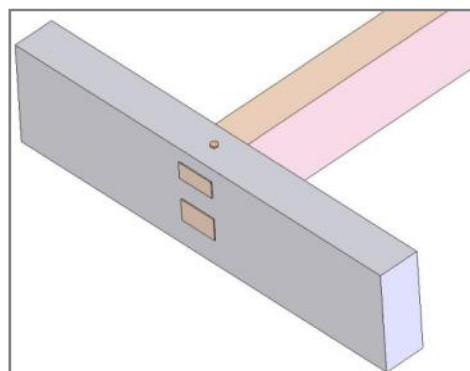


Figura 5.53 – Exemplos de ligações no mesmo plano, numa montagem estrutural de um pavimento.

Como se representa na Figura 5.54 a força de apoio exercida pela perna de uma asna sobre a chamada linha, que é a peça de travamento horizontal que suporta as tensões de tracção do conjunto da asna, é feita através do apoio num dente escavado na “linha”. Deste apoio resultam duas componentes de força, uma na vertical e outra horizontal, em que esta última provoca uma zona de corte e potencialmente abre a possibilidade de fractura por propagação de uma fenda pelo Modo II, segundo o modelo da Figura 5.55 (a), com a distribuição de tensões de corte segundo o modelo da Figura 5.55 (b).

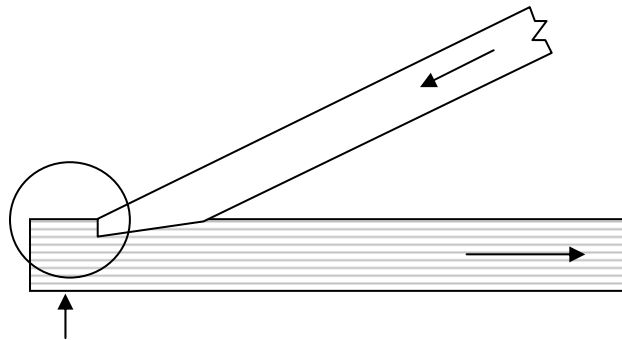


Figura 5.54 - Exemplo de Modo II de fractura, no sentido longitudinal, ligação de uma perna de uma asna com a linha.

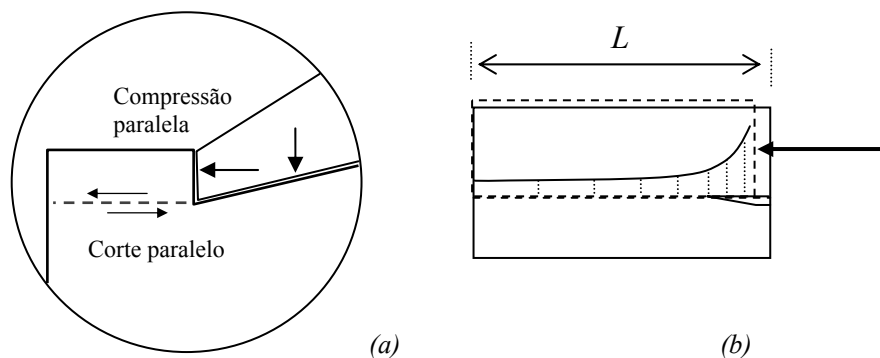


Figura 5.55 – Tensões de corte e compressão originando a propagação de uma fenda (a) e a correspondente distribuição de tensões (b).

Na hipótese de não haver deformação por compressão, ou de estas serem pequenas, as tensões de corte seriam uniformes em toda a superfície indicada, sendo a falha apenas dependente da resistência ao corte. Na realidade a madeira terá sempre alguma deformação por compressão que se inicia na zona de contacto, o que faz com que as tensões de corte atinjam picos de concentração e por consequência possam ceder, originando o início de uma fenda que tenderá depois a propagar com uma energia menor do que a calculada apenas por uma cedência por uma

tensão distribuída. Este exemplo explica porque razão o aumento da distância L , só por si, não garante o bom desempenho de toda a ligação. É sempre necessário verificar que não se atingem valores de tensão para causar uma deformação excessiva por compressão.

Em situações reais de aplicação estrutural de madeira há que analisar separadamente os casos em que as tensões são uniformes e as situações de concentração de tensões, pois é nestes que se iniciam e propagam as fendas causadoras de cedências e colapso.

5.10 Encastramento de um varão numa peça de madeira

Uma ligação com grandes potencialidades para a montagem de estruturas ou outros componentes que estejam sob condições de forte exigência de suportar esforços no sentido axial, consiste no embutimento de um varão metálico roscado numa peça de madeira no sentido das fibras através do enchimento de um furo de maior diâmetro com cola epoxídica. Estas colas fazem ligações extremamente fortes entre a madeira e o metal.

Na Figura 5.54 mostra-se a montagem e os modelos de rotura quando o varão é traccionado segundo o seu eixo, ou seja, segundo a direcção paralela às fibras da madeira. Na Figura 5.56 (b), o que acontece é que a partir de cargas elevadas as deformações elásticas permitem um ligeiríssimo deslocamento de material o que vai dar origem ao aparecimento de tensões de tracção transversal no topo da madeira em direcção radiais relativamente ao eixo do varão. Sendo a madeira muito susceptível aos esforços de tracção transversal dão roturas, manifestadas por largas fendas. Uma forma eficaz de aumentar a carga total transmitida será a colocação de um anel quadrado ao redor do bordo superior da madeira, como mostrado na Figura 5.56 (c), ou ainda melhor o da Figura 5.56 (d) em que o ajustamento do anel metálico pode ser feito com cola epoxídica.

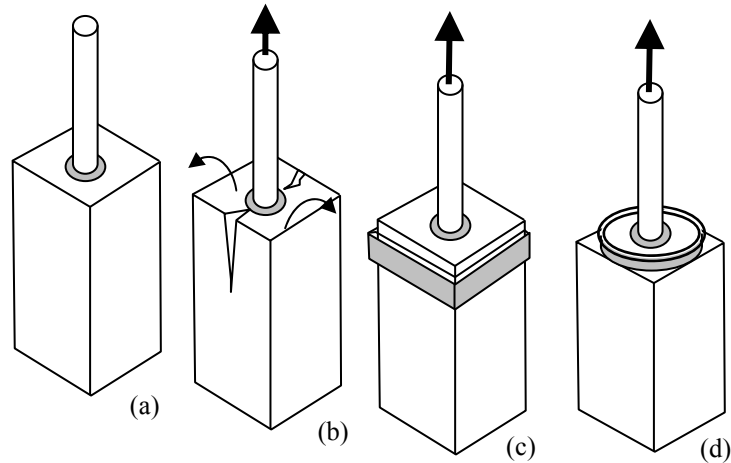


Figura 5.56 - Ligações axial entre um elemento metálico e um componente de madeira. Modos de ruptura e soluções de reforço.

A solução de reforço de vigas com anéis metálicos é muito antiga, sendo tradicional nos mastros de madeira de embarcações à vela do século XVIII, como mostrado na Figura 5.57, relativa ao navio histórico português a Fragata D. Fernando II e Glória. Os projectistas navais antigos terão chegado à conclusão que as rupturas por tracção transversal e fendas eram impedidas com o aperto regular dos longos perfís dos mastros e vergas.



Figura 5.57 – Solução tradicional de reforço de mastros com anéis metálicos. (Fragata D. Fernando II e Glória).

(em branco)

Capítulo VI

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1 Principais conclusões

Por motivo da grande variabilidade das características da madeira, para utilização estrutural tornou-se indispensável dispor de valores de cálculo bem definidos, dentro de margens de segurança confortáveis. Regulamentos, normas e Eurocódigos de publicação recente, definem os *valores característicos*, que permitem o dimensionamento de estruturas e componentes de madeira, com base nos valores muito abaixo dos valores médios das suas propriedades. Estes valores a utilizar nos cálculos estruturais, são determinados por tratamento estatístico de um grande número de amostras, seleccionadas previamente com critérios de avaliação visual também definidos em normas específicas. No entanto, o tratamento de grandes números não permite encontrar explicação prática para o aparecimento da variabilidade nem para a influência pontual de singularidades e defeitos no desempenho concreto de uma peça individual.

Neste estudo, sempre que foi importante fazer comparações e encontrar a lei de variação das propriedades, foram cortados provetes idênticos de uma mesma prancha e de locais próximos bem identificados, por exemplo sequências na direcção radial desde o centro geométrico das camadas de crescimento até à periferia. Foi assim encontrado o padrão de variação das propriedades em função da sua distância de afastamento da medula, variação que se revelou muito acentuada, em particular para o eucalipto.

Para encontrar as leis de relacionamento entre diferentes tipos de esforços e tensões, sem a variação que seria introduzida pela própria variabilidade da madeira (material de estrutura interna fortemente orientada), foram realizados diferentes ensaios sobre um mesmo provete, ou provetes tirados axialmente de um mesmo perfil, onde se espera que as características micro-estruturais sejam o mais semelhantes possível.

Deste modo, os resultados deste estudo permitiram conhecer melhor as propriedades mecânicas do pinho bravo e do eucalipto, nas suas mais variadas componentes de anisotropia, mas também fornecer dados sobre características pouco estudadas como as tensões de corte em diferentes planos e direcções.

Para muitos dos ensaios não havia na bibliografia nem em normas, informação específica sobre os procedimentos a seguir, ou os que existiam por vezes não se mostravam adequados para a procura de interpretação do comportamento da madeira, pelo que foram propostos novos procedimentos de ensaio, validados depois experimentalmente.

Um aspecto relevante e inovador deste estudo foi identificar e quantificar, com um elevado grau de confiança, a variabilidade do comportamento das madeiras, tanto nas direcções ortogonais e nas combinações tangencial e radial, ritmo de crescimento, mas também do afastamento do centro geométrico da secção transversal do tronco, desde a medula, o lenho juvenil, o lenho adulto com cerne e com borne.

Uma conclusão importante resultou do controlo de todas as fases de preparação das madeiras sujeitas a estudo, desde a escolha dos padrões de serragem, até um rigoroso controlo do processo de secagem e eliminação de tensões, com identificação da sua influência no bom desempenho mecânico dos elementos fabricados. Por exemplo, para o eucalipto, as propriedades mecânicas avaliadas ao longo do trabalho deram valores significativamente superiores ao que consta na bibliografia e mesmo em estudos preliminares do autor antes do início da preparação desta tese. A explicação está no facto de pequenas fendas superficiais e tensões internas das madeiras, introduzidas no processo de preparação e secagem, virem a afectar definitivamente o comportamento da madeira.

A análise de falha da madeira requereu uma observação com um ponto de vista diferente em relação aos modelos aplicados a outros materiais. Tendo em conta a elevadíssima heterogeneidade e ortotropia das características da madeira, numa avaliação de um estado de tensão, têm de se ponderar as tensões em diferentes direcções e para diferentes tipos de esforços. É mais importante avaliar qual a relação das tensões reais relativamente à tensão máxima, do que considerar apenas a tensão de cedência mais baixa numa dada direcção. Ou seja, deve construir-se uma matriz com as percentagens de esforços efectivos relativamente às tensões de cedência e assim ter uma ideia da capacidade resistente do conjunto, de forma a melhor identificar os pontos a necessitar de reforço.

Os defeitos e singularidades da madeira, mesmo os mais difíceis de detectar e identificar visualmente (fendas fechadas, pequenos nós e desvios da direcção do fio), contribuem mais para a variabilidade e imprevisibilidade das propriedades mecânicas do que os factores geométrico-estruturais como as variações de direcção tangencial e radial, o cerne ou o borne, o lenho inicial e o lenho final, ou mesmo a densidade.

Num material elástico e deformável como a madeira, as tensões verdadeiramente causadoras de início de falha, não são as tensões médias calculadas pela relação entre a carga a

sua área de influência, mas sim os picos de tensões que aparecem por efeito de concentração de tensões, ou desvios, por equivalência de tensões, para características em que a madeira é particularmente sensível, como é a de tracção transversal.

Finalmente é de importância fundamental no dimensionamento de componentes de madeira geometricamente mais complexos, ter em conta os efeitos de concentração de tensões nas zonas das ligações, tanto por efeito de aplicação pontual de cargas, como de variações de secção, a que se adiciona a influência das singularidades da própria madeira e defeitos, mesmo quando se encontram a distâncias relativamente afastadas dos pontos críticos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

A abrangência deste trabalho foi muito ambiciosa, no sentido de avaliar o comportamento da madeira como um todo, focando-se em todas as propriedades, identificando e quantificando as relações entre elas.

Após centenas de ensaios e procura de explicações para as anomalias e variabilidade do comportamento da madeira, e ainda da modelização de algumas propriedades, fica a certeza que ainda muito trabalho ficou por fazer neste tema, indicando-se como prioridade para trabalhos futuros a tentativa de encontrar modelos matemáticos, que dêem resposta, com a desejada aproximação, à previsão do comportamento real da madeira nas suas quase infinitas condições de partida e soluções de ligação de componentes e de aplicações.

Tendo em conta que em muitas situações a ruptura é desencadeada por um tipo de esforço que induz outras falhas quase em simultâneo, torna-se necessário dispor de meios de análise que permitam identificar a causa inicial, como por exemplo a tecnologia de imagem de grande velocidade, pois permitiria compreender o mecanismo de aparecimento e propagação de fendas em falha estrutural, por exemplo na flexão, onde foi impossível determinar se o início de cedência era devido a falha de tracção ou falha de corte.

Em programas de ensaios, será importante realizar estudos de aplicação simultânea de cargas em diferentes direcções, de modo a simular estados de tensão complexos e estudar o efeito acumulativo de tais condições nos mecanismos de falha.

(Em branco)

Bibliografia

- Aicher, S.; Klock, W. (2001). Linear versus quadratic failure criteria for inplane load wood based panels. *Otto-Graf Journal*, Vol. 12. P. 187-199.
- Archer, R. R., (1986). Growth Stresses and Strains in Trees. In *Springer Series in Wood Science*. Ed: T. E. Timell. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 240 pp.
- ASTM D 198 (2002). Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.
- ASTM D 143:2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber.
- ASTM D 4933:2004. Moisture Conditioning of Wood and Wood-based Materials.
- Baer, D., *et al.* (2007). Comparison of different identification techniques for measurement of quasi-zero Poisson's ratio of fabric-reinforced laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 38, Issue 9, September 2007, Pág. 2047-2054.
- Beer, F. P. *et al.* (1992). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Book Company. London.
- Bodig, J; Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- Branco, C. A. G. M., (1985). *Mecânica dos Materiais*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 1078pp.
- B.S. 373:1957. Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber.
- Chaplain, M.; Valentin, C. (2007). Fracture mechanics models applied to delayed failure of LVL beams. *Holz Roh Werkst* 65:7–16. Springer-Verlag.
- David W. Green *et al.* (1999). Wood handbook—Wood as an engineering material. Mechanical properties of wood, Chapter 5. Forest Products Laboratory. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 463 p.
- Dumail J-F., K. Olofsson and L. Salmén, (2000). “An analysis of rolling shear of spruce wood by the Iosipescu method”, *Holzforschung*, 54, pp. 420-426.
- EN 338:2003 – Structural timber – Strength classes. CEN Comité Européen de Normalisation. Bruxelles.
- EN 1912:2004 – Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species. CEN Comité Européen de Normalisation. Bruxelles.

EN 384:2004 – Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN Comité Européen de Normalisation. Bruxelles.

EN 408:2003 – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN Comité Européen de Normalisation. Bruxelles.

F. C. Bao, *et al.* (2001). Differences in wood properties between juvenile and mature wood in 19 species grown in China. *Wood Science and Technology* 35(2001) 363-375. Springer-Verlag

Féodossiev, V. (1974). *Résistance dès Matériaux*. Éditions de la Paix. Moscou.

Frese, M. (2008), Visual strength grading supported by mechanical grading. COST E53 Conference proceedings. Delft, The Netherlands. ISBN/EAN: 978-90-5638-202-5. p 19-30.

Garrido, N. (2003). Determinação do comportamento ao corte da madeira de *Pinus Pinaster*, AIT., usando o ensaio “off-axis”: Análise por elementos finitos. Tese de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real.

Ian Smith, Eric Landis, Meng Gong. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley and Sons Publications. ISBN 0471487082. 242 p.

Lakes, R. S., (1993). "Design considerations for negative Poisson's ratio materials". *ASME Journal of Mechanical Design*, 115, 696-700.

Lee, Sun-Young, et al. (2004). Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites. *Composite Structures* Volume 65, Issues 3-4, September 2004, Pages 459-469.

Liu, J. Y. (...). Shear test fixture design for orthotropic materials. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, One Gifford Pinchot Dr., Madison, WI 53705-2398.

Liu, J. Y., et al. (1996). Improved Arcan Shear Test For Wood. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1 Madison, WI. International Wood Engineering Conference. USA.

Liu, J. Y., (1995). Shear Test Fixture Design for Orthotropic Materials. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, One Gifford Pinchot Dr., Madison, WI 53705-2398.

Liu, J. (2001). Strength Criteria for Orthotropic Materials. Proceedings of ICCE/8 - Eighth Annual International Conferenca on Composites Engineering. August 5-11, 2001. Tenerife, Canary Islands, Spain.

Louzada, J. L. P. C. (2000). Variação Fenotípica e Genética em Características Estruturais na Madeira de *Pinus pinaster* Ait.. O comprimento das fibras e a densidade até aos 80 anos de idade das árvores. Parâmetros genéticos na evolução juvenil-adulto das componentes da densidade da madeira. UTAD, Série Didáctica, Ciências Aplicadas nº 143, Vila Real, 293pp.

Machado, J. M. S., (2000). Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus pinaster* AIT.) por meio de ultra-sons. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. 204 p. Lisboa.

Mascia NT. (1991). Considerações a respeito da anisotropia na madeira. [Tese de Doutorado] São Carlos: EESC-USP;.

Mateus, J. E. Tomás., (1961). Bases para dimensionamento de estruturas de madeira. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 301 p. Lisboa.

Mattheck, C., Kuber, H., (1997). Wood – The Optimization of Trees. Springer Series in Wood Science. Germany.

Meyers and Chawla (1999): Section 13.10 of Mechanical Behaviors of Materials, Mechanical behavior of Materials, 570-580. Prentice Hall, Inc.

Morel, S.; Dourado, N; Valentin, G. (2005). Wood: a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation. International Journal of Fracture. Springer Netherlands. ISSN 0376-9429. Volume 131, Number 4 / February.

Morozov, E. V., Vasiliev, V. V. . (2003). Determination of the shear modulus of orthotropic materials from off-axis tension tests. Composite Structures. Volume 62, Issues 3-4. Pág. 379-382. Moura Branco; C. A. G. (1985). Mecânica dos Materiais. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

Murphy, J.F. (1979). Using fracture mechanics to predict failure of notched wood beams. In: Proceedings of first international conference on wood fracture; 1978, Aug. 14–16; Banff, AB. Vancouver, BC: Forintek Canada Corporation: 159: 161–173.

Nairn, J. A. (2005). Numerical Simulations of Transverse Compression and Densification in Wood. Wood and Fiber Science. (Submitted 2005).

Norris, C. B. (1962). Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses. US Forest Products Laboratory, Report No. 1816, Madison (WI), USA.

NP EN 1995-1-1:1993 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings.

Neumeister, Jonas, et al. (2004). A modified Iosipescu Test for Anisotropic Composite Panels. Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) SE – 100 44 Stockholm, Sweden.

Oliveira, J. M. Q., (2004). Aplicação do ensaio de Arcan na determinação do comportamento ao corte da madeira de Pinus Pinaster, AIT. Tese de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 145pp.

Olsson, Anne-Mari; Salmén, L; Burgert, M. E. I. (2007). Mechano-sorptive creep in wood fibres. Wood Science and Technology, 41: 59-67.

Paccola, R. R., (2004). Análise não linear física de placas e cascas anisotrópicas laminadas acopladas ou não com meio contínuo tridimensional viscoelástico através da combinação entre o MEC e o MEF. Tese de doutoramento. Universidade de S. Carlos. Brasil.

Smith, I.; Landis, E.; Gong, M. (2003). Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley and Sons Publications. ISBN 0471487082. New York. 242 p.

Soltis, Lawrence A.. (1999). Wood handbook. Wood as an engineering material. Chapter 8 - Structural Analysis Equations. Forest Products Laboratory. 463 p.

Timoshenko, S. P. (1976). Resistência dos Materiais. Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A.. São Paulo.

Tsoumis, G., (1991). Science and Techology of Wood. Structure, Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold, 494 pp.

Vidal-Sallé, E; Chassangne, P. (2007). Constitutive equations for orthotropic nonlinear viscoelastic behaviour using a generalized Maxwell model Application to wood material. Mech Time-Dependent Mater. 11: 127-142.

Xavier, J., et al. (2003). Measurement of the Shear Modulus of Wood Pinus Pinaster AIT., by Iosipescu Test: Numerical Aspects.

Xavier, J. C., et al. (2004). A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. Science direct. Elsevier. 14pp.

Yoshihara, H., H. Ohsaki, Y. Kubojima, M. Ohta, (2001). Comparisons of shear stress/shear strain relations of wood obtained by Iosipescu and torsion tests. Wood and Fiber Science, 33 (2), pp. 275–283.

Zimmermann, M. H., (1993). Xylem Structure and Ascent of Sap. In Springer Series in Wood Science. Ed: T. E. Timell. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, 143 pp.

Zienkiewicz, O. C. (1977). The Finite Element Method. McGraw-Hill Book Company. UK. 783p.

Zihui Xia; Shen, X; Ellyin, F., (2006). An Assessment of Nonlinearly Viscoelastic Constitutive Models for Cyclic Loading: The Effect of a General Loading/Unloading Rule. Mechanics of Time-Dependent Materials; 9: 281-300. Springer.

Zobel, B. J.; Buijtenen, J. P. (1989). Wood Variation – Its Causes and Control. In Springer Series in Wood Science. Ed: T. E. Timell. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 240 pp.

Índice remissivo

anti-borracha.....	68	Kelvin-Voigt.....	92
ASTM D 143.....	30, 84	Lamé–Rankine.....	112
ASTM D143.....	56	lei de Hooke.....	47, 74
auxéticos.....	68	lenho juvenil.....	17
B.S. 373	57	lúmens.....	24
B.S.373.....	55	massa volúmica.....	14
bi-material.....	228	materiais ortotrópico.....	116
borne.....	19	material ortotrópico.....	23
carga-deformação.....	61	método “off-axis”.....	90
cerne.....	19	método “resanalyser”.....	71
círculo de Mohr.....	27, 72	método de Arcan.....	89
coeficiente de Poisson.....	67	microfibrilas.....	24, 102
Coeficiente de Poisson.....	51	modelo.....	224
coeficientes de Poisson.....	146	modelo SLS.....	93
compressão paralela.....	34, 153	modelos matemáticos.....	28
compressão transversal.....	36, 185	Modos de propagação de fendas.....	258
concentração de tensões.....	109	módulo de corte.....	28, 179
constantes elásticas.....	29	módulo de elasticidade.....	28, 53, 91, 153
corte paralelo.....	38	módulo de elasticidade aparente.....	64
corte transversal.....	43	módulo de elasticidade global.....	63
critério de Norris.....	117	módulo de elasticidade local.....	63
critério de Tresca.....	116, 120	módulos de elasticidade.....	196
critério de von Mises.....	114	NF B 51-016	59
deformação visco-plástica.....	98	nós.....	16
EN 310	61	ortotrópico.....	81
EN 408:2003.....	31, 62, 84, 196	Poisson.....	67
equilíbrio higroscópico.....	11	polímero birrefringente.....	237
extensómetros.....	30, 195	relaxação.....	103
fendimento.....	38	retracção.....	15
fio.....	15	rolling shear.....	44
flexão.....	44	Saint-Venant.....	46, 111
fluência.....	100, 214	tensão de ruptura.....	141
fluência mecânico-sortiva.....	98	tensões.....	27
fluência visco-elástica.....	96	tracção paralela.....	30, 138, 255
fórmula de Hankinson.....	118	tracção transversal.....	32
fotoelasticidade.....	238	traqueídos.....	18
hemicelulose.....	8, 24	Tsai e Hill.....	121
Iosipescu.....	84	visco-elástico.....	91
ISO 3349	60	Weibull.....	125