



**João Luís Carreiras Ribeiro Parracha**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação do impacto de caruncho pequeno  
em estruturas antigas de madeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Lina Maria Ribeiro Nunes, Investigadora Auxiliar,  
Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de  
Engenharia Civil

Coorientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora  
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando F. S. Pinho  
Arguente: Prof. Doutor Carlos M. Chastre Rodrigues  
Vogal: Doutora Lina Maria Ribeiro Nunes



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

novembro de 2018



“Copyright” João Luís Carreiras Ribeiro Parracha, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



“Se desejais conseguir o conhecimento das formas das coisas, começai com o pormenor e passai apenas de um pormenor para outro quando tiverdes fixado o primeiro firmemente na vossa memória e estiverdes familiarizado com ele.”

Leonardo, *Codex Trivulzianus*

Para o meu avô, *Luís Azinheirinha Carreiras*



## AGRADECIMENTOS

À Doutora Lina Nunes, minha orientadora, agradeço a sua enorme disponibilidade, partilha de conhecimento, simpatia e amizade. Por ter despertado em mim o gosto pelo tema das Estruturas de Madeira, tantas vezes maltratado de forma injusta e, no entanto, com tanto potencial.

À Professora Paulina Faria, minha coorientadora, agradeço a oportunidade que me deu de realizar a dissertação no tema das madeiras e numa instituição como o LNEC. Agradeço, ainda, à Professora toda a sua disponibilidade, revisão do texto e partilha de conhecimento, não só no decorrer desta dissertação, como também através das suas aulas.

Ao Professor Manuel Francisco Costa Pereira, do IST, agradeço a disponibilidade, de forma desinteressada, para a utilização do equipamento de micro tomografia computadorizada, essencial para que este trabalho tomasse outras proporções.

Ao Professor António Maurício, do IST, agradeço a ajuda prestada no tratamento e interpretação dos resultados provenientes da micro tomografia computadorizada. Agradeço, ainda, ao Professor todas as discussões demoradas, mas interessantíssimas, no Pavilhão de Minas do IST.

Ao Núcleo de Comportamento de Estruturas do Departamento de Estruturas do LNEC, nas pessoas do Doutor Saporiti Machado, Doutora Sónia Duarte, Engenheiro António Silva, Engenheiro Filipe Pereira, Mestre Marta Duarte e Senhor Paulo Frazão, por me terem acolhido no núcleo e me terem ajudado sempre que necessitei.

A todos os que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização desta dissertação e para o meu percurso académico, o meu Muito Obrigado!

Agradeço às instituições: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL).

Aos meus pais, por me terem proporcionado que me dedicasse exclusivamente aos meus estudos.

À minha irmã, pela amizade e paciência na revisão do texto.

À minha avó, agradeço por tudo.



## RESUMO

A madeira foi um dos primeiros materiais de construção a ser utilizado pelo Homem, devido não só à sua relativa abundância na natureza, como também por possuir excelentes características mecânicas, físicas e de durabilidade. No entanto, por se tratar de um material orgânico de origem biológica, é suscetível a degradação, que é frequentemente causada por agentes biológicos, nomeadamente fungos e insetos. Enquanto a ação dos fungos de podridão tende a ser localizada, a ação dos insetos pode ser extensa e a infestação, geralmente, leva a uma deterioração mais generalizada na estrutura de madeira.

Em Portugal, os insetos que mais problemas causam às estruturas de madeira são as térmitas subterrâneas e os insetos de madeira seca, de onde se destacam os carunchos. Os danos causados por estes agentes são justificação frequente para uma substituição total ou parcial das estruturas afetadas, uma vez que a avaliação da integridade estrutural existente se torna difícil. Esta remoção ou substituição de elementos degradados pode não ser necessária, uma vez que a segurança estrutural pode continuar garantida. Além disso, este tipo de operações é, geralmente, difícil de realizar e dispendioso. Torna-se necessária, então, uma avaliação estrutural rigorosa e devem ser tomadas medidas apropriadas para que se garanta um nível de segurança adequado, racionalizando a intervenção.

No caso de ataque por carunchos pequenos, uma das grandes dificuldades que existe prende-se com a necessidade de quantificar a resistência das secções transversais da madeira com danos devido à ação destes agentes. Os efeitos desta ação podem ser considerados, de forma geral, assumindo uma redução da secção transversal ou propriedades mecânicas inferiores para essas secções transversais. No entanto, desconhece-se o impacto real da ação do inseto em estruturas de madeira, desconhecendo-se, portanto, o nível de intervenção necessário na estrutura.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto da ação de caruncho pequeno em estruturas antigas de madeira.

Numa primeira fase, realizaram-se ensaios de compressão paralela às fibras e de arrancamento perpendicular às fibras em provetes de madeira antiga (*Pinus pinaster* Ait.) degradados por caruncho (PN), em provetes com tentativa de simulação da degradação (PA) e em provetes de controlo de madeira sã (PS). Os resultados são apresentados e discutidos.

Numa segunda fase, recorreu-se à técnica de micro tomografia computadorizada (micro-CT) para a determinação da percentagem de material perdido (consumido pelos carunchos). Conhecendo-se este valor, é possível determinar-se a perda de massa volúmica decorrente da degradação. O conhecimento deste parâmetro é de extrema importância para a avaliação do estado da madeira, uma vez que é altamente correlacionável com a maioria dos parâmetros de avaliação mecânica. Foram submetidos a micro-CT 18 provetes. Estabeleceram-se correlações entre a percentagem de material perdido e as massas volúmicas (original e residual). Concluiu-se sobre os resultados obtidos e refletiu-se sobre a aplicação da técnica de micro-CT ao estudo.

Apresentou-se um modelo de avaliação *in situ* para madeira degradada por caruncho pequeno, com base na realização de um ensaio semidestrutivo de arrancamento de um parafuso. Realizaram-se ensaios mecânicos de arrancamento perpendicular às fibras e de corte paralelo às fibras. A possibilidade de prever as propriedades da madeira através da aplicação da técnica foi discutida com base em modelos simples de regressão linear. Correlacionou-se a perda das propriedades mecânicas do elemento com a perda de massa volúmica existente e, conseqüentemente, a perda de massa volúmica com a resistência ao corte paralelo do elemento.

Finalmente, propõe-se uma ferramenta de avaliação *in situ* do estado e qualidade da madeira existente.

**Palavras-chave:** degradação da madeira, infestação por caruncho pequeno, avaliação de dano, avaliação *in situ*, resistência residual, micro tomografia computadorizada



## ABSTRACT

Timber is one of the oldest construction materials known and has been used in the construction industry over the years, not only because of its relative abundance in nature but also for its unique physical, mechanical and durability characteristics. However, due to its biological origin, it is susceptible to degradation, which is frequently caused by biological agents, namely fungi and insects. While fungal decay tends to be localised, insect degradation often leads to a general deterioration of the structure.

In Portugal, the insects that cause most problems to timber structures are subterranean termites and drywood insects, which includes beetles. The damage caused by these agents is a frequent justification for partial or complete replacement of structures since it is difficult to assess the structural soundness of the remaining timber. A structural assessment is certainly required in cases of insect damage to the timbers and measures must be taken to guarantee an adequate safety level. However, degraded members are commonly assessed as not having any residual strength and thus replaced. Removal and replace of affected structural elements is regularly difficult and expensive and it may, nevertheless, happen that there is no need to do it, as structural safety is still guaranteed.

A preliminary visual inspection of the structure is important to identify the damage and susceptible zones. However, the major difficulty concerns the assessment of the effective strength of timber cross sections with biological damages. The effect of beetles' attack is considered by assuming a reduced cross section or reduced mechanical properties for that cross sections. However, this may although be too conservative, as even the insect damaged-layer can be able to resist load.

The main objective of the work reported in this thesis is to evaluate the impact of anobiid damage on pine timber structures.

In a first phase of the study, compression parallel to the grain and screw withdrawal perpendicular to grain tests have been made in pine (*Pinus pinaster* Ait.) naturally degraded by anobiids (NS) and in pine with artificially bored galleries (AS). The results obtained for NS and AS are compared, and conclusions are drawn.

In a second phase, micro computed tomography (micro-CT) was used to calculate lost material percentage (consumed by beetles). By knowing this value, it is possible to estimate the loss of density. Knowledge of this parameter is of paramount importance to know the level of deterioration and the real impact of this on the structure as it is highly correlated with the mechanical properties of timber. 18 samples were submitted to micro-CT. Relations between lost material percentage and timber densities (original and residual) are established. Suggestions and guidelines that can be used during a micro-CT study were provided as well as all the procedure inherent to micro-CT methodology.

An *in situ* assessment method to measure residual strength of pine timber naturally degraded by anobiids based on a screw withdrawal test was developed. Screw withdrawal and shear parallel to the grain tests have been made. The possibility of predicting wood properties by application of this method is discussed based on simple linear regression models. The loss of timber density is correlated with the loss of mechanical properties.

Finally, an *in situ* assessment method to measure the residual strength of anobiids infested timber based on a screw withdrawal test is proposed.

**Keywords:** timber degradation, anobiids infestation, damage assessment, *in situ* assessment, residual strength, micro-computed tomography



## ÍNDICE DE TEXTO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação e enquadramento .....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	2
1.3. Estrutura e organização da dissertação .....	2
1.4. Disseminação de resultados .....	3
<b>2. A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1. Características gerais da madeira.....	5
2.1.1. Constituição e variabilidade da madeira .....	6
2.1.2. Caracterização comportamental da madeira.....	9
2.1.3. Defeitos e singularidades da madeira.....	10
2.2. Propriedades da madeira.....	14
2.2.1. Propriedades físicas.....	14
2.2.2. Propriedades químicas.....	17
2.2.3. Propriedades mecânicas .....	17
2.3. Madeira de pinho bravo .....	22
2.3.1. Características gerais.....	22
2.3.2. Propriedades físicas.....	23
2.3.3. Propriedades mecânicas .....	24
<b>3. DEGRADAÇÃO DA MADEIRA .....</b>	<b>25</b>
3.1. Degradação da madeira por agentes físicos e químicos.....	26
3.2. Degradação da madeira por agentes biológicos.....	27
3.3. Degradação da madeira por carunchos .....	31
3.3.1. Generalidades .....	31
3.3.2. Danos e tratamento da madeira .....	33
3.3.3. Caruncho pequeno – Família Anobiidae .....	34
<b>4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>35</b>
4.1. Programa experimental .....	35
4.1.1. Considerações gerais .....	35
4.1.2. Categorização e caracterização das amostras .....	35
4.1.2.1. Peças artificiais e sãs (PA e PS) .....	36
4.1.2.2. Peças naturais (PN).....	36
4.2. Procedimentos experimentais .....	38
4.2.1. Determinação do teor de água e massa volúmica.....	38
4.2.2. Ensaio de compressão paralela às fibras .....	38
4.2.3. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras .....	39
4.3. Apresentação e discussão de resultados.....	40
4.3.1. Teor de água e massa volúmica.....	40
4.3.2. Resistência à compressão paralela às fibras .....	42
4.3.2.1. Peças naturais (PN).....	42

4.3.2.2. Peças artificiais e peças sãs (PA e PS).....	43
4.3.2.3. Correlação e comparação de resultados.....	46
4.3.3. Resistência ao arrancamento perpendicular às fibras.....	47
4.3.3.1. Peças naturais (PN).....	47
4.3.3.2. Peças artificiais e peças sãs (PA e PS).....	47
4.3.3.3. Correlação e comparação de resultados.....	50
4.4. Síntese final.....	51
<b>5. ANÁLISE QUANTITATIVA DE MADEIRA DEGRADADA POR CARUNCHO.....</b>	<b>53</b>
5.1. Considerações gerais.....	53
5.2. Princípios de micro tomografia computadorizada.....	53
5.3. Materiais e métodos.....	55
5.3.1. Preparação das amostras.....	55
5.3.2. Processo de aquisição.....	57
5.3.3. Reconstrução.....	58
5.3.4. Análise.....	59
5.4. Apresentação e discussão de resultados.....	61
5.5. Síntese final.....	65
<b>6. DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO <i>IN SITU</i> DE MADEIRA DEGRADADA POR CARUNCHO.....</b>	<b>67</b>
6.1. Considerações gerais.....	67
6.2. Procedimentos experimentais.....	67
6.2.1. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras.....	67
6.2.2. Ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623.....	68
6.2.3. Ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408.....	69
6.3. Apresentação e discussão de resultados.....	69
6.3.1. Resistência ao arrancamento perpendicular às fibras.....	70
6.3.2. Resistência ao corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623.....	71
6.3.3. Resistência ao corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408.....	73
6.4. Desenvolvimento de um modelo de avaliação <i>in situ</i> de madeira degradada.....	74
6.4.1. Background.....	74
6.4.2. Aplicação.....	75
6.5. Síntese final.....	76
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
7.1. Considerações finais.....	77
7.2. Desenvolvimentos futuros.....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>85</b>
I. Resultados detalhados do capítulo 4.....	85
II. Resultados detalhados do capítulo 5.....	98
III. Resultados detalhados do capítulo 6.....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Percentagem das obras de reabilitação no total de obras concluídas (2006, 2011, 2016) (INE, 2007; INE, 2017).....	1
Figura 2.1 – Estrutura da árvore (adaptado de Humphries & Sutton, 1996).....	5
Figura 2.2 – Secção transversal de um tronco (LNEC, 1995).....	6
Figura 2.3 – Estrutura microscópica da madeira (Machado et al., 2009): (a) Resinosa; (b) Folhosa.....	7
Figura 2.4 - Direções principais consideradas numa peça de madeira (Machado et al., 2009).....	9
Figura 2.5 - Curvas de equilíbrio higrométrico para madeira de pinho (Cruz & Nunes, 2012).....	10
Figura 2.6 - Medição dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e do KAR marginal (LNEC, 1997).....	11
Figura 2.7 – Medição de fendas (LNEC, 1997). ....	12
Figura 2.8 – Medição do fio (LNEC, 1997). ....	12
Figura 2.9 – Medição do descaio (LNEC, 1997).....	13
Figura 2.10 – Medição da taxa de crescimento (NP 4305, 1995).....	13
Figura 2.11 – Medição de empenos (NP 4305, 1995).....	14
Figura 2.12 – Fases de evaporação da água na madeira (LNEC, 1997).....	15
Figura 2.13 – Coeficientes de retração em termos relativos em função do plano considerado (valores para o pinho bravo) (LNEC, 1997). ....	16
Figura 2.14 – (a) tração perpendicular às fibras; (b) compressão perpendicular às fibras (Durán, 2003)...	20
Figura 2.15 – Diagramas de distribuição de tensões (Cachim, 2007). ....	21
Figura 2.16 -Modos de rotura por corte (Cachim, 2007).....	21
Figura 2.17 – Fluência da madeira (Pfeil & Pfeil, 2003).....	22
Figura 2.18 – Ocupação do solo (esquerda) e espécies florestais existentes (direita) (ICNF, 2013). ....	22
Figura 2.19 -Provetes de madeira não degradada de pinho bravo. ....	23
Figura 3.1 - Esquema da secção de madeira ardida (adaptado de www1, 2007). ....	27
Figura 3.2 – Degradação por ação de fungos; (a) <i>Serpula lacrymans</i> (Pottier et al., 2014); (b) <i>Gloeophyllum trabeum</i> (Lindsey, 2018).....	28
Figura 3.3 - (a) Térmitas subterrâneas (Nunes, 2006); (b) Aspeto "lamelado" da madeira atacada (Cruz & Nunes, 2008). ....	29
Figura 3.4 - Degradação por ação de térmitas de madeira seca (www2, 2005). ....	31
Figura 3.5. Adultos de algumas das principais espécies de carunchos existentes em Portugal; (a) <i>Hylotrupes bajulus</i> (adaptado de www3, 2018); (b) <i>Anobium punctatum</i> (adaptado de www4, 2018); (c) <i>Lyctus brunneus</i> (adaptado de www5, 2018).....	32
Figura 3.6 - (a) Orifícios de saída de carunchos; (b) Orifícios de térmitas de madeira seca (www1, 2018). ....	33
Figura 4.1 – Representação esquemática da campanha experimental realizada.....	36
Figura 4.2 - Peças no processo de análise visual e de marcação. ....	36

Figura 4.3 – (a) Viga 2 marcada {2,1,4}; (b) Secção transversal viga 3 {3,4,A}. .....	37
Figura 4.4 - Número de orifícios de saída existentes por troço de peça considerado.....	37
Figura 4.5 – Ensaio de compressão axial: (a) equipamento de ensaio; (b) pormenor de um ensaio de compressão.....	38
Figura 4.6 - Exemplo de gráfico força-deslocamento, obtido para PA, até à rotura em compressão.....	39
Figura 4.7 - Ensaio de arrancamento: (a) PA para ensaio; (b) pormenor de um ensaio de arrancamento...	39
Figura 4.8 - Resultados dos ensaios de Gilfillan & Gilbert (2001). .....	40
Figura 4.9 – Histograma da massa volúmica "original" dos provetes, sem correção para H = 12%.....	41
Figura 4.10 – Histograma da massa volúmica dos provetes, com correção para H = 12%.....	41
Figura 4.11 – Histograma dos valores obtidos para a resistência à compressão dos PN, com sobreposição da densidade de valores, permitindo uma análise visual da normalidade dos dados.....	42
Figura 4.12 – Valores médios e desvios-padrão de resistência paralela às fibras obtidos para peças PS e PA.....	44
Figura 4.13 – Correlações obtidas entre $f_c, 0$ e a massa volúmica para amostras PS e PA com 1 furo/cm <sup>2</sup> e 2 furos/cm <sup>2</sup> .....	45
Figura 4.14 – Correlações obtidas entre $f_c, 0$ e a massa volúmica para amostras PS e PA.....	45
Figura 4.15 – <i>Boxplots</i> para PS, PA e PN. ....	46
Figura 4.16 – Valores médios e desvios-padrão de arrancamento perpendicular às fibras obtidos para peças PS e PA.....	48
Figura 4.17 – Correlações obtidas entre $f$ e a massa volúmica para amostras PS e PA com 1 furo/cm <sup>2</sup> e 2 furos/cm <sup>2</sup> . ....	49
Figura 4.18 – Correlações obtidas entre $f$ e a massa volúmica para amostras PS e PA.....	49
Figura 4.19 – Correlações obtidas entre $f$ e a massa volúmica para amostras PS e PA, com referência a correlação proposta por Maldonado et. al. (2007).....	50
Figura 4.20 – <i>Boxplots</i> para PS, PA e PN. ....	51
Figura 5.1 – Scanner micro-CT Skyscan 1172 - 1.3 Mpix utilizado para a aquisição das imagens.....	54
Figura 5.2 – Processo de identificação da espécie atacante: (a) pupa; (b) inseto da família Anobiidae. ....	55
Figura 5.3 – Peça de madeira utilizada no estudo de micro-CT.....	56
Figura 5.4 – Amostras de madeira degradada submetidas à micro-CT distribuídas por “níveis de degradação”: (a) nível 1; (b) nível 2; (c) nível 3. ....	56
Figura 5.5 – Objeto 3D reconstruído. Visualização através do programa CTVox.....	58
Figura 5.6 – Imagens 2D do objeto reconstruído: (a) plano coronal; (b) plano sagital; (c) plano transaxial. ....	59
Figura 5.7 – Imagens das várias fases da técnica de micro-CT: (a) Processo de aquisição; (b) Depois da reconstrução; (c) Imagem binarizada; (d) Imagem tratada pronta para o cálculo. ....	59
Figura 5.8 – Imagens da amostra 1.1; (a) Imagem inicial 3D em escala de cinzentos; (b) Imagem binarizada e tratada pronta para o processo de cálculo. ....	61

Figura 5.9 – Histograma dos valores obtidos para a percentagem de material perdido. ....	63
Figura 5.10 – <i>Boxplots</i> : (a) percentagem de material perdido; (b) massa volúmica original; (c) massa volúmica residual. ....	64
Figura 5.11 – Correlação obtida entre a massa volúmica original e a percentagem de material perdido....	64
Figura 5.12 – Correlação obtida entre a massa volúmica residual e a percentagem de material perdido. ..	65
Figura 6.1 – Detalhe do ensaio de arrancamento na peça de madeira. ....	67
Figura 6.2 – Esquema do ensaio de arrancamento (adaptado de Tannert et al., 2014). ....	68
Figura 6.3 – Ensaio de corte segundo a NP 623 (1973). ....	68
Figura 6.4 – Ensaio de corte segundo a EN 408 (2010): (a,c) pormenores do ensaio; (b) esquema do ensaio (adaptado da EN 408, 2010). ....	69
Figura 6.5 – Representação esquemática para os ensaios de arrancamento. ....	70
Figura 6.6 – Correlações obtidas entre a força de arrancamento e a massa volúmica original (a) e entre a força de arrancamento e a massa volúmica residual (b). ....	71
Figura 6.7 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: força de arrancamento em função da massa volúmica original (a) e força de arrancamento em função da massa volúmica residual (b). ....	71
Figura 6.8 – Correlações obtidas entre a tensão de corte e a massa volúmica original (a) e entre a tensão de corte e a massa volúmica residual (b). ....	72
Figura 6.9 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: tensão de corte em função da massa volúmica original (a) e tensão de corte em função da massa volúmica residual (b). ....	72
Figura 6.10 – Correlações obtidas entre a tensão de corte e a massa volúmica original (a) e entre a tensão de corte e a massa volúmica residual (b). ....	73
Figura 6.11 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: tensão de corte em função da massa volúmica original (a) e tensão de corte em função da massa volúmica residual (b) ....	74
Figura 6.12 – Tipos de equipamento disponíveis para a realização do ensaio de arrancamento <i>in situ</i> (Yamagushi, 2010). ....	74
Figura 6.13 – Provetes depois do ensaio de corte, realizado de acordo com a EN 408 (2010). ....	75



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classes de resistência de acordo com a norma EN 338 (2009) para madeiras de resinosas.....	7
Tabela 2.2 – Classes de resistência de acordo com a norma EN 338 (2009) para madeiras de folhosas.....	8
Tabela 2.3 – Classificação da anisotropia da madeira (adaptado de Cachim, 2007).....	16
Tabela 2.4 – Duração das cargas (adaptado de Machado et al., 2009).....	18
Tabela 2.5 – Classes de serviço definidas no EC5 para as estruturas de madeira (adaptado de Machado et al., 2009).....	19
Tabela 2.6 – Propriedades físicas da madeira de pinho bravo (LNEC, 1997).....	23
Tabela 2.7 – Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de pinho bravo (LNEC, 1997).....	24
Tabela 2.8 – Valores característicos das propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo (adaptado de LNEC, 1997). ....	24
Tabela 3.1 – Síntese das classes de risco, situações gerais de serviço e agentes biológicos suscetíveis de atacar a madeira e os seus derivados (adaptado de Nunes, 2013). ....	25
Tabela 3.2 - Algumas características identificadoras do ataque por térmitas da madeira seca. (adaptado de Parracha et al., 2018). ....	30
Tabela 3.3 - Algumas características do ataque dos principais carunchos em Portugal (adaptado de Cruz & Nunes, 2012; Berry, 1994). ....	32
Tabela 4.1 – Sistema de furação.....	35
Tabela 4.2 - Valores de teor de água e de massa volúmica obtidos antes e depois da correção para um teor de água de 12%. ....	41
Tabela 4.3 – Valores de força máxima e resistência à compressão paralela às fibras em peças PN. ....	42
Tabela 4.4 – Notação utilizada na identificação das peças sãs e artificiais. ....	43
Tabela 4.5 – Valores de resistência obtidos para o ensaio de compressão paralela às fibras em peças PA e PS.....	44
Tabela 4.6 – Valores de força máxima e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras em peças PN.....	47
Tabela 4.7 – Notação utilizada na identificação das peças sãs e artificiais. ....	47
Tabela 4.8 – Valores de resistência ao arrancamento perpendicular às fibras em peças PA e PS. ....	48
Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros definidos para o processo de aquisição .....	57
Tabela 5.2 – Parâmetros de reconstrução base adotados utilizando o software NRecon. ....	58
Tabela 5.3 – Algoritmo 1 definido para o Nível de degradação 1.....	60
Tabela 5.4 – Algoritmo 2 definido para o Nível de degradação 2.....	60
Tabela 5.5 – Algoritmo 3 definido para o Nível de degradação 3.....	61
Tabela 5.6 – Valores obtidos depois da análise em micro-CT em cada nível e amostra (parâmetros de interesse, massas e massas volúmicas). ....	62
Tabela 5.7 - Classes de degradação propostas por Brozovsky et al. (2008).....	63

Tabela 6.1 – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento perpendicular às fibras. ....	70
Tabela 6.2 – Valores de força máxima e resistência obtidos no ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623 (1973).....	72
Tabela 6.3 – Valores de força máxima e resistência obtidos no ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408 (2010). ....	73

## SIMBOLOGIA

### Siglas

BS – British Standard  
CEN – Comité Européen de Normalisation  
CR – Classe de Risco  
EC5 – Eurocódigo 5  
ELS – Estados Limite de Utilização ou de Serviço  
ELU – Estados Limite Últimos  
EN – European Norm  
FCT NOVA – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa  
IABSE – International Association for Bridge and Structural Engineering  
ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas  
INE – Instituto Nacional de Estatística  
IPQ – Instituto Português de Qualidade  
ISO – International Organization for Standardization  
IST-UL – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa  
LAMPIST – Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
NIH – National Institute of Health  
NP – Norma Portuguesa

### Trabalho experimental

$E_{mean}$  – valor médio do modo de elasticidade  
 $E_{0,05}$  – valor característico do modo de elasticidade  
 $f_{c,0,k}$  – resistência característica à compressão paralela às fibras  
 $f_{t,90,k}$  – resistência característica à compressão perpendicular às fibras  
 $f_d$  – valores de cálculo das tensões resistentes  
 $f_k$  – valores característicos  
 $f_{m,k}$  – resistência característica à flexão estática  
 $f_{t,0,k}$  – resistência característica à tração paralela às fibras  
 $f_{t,90,k}$  – resistência característica à tração perpendicular às fibras  
 $f_{v,k}$  – resistência característica ao corte  
 $G_{mean}$  – valor médio do modo de distorção  
H – teor de água  
KAR – knot area ratio  
 $k_{def}$  – fator de fluência, definido no EC5  
 $k_{mod}$  – fator de correção, definido no EC5  
PA – provetes artificiais  
PN – provetes naturais  
PS – provetes sãos  
PSF – ponto de saturação das fibras  
 $R_r$  – coeficiente de retração unitária radial  
 $R_t$  – coeficiente de retração unitária tangencial  
 $u_c$  – deformação permanente da estrutura  
 $u_{el}$  – deformação em regime elástico  
 $u_{total}$  – deformação total na estrutura  
W – teor de água de equilíbrio  
 $\alpha_v$  – coeficiente de retração volumétrica  
 $\rho_H$  – massa volúmica para um dado H  
 $\rho_k$  – valor característico da massa volúmica  
 $\rho_{mean}$  – massa volúmica média  
 $\rho_{12}$  – massa volúmica para H = 12%

$\gamma_m$  – coeficiente parcial de segurança, definido no EC5  
 $\varphi$  – fator de fluência

### **Ensaaios e determinações**

CT – tomografia computadorizada

CV – coeficiente de variação

$d$  – diâmetro interior do parafuso

$F_{m\acute{a}x}$  – força de arrancamento do parafuso

$f$  – resistência ao arrancamento perpendicular às fibras

$f_{ax,90,k}$  – resistência característica ao arrancamento perpendicular às fibras

$f_{c,0}$  – resistência à compressão paralela às fibras

$I(x)$  – intensidade de raios-X que passam pelo objeto

$l_p$  – profundidade de penetração do parafuso na madeira

micro-CT – micro tomografia computadorizada

ROI – region of interest

$\tau$  – resistência ao corte paralelo às fibras

$\mu$  – coeficiente de atenuação linear do material

$\rho_{original}$  – massa volúmica original

$\rho_{residual}$  – massa volúmica residual

VOI – volume of interest

$\Delta\rho$  – perda total de massa volúmica

$\sigma^2$  – variância

$\sigma$  - desvio padrão

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação e enquadramento

Em Portugal, sobretudo desde os anos 70 do século XX até à última década, verificou-se um forte abandono e uma acentuada degradação dos edifícios antigos. Nas últimas décadas do século XX, os incentivos foram, de facto, para a construção nova e, nessa altura, foi visível o aumento crescente do número de edifícios de habitação em Portugal (Freitas, 2012). Desde o início do século XXI que o panorama se tem alterado com o aumento do número de obras de reabilitação, que já contabilizam, de acordo com dados de 2016, 31% do total dos edifícios concluídos (INE, 2017) (Figura 1.1). Os elevados níveis de construção nova verificados no passado, refletem-se agora na existência de inúmeros edifícios antigos, que não foram alvo de ações de manutenção periódicas ao longo do tempo e, por isso, apresentam problemas ao nível estrutural e ao nível dos revestimentos. Para fazer face a essa situação, é fundamental reabilitar de forma ponderada, observando dois princípios: a manutenção dos materiais originais sempre que possível e o conhecimento aprofundado por parte dos técnicos responsáveis das técnicas de construção utilizadas à época. A decisão de intervir num edifício deve passar, então, por uma avaliação rigorosa do seu estado de degradação, respeitando-se sempre a identidade cultural e o valor histórico do edifício intervencionado (Appleton, 2003).

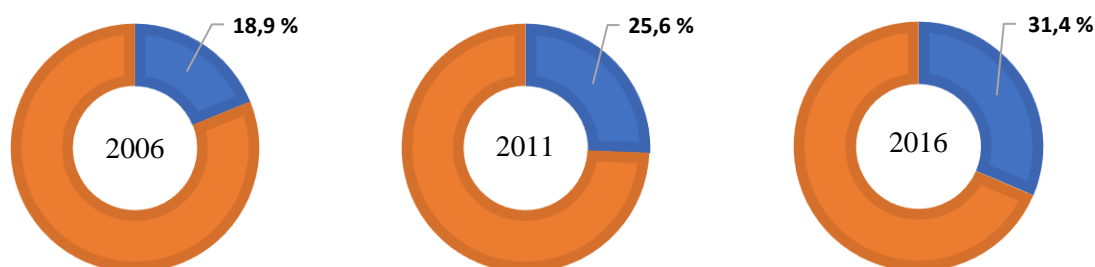


Figura 1.1 – Percentagem das obras de reabilitação no total de obras concluídas (2006, 2011, 2016) (INE, 2007; INE, 2017).

A madeira foi um dos primeiros materiais de construção a ser utilizado pelo Homem, devido não só à sua relativa abundância na natureza, como também às suas excelentes características mecânicas, físicas e de durabilidade. Além disso, a madeira é considerada uma escolha ecológica para a construção devido ao facto de possuir um ciclo de vida global de baixa energia e ser um recurso renovável (Trusty, 1999). Por se tratar de um material fortemente anisotrópico, heterogéneo e existirem diversas espécies florestais, o comportamento da madeira em serviço é, de certa forma, desconhecido para muitos dos intervenientes no processo de construção. A madeira pode, conforme as condições de exposição, ficar sujeita a diversos agentes de degradação cuja ação diminui significativamente o seu tempo de vida útil. No entanto, em Portugal, existem inúmeros casos de estruturas de madeira com largas dezenas ou mesmo centenas de anos (Cachim, 2007), que demonstram que, quando aplicada da forma correta e sujeita a ações de proteção e manutenção periódicas, a madeira é reconhecida como um dos materiais de construção mais eficientes e sustentáveis.

A principal causa de deterioração da madeira advém do ataque de agentes biológicos, nomeadamente fungos e insetos (Cruz & Nunes, 2012). Em estruturas de madeira, a ação de fungos de podridão associados a níveis de teor de água elevados pode ser de extrema gravidade para a segurança da estrutura, mas a sua ação tende a ser localizada. No que diz respeito à ação de insetos, esta pode ser extensa e a infestação, geralmente, leva a uma deterioração mais generalizada na estrutura de madeira (Gilfillan & Gilbert, 2001). Os insetos que, em Portugal, mais problemas causam às estruturas de madeira são as térmitas subterrâneas e os insetos de madeira seca, principalmente carunchos, mas pontualmente, também, térmitas de madeira seca.

Em relação ao ataque por caruncho pequeno, uma das grandes dificuldades que existe, no que diz respeito à avaliação da segurança de estruturas antigas de madeira, prende-se com o facto de quantificar a resistência das secções transversais de madeira com danos devido à ação destes agentes biológicos (Cruz &

Machado, 2013). Os efeitos desta ação podem ser considerados, de forma geral, assumindo uma redução da secção transversal ou assumindo propriedades mecânicas inferiores para essas secções transversais (Cruz & Machado, 2013). No entanto, desconhece-se o impacto real da ação do inseto em estruturas de madeira, desconhecendo-se, portanto, o nível de intervenção necessário na estrutura.

A presente dissertação surge no âmbito do projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-HERITAGE, uma base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial e do projeto PTDC/ECM-EST/1072/2014: ProTimber, avaliação probabilística de estruturas de madeira, ambos financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. O trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Comportamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico e no Departamento de Engenharia Civil da Universidade NOVA de Lisboa.

### 1.2. Objetivos e metodologia

A avaliação da segurança das estruturas de madeira é um grande desafio, não só pelo comportamento diferido da madeira, como também pela complexidade estrutural verificada em algumas estruturas. Associado a este facto, se a estrutura se encontrar degradada devido à ação de insetos xilófagos, a complexidade da análise aumenta.

Estabeleceu-se como objetivo principal desta dissertação a avaliação do impacto da ação de caruncho pequeno na segurança estrutural de estruturas antigas de madeira, procurando contribuir-se, assim, para um alargamento da matriz de conhecimentos nesta matéria.

Para a concretização do objetivo final da dissertação, a metodologia adotada, foi a seguinte:

- levantamento bibliográfico relativo à caracterização da madeira enquanto material de construção e à degradação da madeira por ação de caruncho pequeno;
- avaliação do impacto da degradação devido à ação de caruncho pequeno nas propriedades mecânicas de estruturas antigas de madeira;
- contribuição para o desenvolvimento de um modelo de avaliação, com base em elementos de madeira degradados, que seja representativo do nível de degradação existente num determinado elemento estrutural.

### 1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, com a bibliografia e os anexos a constituírem capítulos independentes.

Neste primeiro capítulo, referente à introdução, apresentam-se o enquadramento e motivação para o tema, os objetivos da dissertação, a metodologia utilizada para os atingir e a organização da dissertação, com referência ao objetivo principal para cada capítulo.

No segundo capítulo, introduz-se a madeira como material de construção. Faz-se uma caracterização geral da madeira, referindo-se a sua constituição, variabilidade, caracterização comportamental e propriedades físicas, químicas, mecânicas e tecnológicas. No fim apresenta-se uma descrição da madeira de pinho bravo, estudada neste trabalho.

No terceiro capítulo, sintetiza-se a degradação da madeira por agentes físicos e químicos e por agentes biológicos, dando particular ênfase à degradação por caruncho. Faz-se uma breve descrição das famílias de carunchos existentes, das biológicas inerentes, das preferências alimentares e da tipologia de danos causados nos elementos de madeira, dando-se especial destaque à família Anobiidae – caruncho pequeno, responsável pela degradação da madeira alvo de estudo na dissertação. No fim, apresentam-se alguns tratamentos existentes para estruturas afetadas.

No quarto capítulo, procede-se à avaliação do impacto da degradação devido à ação de caruncho pequeno nas propriedades mecânicas de estruturas de madeira antigas. Descreve-se o processo de categorização e caracterização das amostras (216 provetes) e todos os procedimentos de ensaio realizados. Apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos efetuados (ensaio de compressão paralela às fibras e de arrancamento perpendicular às fibras) em provetes degradados pela ação de caruncho e com simulação da degradação. Correlacionam-se e comparam-se os resultados obtidos e conclui-se sobre estes.

No capítulo 5, estuda-se a caracterização de provetes de madeira com degradação por ação de caruncho pequeno (18 provetes) recorrendo-se à técnica de micro tomografia computadorizada (micro-CT) para determinação da percentagem de material perdido (consumido pelos carunchos). Apresenta-se toda a

metodologia utilizada na aplicação da técnica de micro-CT e analisam-se os resultados obtidos. No fim, conclui-se sobre a aplicação da técnica ao estudo.

No capítulo 6, último capítulo experimental, propõe-se uma técnica de avaliação *in situ* de madeira degradada por caruncho pequeno, apresentando-se um modelo que seja representativo do nível de degradação do elemento estrutural. Efetuam-se ensaios mecânicos de corte paralelo às fibras e de arrancamento perpendicular às fibras. Apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos efetuados. Correlacionam-se e comparam-se os resultados obtidos nos ensaios mecânicos com os dados provenientes do estudo de micro-CT. No fim, conclui-se sobre estes resultados, efetuando-se, ainda, uma reflexão sobre os resultados obtidos em todos os capítulos referentes ao trabalho experimental.

No capítulo 7, referente às conclusões, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos ao longo do estudo, referindo-se, igualmente, propostas de desenvolvimentos futuros.

Os anexos são constituídos pelos resultados parciais relativos ao estudo realizado nos capítulos 4, 5 e 6, bem como informação importante sobre procedimentos de ensaio adotados.

#### **1.4. Disseminação de resultados**

A presente dissertação de mestrado deu origem às seguintes publicações:

- Parracha, J. L., Duarte, S., Faria, P., Nunes, L. A importância dos insetos de madeira seca na reabilitação de estruturas de madeira. Construção2018 – Reabilitar e Construir de Forma Sustentável. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, novembro de 2018 (Artigo aceite)
- Nunes, L., Parracha, J. L., Faria, P., Palma, P., Maurício A., Pereira M. F. C. Towards an assessment tool of anobiid damage of pine timber structures. IABSE Symposium – Towards a Resilient Built Environment. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, março de 2019 (Artigo aceite)
- Parracha, J. L., Maurício, A., Pereira, M. F. C., Faria, P., Nunes, L. Evaluating anobiid deterioration in maritime pine timber using micro-computed tomography. (Artigo submetido à revista *Microscopy and Microanalysis*)
- Parracha, J. L., Pereira, M. F. C., Maurício, A., Machado, J. S., Faria, P., Nunes, L. A semi-destructive assessment method to estimate the residual strength of maritime pine timber structural elements degraded by anobiids. (Artigo submetido à revista *Materials and Structures*)



## 2. A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

### 2.1. Características gerais da madeira

A madeira é um material compósito natural de origem biológica proveniente de um organismo vivo, a árvore (Cruz & Nunes, 2012). Foi um dos primeiros materiais de construção a ser utilizado pelo Homem, tendo-se mantido esta relação ao longo do progresso da civilização. Tal deve-se, não só à sua relativa abundância na natureza, como também às suas excelentes características mecânicas, físicas e de durabilidade. Trata-se de um material naturalmente resistente e relativamente leve. Além disso, a madeira é tida como uma boa escolha ecológica para a construção por possuir um ciclo de vida global de baixa energia e ter um caráter renovável (Trusty et al., 1999).

Como material natural, a madeira apresenta uma heterogeneidade significativa e uma anisotropia acentuada. É um material higroscópico e apresenta, dentro de certos limites, um comportamento elástico.

Por se tratar de um material de origem biológica, é passível de deterioração, sendo que a principal causa se deve ao ataque de agentes biológicos, nomeadamente fungos e insetos (Cruz & Nunes, 2012).

Por todos estes motivos, a madeira enquanto material de construção, é merecedora de especial atenção na sua utilização, fundamentalmente se utilizada para funções estruturais. É, então, necessária a utilização de conhecimentos técnicos e científicos específicos, pois quando aplicada de forma correta e sujeita a ações de proteção e manutenção periódicas, a madeira é um dos materiais de construção mais eficientes e sustentáveis que existe.

Os principais constituintes da estrutura de uma árvore (Figura 2.1) são: raiz, fuste e copa. A raiz tem a função de agarrar a árvore ao solo e de absorver sais minerais e água, o fuste tem a função de suporte da árvore ao solo e de condução de sais minerais e água necessárias ao processo de fotossíntese, enquanto que a copa, constituída por ramos e folhas, tem como função o processo de fotossíntese, através da obtenção de oxigénio e hidratos de carbono, compostos essenciais para a árvore (Carvalho, 1996). Ao conjunto do fuste com a copa, dá-se o nome de tronco e é daí que se obtém a maioria do material lenhoso (madeira), embora se possa aproveitar a madeira proveniente das desramas.

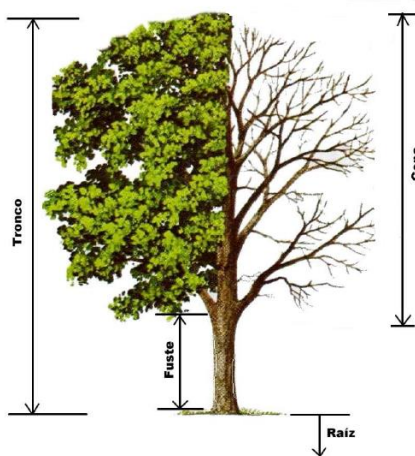


Figura 2.1 – Estrutura da árvore (adaptado de Humphries & Sutton, 1996).

O tronco (Figura 2.2) é constituído por diferentes elementos tais como a medula, o borne, o cerne, o câmbio, a casca e o entrecasco. O câmbio situa-se entre a casca e o borne e é constituído por células vivas que originam os anéis de crescimento e a casca. A árvore cresce em diâmetro devido à adição de novas células produzidas pelo câmbio, o qual é responsável pela produção de lenho para o interior e casca e entrecasco para o exterior, afastando-se progressivamente da medula (Carvalho, 1996; Cruz & Nunes, 2012).

O borne, geralmente de cor mais clara, é constituído pelas células vivas da árvore e é responsável pela sua atividade fisiológica, como seja a condução de água e de nutrientes no interior da árvore. Por sua vez, o cerne, geralmente de cor mais escura, constitui a zona central do tronco e resulta da morte das células, deixando de assegurar as funções fisiológicas da árvore. A transformação do borne em cerne dá-se entre os 5 e os 30 anos de vida da árvore, consoante a espécie, verificando-se alteração na cor do lenho, redução da

permeabilidade e aumento da durabilidade natural, decorrente do processo de deposição de um conjunto de compostos orgânicos denominados de extrativos (Machado et. al., 2009; Cruz & Nunes, 2012). A percentagem borne/cerne varia com a espécie considerada e, para algumas espécies, não existe distinção cromática entre borne e cerne (Machado et. al., 2009).

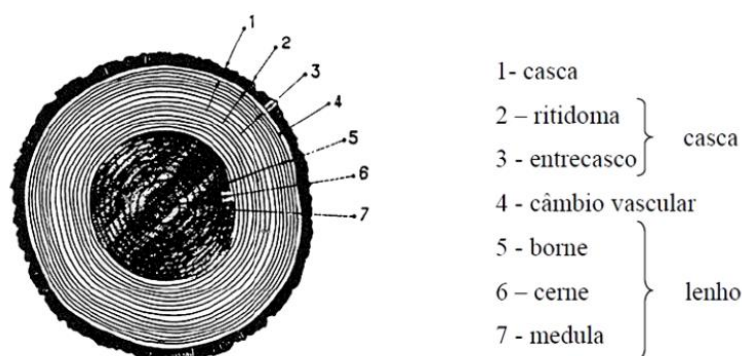


Figura 2.2 – Secção transversal de um tronco (LNEC, 1995).

As formações cíclicas do lenho, através do câmbio, denominam-se de camadas de crescimento (Carvalho, 1996). Estas camadas são constituídas por lenho de início de estação, ou lenho de primavera e lenho de fim de estação, ou lenho de outono. O lenho de primavera é, geralmente, mais claro que o de outono, existindo diferenças no calibre das células e na espessura das paredes celulares, uma vez que o lenho de primavera é constituído por células de grande largura e paredes finas, ao contrário do lenho de outono, com células de menor largura e paredes mais espessas, o que lhe confere maior resistência (Wiedenhoeft, 2011; Cruz & Nunes, 2012).

Em zonas de climas temperados, como no caso de Portugal, o conjunto do lenho de outono (anéis de outono) com o lenho de primavera (anéis de primavera) constitui um anel de crescimento e, por isso, é possível estimar a idade de uma árvore.

### 2.1.1. Constituição e variabilidade da madeira

Quando se analisa um elemento de madeira, pode fazer-se uma observação da sua microestrutura a uma escala celular ou uma observação da sua macroestrutura a uma escala real da madeira como material de construção (Machado et al., 2009). A nível macroscópico, com uma visualização a olho nu ou com recurso a uma lupa, é possível observar-se a constituição da peça de madeira (borne, cerne, entre outros) e possíveis singularidades ou defeitos existentes que irão influenciar substancialmente as suas propriedades mecânicas. A nível microscópico e, através da observação do arranjo anatómico da madeira, é possível efetuar-se a distinção entre as diferentes espécies florestais e fazer-se desde logo a distinção entre dois grandes grupos: as gimnospérmicas ou resinosas (*softwoods*) e as angiospérmicas ou folhosas (*hardwoods*).

A principal diferença entre resinosas e folhosas diz respeito à estrutura anatómica do lenho (Figura 2.3) (Carvalho, 1996). Enquanto que as resinosas apresentam uma estrutura simples, constituída por traqueídeos (células alongadas que desempenham funções de suporte e de transporte de seiva bruta à copa) e células de parênquima (células que desempenham funções de armazenamento de substâncias de reserva), as folhosas apresentam uma estrutura mais complexa, composta por fibras (células com funções de suporte) e vasos lenhosos (células com função de transporte) (Cruz & Nunes, 2012; Wiedenhoeft, 2011). Na terminologia adotada para a madeira como material de construção, designam-se os traqueídeos para as resinosas e as fibras para as folhosas como fibras da madeira uma vez que ambos asseguram a sua resistência mecânica conferindo funções de suporte à árvore.

As resinosas têm um crescimento mais rápido que as folhosas, dando origem a madeiras de densidade e durabilidade mais baixas (Carvalho, 1996). Alguns exemplos de espécies de resinosas são: o pinheiro, o espruce, o cipreste e o abeto, e de folhosas são: o sobreiro, o eucalipto, o carvalho e o choupo.

A variabilidade da madeira é uma das características mais importantes a ter em conta aquando da sua utilização. Esta condição é essencial, não só devido à existência de inúmeras espécies florestais, como também pela variabilidade existente dentro da própria espécie, fruto da variação do clima, da disponibilidade de água e da natureza do solo. É, por isso, importante a classificação da madeira, de modo a que sejam

atribuídas classes de resistência (Tabelas 2.1 e 2.2) a elementos com função estrutural. De acordo com a norma EN 14081-1 (2016), são, então, definidos dois métodos para a atribuição das classes de resistência: o primeiro baseado numa classificação visual e o segundo, com base na classificação mecânica.

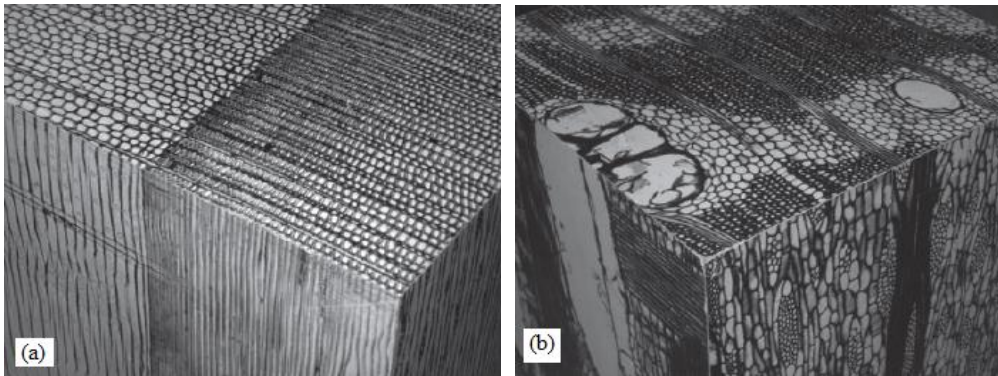


Figura 2.3 – Estrutura microscópica da madeira (Machado et al., 2009): (a) Resinosa; (b) Folhosa.

A classificação visual incide, fundamentalmente, no controlo dos defeitos e singularidades da madeira permitindo a obtenção de lotes mais homogêneos em termos de propriedades mecânicas (Machado et al., 2009).

Tabela 2.1 – Classes de resistência de acordo com a norma EN 338 (2009) para madeiras de resinosas.

		Espécies de Resinosas											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
<b>Propriedades de resistência mecânica (MPa)</b>													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
<b>Propriedades de rigidez - Módulos de elasticidade (GPa)</b>													
Paralelo às fibras	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Perpendicular às fibras	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
De distorção	$G_{mean}$	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
<b>Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>													
Valor característico	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Valor médio	$\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabela 2.2 – Classes de resistência de acordo com a norma EN 338 (2009) para madeiras de folhosas.

		Espécies de Folhosas							
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Propriedades de resistência mecânica (MPa)</b>									
Flexão	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
<b>Propriedades de rigidez - Módulos de elasticidade (GPa)</b>									
Paralelo às fibras	$E_{0,mean}$	9,5	10	11	12	13	14	17	20
	$E_{0,05}$	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Perpendicular às fibras	$E_{90,mean}$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
De distorção	$G_{mean}$	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
<b>Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>									
Valor característico	$\rho_k$	475	485	530	540	550	620	700	900
Valor médio	$\rho_{mean}$	570	580	640	650	660	750	840	1080

Posteriormente, e para que se atribuam as classes de resistência, há que conhecer três propriedades de referência (EN 384, 2010): a massa volúmica, o módulo de elasticidade e a tensão de rotura, por flexão paralela à direção das fibras. É, então, ensaiado um lote representativo de material, selecionado previamente através de classificação visual, de acordo com o estipulado na norma EN 384 (2010). Depois do ensaio, determinam-se os valores característicos associados às distribuições de resistência, de rigidez à flexão e de massa volúmica.

Com base nos valores característicos determinados para cada população, faz-se a correspondência com uma classe de resistência, definida na norma EN 338 (2009) (Tabelas 2.1 e 2.2). De notar que qualquer classificação que seja feita terá caráter de grupo e irá ser tomada como representativa de determinada espécie, não se tratando de uma classificação com caráter individual.

Os defeitos e singularidades da madeira podem influenciar substancialmente a capacidade resistente do elemento estrutural pelo que, por razões de segurança, nem todas as singularidades ou defeitos são admitidos. Devido à grande amplitude de densidades de defeitos em determinada espécie, por vezes esta é incluída numa classe de resistência inferior, o que leva ao desaproveitamento do seu potencial. Para que isto não aconteça e porque existem defeitos e singularidades que, devido às suas dimensões ou localização, não influenciarão de forma significativa a capacidade resistente do elemento, criaram-se as classes de qualidade. Estas classes procuram, através de uma classificação visual ou mecânica, quantificar e avaliar os defeitos e singularidades existentes, correlacionando-os com as capacidades resistentes do elemento (Cunha, 2017). As classes de qualidade podem, posteriormente, ser relacionadas com as classes de resistência, através da atribuição de diferentes valores característicos de resistência mecânica. Através da divisão de dada espécie de madeira em diferentes classes de qualidade, podem ser atribuídas classes de resistência superiores a elementos com menores incidências de singularidades e/ou defeitos, explorando, assim, todo o potencial do elemento (Gominho et al., 2004 citado por Cunha, 2017).

A norma EN 1912 (2012), estabelece a correspondência entre as classes de qualidade e as classes de resistência.

De referir que, em Portugal, a única espécie de madeira com norma de classificação em classes de qualidade é o Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.), assunto que será explorado no *Capítulo 2.3 – Madeira de Pinho Bravo*.

A ausência de uma classificação global obrigatória, que identifique de forma clara a espécie florestal, bem como o facto de existir uma grande diversidade de espécies, dificulta a identificação e coloca, frequentemente, o comprador em situação de total desconhecimento, relativamente às madeiras existentes no mercado. Cada espécie de madeira comercializada deverá possuir, para além do nome comercial e da origem geográfica, a sua designação botânica (Cruz & Nunes, 2012). Este requisito é, por vezes, difícil de obter, especialmente para madeiras tropicais importadas em que fatores como a elevada diversidade de espécies, as dificuldades de acesso para o reconhecimento das florestas e as elevadas quantidades de madeira necessárias para tal classificação fazem com que se torne muito difícil a identificação de acordo com a normalização europeia em vigor (Cunha, 2017).

### 2.1.2. Caracterização comportamental da madeira

Tal como foi referido anteriormente, a madeira é um material anisotrópico, higroscópico e heterogéneo.

A anisotropia da madeira irá resultar na variação das suas propriedades físicas e mecânicas nas três direções principais consideradas (Kretschmann, 2011). Distinguem-se, assim (Figura 2.4): o plano longitudinal ou axial, que corresponderá à direção paralela às fibras; o plano radial, perpendicular às fibras e paralelo ao eixo do tronco e aos raios lenhosos; o plano tangencial, perpendicular às fibras e paralelo ao eixo do tronco e aos anéis de crescimento (Machado et al., 2009, Cruz & Nunes, 2012).

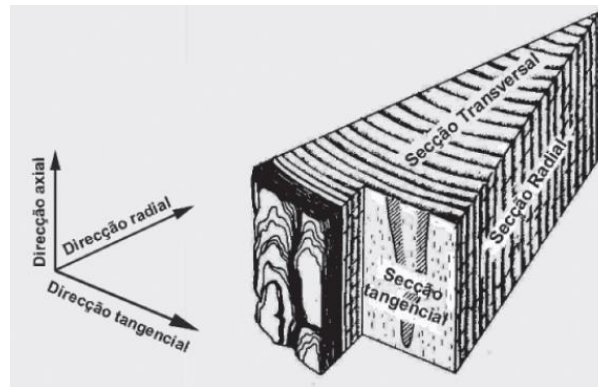


Figura 2.4 - Direções principais consideradas numa peça de madeira (Machado et al., 2009).

A higroscopicidade da madeira faz com que este material sofra alterações do seu teor de água em função das condições ambientais (temperatura e humidade relativa) em que é aplicado (Machado et al., 2009). Para a determinação do teor de água na madeira ( $H$ ), num determinado momento, utiliza-se a seguinte equação 2.1.

$$H(\%) = \frac{m_s - m_h}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

com o valor de massa seca ( $m_s$ ) obtido por secagem a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até que se atinja massa constante, tal como descrito na norma NP 614 (1973).

Como material higroscópico, a madeira está constantemente a ganhar e a perder água quando em contacto com o meio ambiente. Estes fenómenos de absorção e dessorção irão, naturalmente, originar retração da madeira, se esta perder água, ou expansão da madeira, no caso de ganhar água. Estas variações produzem o aparecimento de tensões internas no elemento, acabando por ter influência nas suas propriedades físicas e mecânicas (Glass & Zelinka, 2011).

Para que se verifique estabilidade dimensional, tem que se verificar um equilíbrio entre as tensões internas do elemento e as tensões criadas pelo ambiente em que este se encontra. Este equilíbrio higroscópico é alcançado quando os fenómenos de absorção e dessorção registarem a mesma taxa e, conseqüentemente, não se verifique variação do teor de água (Glass & Zelinka, 2011; Cruz & Nunes, 2012 Machado et al., 2009). Então, é essencial que a madeira, quando aplicada em obra, esteja tanto quanto

possível próximo do seu teor de água de equilíbrio (situação ideal, mas muito difícil de alcançar, fundamentalmente se a madeira for aplicada no exterior). Uma das causas mais frequentes das anomalias observadas em obra diz respeito ao facto de não se considerar o comportamento higroscópico da madeira, o que origina, por exemplo, fenómenos de empolamento de revestimentos de piso em madeira.

O ábaco da Figura 2.5 apresenta as curvas de equilíbrio higrométrico da madeira, obtidas de forma experimental para o processo de secagem do pinho, mas que são, frequentemente, aplicáveis a outras espécies.

A heterogeneidade da madeira é um fator condicionante na avaliação das propriedades físicas e mecânicas de cada elemento considerado. Dificulta a identificação das espécies de madeira, tornando complexa a definição de uma abordagem comum normativa que defina os valores limites admissíveis de singularidades e defeitos existentes em dado elemento.

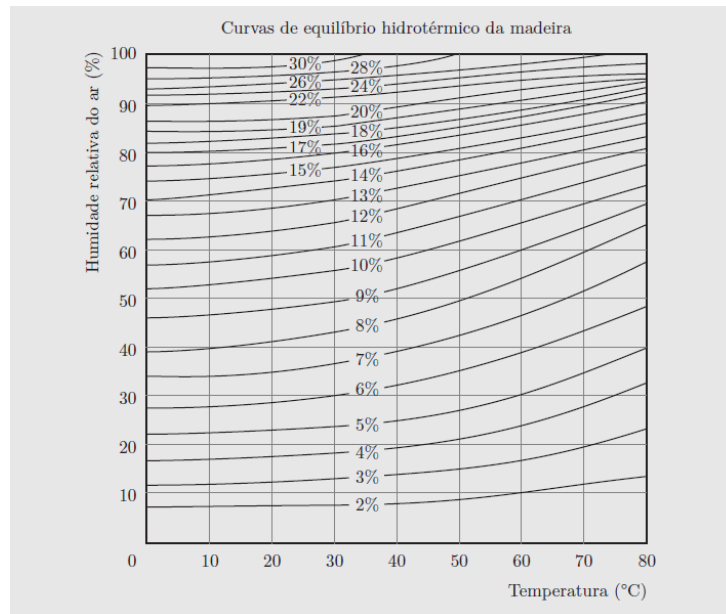


Figura 2.5 - Curvas de equilíbrio higrométrico para madeira de pinho (Cruz & Nunes, 2012).

### 2.1.3. Defeitos e singularidades da madeira

A qualidade de uma peça de madeira é deduzida através das características médias do lenho e pelo tipo, quantidade e distribuição dos defeitos que possui (Cruz & Nunes, 2012). Os níveis de qualidade exigidos na construção obrigam a que os elementos de madeira não apresentem defeitos significativos, pois estes conduzem a uma redução da capacidade resistente da peça.

Entende-se por defeitos da madeira toda e qualquer singularidade e/ou irregularidade que determinada peça de madeira apresente e que comprometa a sua utilização para dado fim (Carvalho, 1996). Os defeitos podem resultar de diversos processos relacionados com a produção, exploração, secagem ou laboração da madeira (Carvalho, 1996).

A norma NP 180 (1962) apresenta uma descrição detalhada dos vários defeitos da madeira, alguns dos quais mais significativos para a sua classificação visual e que condicionam as suas propriedades mecânicas e que são descritos com maior pormenor de seguida.

- **Nós**

Um nó é um defeito morfológico de produção da madeira e corresponde à porção da base de um ramo que se encontra inclusa no tronco da árvore (Carvalho, 1996; Kretschmsnn, 2011; Cruz & Nunes, 2012). A forma dos nós depende da orientação do plano de corte da madeira relativamente ao ramo. Possuem um desenvolvimento sensivelmente cónico, irradiando da medula ou próximo dela e são os defeitos que apresentam maior influência na resistência mecânica de peças de madeira, sobretudo no caso das madeiras de resinosas (Cruz & Nunes, 2012; Mateus, 1978). Isto deve-se ao facto de haver um desvio das fibras de madeira ao redor do nó, o que, para um material fortemente anisotrópico, condiciona o seu valor de resistência máxima (na direção paralela às fibras). O seu efeito torna-se mais gravoso com o aumento da sua

dimensão, localização e tipo de esforço considerado (Machado et al., 2009). Note-se que a resistência à tração de um elemento de madeira na direção paralela às fibras é cerca de trinta vezes maior que num plano perpendicular (Cruz & Nunes, 2012).

Existem diversos tipos de nós, especificados na norma NP 180 (1962) que diferem quanto à aderência, forma, estado, localização nas peças e agrupamento.

Se o elemento de madeira for utilizado para fins estruturais, deve considerar-se a relação entre a área da secção ocupada pelo nó e a área total da secção transversal. Por isso, a avaliação da influência dos nós sobre o comportamento da peça é avaliada através da quantificação da área transversal da madeira que ocupam, traduzida por KAR (*Knot Area Ratio*) (Figura 2.6). Em termos de medição distinguem-se dois tipos de área: marginal e total. A avaliação do KAR total ( $KAR_T$ ) é realizada pela projecção dos nós na secção transversal, quantificando-se a área que ocupam, enquanto que na avaliação do KAR marginal ( $KAR_M$ ), quantifica-se a área ocupada pelos nós na zona próxima dos cantos em cerca de um quarto da altura da peça. Idealiza-se que cada nó se desenvolve em forma de cone até à medula. Se não existir medula, o vértice do cone localiza-se no exterior da secção transversal.

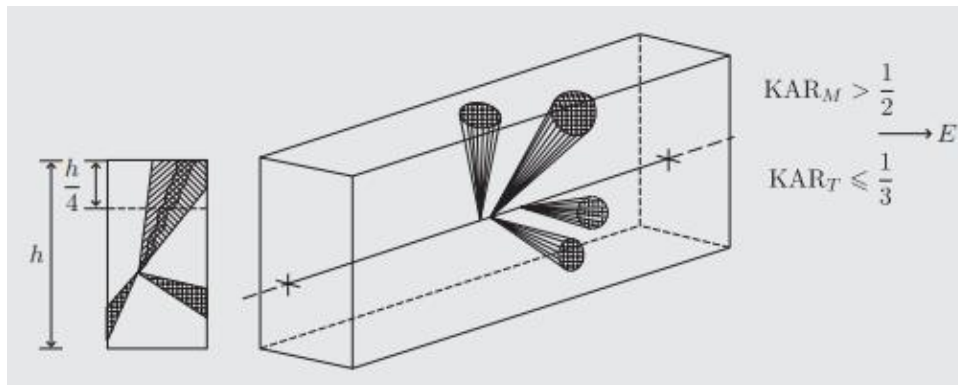


Figura 2.6 - Medição dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e do KAR marginal (LNEC, 1997).

Se o elemento de madeira for utilizado como revestimento ou para outros fins, que não estruturais, os nós terão uma importância fundamentalmente estética. Irá procurar-se que estes possuam uma distribuição uniforme, sejam sãos e aderentes e tenham pouca expressão nas faces da peça.

- **Fendas**

As fendas são frequentemente encontradas nos elementos de madeira e, tal como os nós, introduzem descontinuidade nas peças, propagando-se na direção das fibras e separando-as. A influência que terão na resistência mecânica da madeira irá depender do tipo de esforço considerado, da eventual associação com outros defeitos existentes e da localização e extensão na peça (Machado et al.).

As fendas podem resultar do processo original de secagem da madeira (fendas de secagem), desenvolverem-se no elemento em serviço, fruto de elevados esforços instalados, ou formarem-se no processo de produção da madeira (por exemplo, fendas anelares).

As fendas de secagem, geralmente, desenvolvem-se na madeira como consequência de um processo de secagem brusco que resulta na redução do seu teor de água, ocorrendo uma forte retração das camadas exteriores do elemento sem que haja uma retração efetiva das camadas interiores. Trata-se de um fenómeno irreversível e é tanto mais notório quanto maior forem as amplitudes higrotérmicas a que a madeira esteve ou está sujeita (Cruz, 2009).

As fendas anelares são originadas pelo descolamento entre camadas de crescimento consecutivas e possuem um desenvolvimento circular. Este tipo de fendas acontece quando a árvore se encontra sujeita a fenómenos de flexão regulares e abundantes durante o seu crescimento. Tais fenómenos podem dever-se, por exemplo, à ação de ventos fortes ou neve (Cruz & Nunes, 2012).

De referir ainda a existência de madeiras mais propensas a fender que outras, pelo que este aspeto também deverá ser tido em conta, nomeadamente no processo de secagem selecionado.

As fendas podem designar-se de repassadas ou não repassadas, sendo que uma fenda repassada é aquela que ocorre simultaneamente em duas superfícies opostas de uma dada peça, contrariamente à não

repassada. O comprimento da fenda (Figura 2.7) corresponde à distância entre duas linhas que a delimitem, sensivelmente perpendiculares à direção das fibras e paralelas aos topos (LNEC, 1997).

Por vezes, a importância da existência de fendas é sobrevalorizada pelos intervenientes no processo de construção, quando em comparação com outras anomalias existentes, eventualmente de gravidade superior, mas menos evidentes (Cruz, 2009).

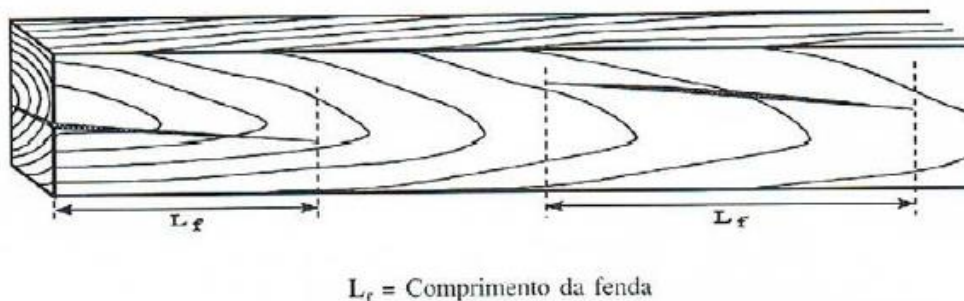


Figura 2.7 – Medição de fendas (LNEC, 1997).

- **Inclinação do fio**

A inclinação do fio é uma anomalia que resulta da existência de um ângulo entre a direção geral das fibras da madeira e o eixo longitudinal da peça (Cruz & Nunes, 2012). Esta condição pode dever-se a anomalias no crescimento da árvore, tais como a curvatura do tronco ou o fio torcido, ou ao plano de corte das peças de madeira (Machado et al., 2009; Cruz & Nunes, 2012). Tal como se referiu anteriormente, qualquer anomalia que resulte na aplicação de esforços numa direção que não a paralela às fibras, resultará em diminuições significativas da resistência da peça, que serão tanto maiores quanto maior for o afastamento da situação ideal. Por isso, quanto maior for o ângulo de inclinação do fio da madeira em relação ao eixo longitudinal da peça, menor será a resistência mecânica por ela apresentada.

A medição da inclinação do fio da madeira faz-se através de inspeção visual ou com recurso a um riscador, de acordo com o apresentado na Figura 2.8.

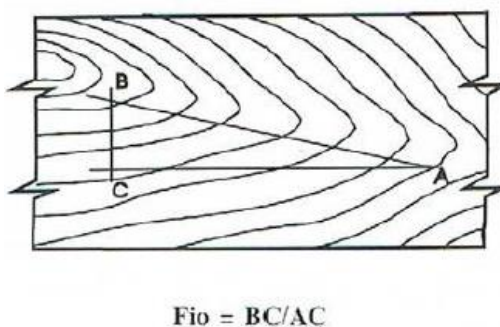


Figura 2.8 – Medição do fio (LNEC, 1997).

- **Bolsas de resina**

As bolsas de resina apresentam como desvantagem o facto de representarem uma alteração localizada da direção das fibras de madeira, tal como os nós, e, por isso, constituírem um ponto de maior fragilidade, com diminuição das propriedades mecânicas (Machado et al., 2009).

Se as bolsas de resina tiverem fraca expressão, são tidas como fendas, e aplicam-se os conceitos de redução da resistência mecânica para as fendas (Machado et al., 2009). Caso ocorram na proximidade de nós, então devem ser contabilizadas no cálculo dos KAR correspondentes (NP 4305, 1995).

- **Descaio**

O descaio é um defeito de laboração, que representa o remanescente da superfície do toro na peça de madeira e que resulta do corte do elemento de madeira junto à periferia do tronco (Cachim, 2007; Machado

et al., 2009). Não afeta de forma significativa as propriedades mecânicas da peça de madeira e a sua importância resume-se, fundamentalmente, a dificuldades de fixação, colagem ou ligação a outras peças, resultantes da perda de secção transversal que representa (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009).

O descaio pode estar presente na face ou no canto de determinado elemento de madeira. A sua avaliação é obtida através do quociente entre a projeção do descaio na face (ou canto) e a largura total dessa face (ou canto) (LNEC, 1997).

Caso esteja localizado na face da peça (Figura 2.10), a sua importância exprime-se pela equação 2.2.

$$\frac{V_1}{h} \text{ ou } \frac{V_2 + V_3}{h} \quad (2.2)$$

Caso esteja localizado no canto da peça (Figura 9), a sua importância exprime-se pela equação 2.3.

$$\frac{b - K_1}{b} \text{ ou } \frac{K_2 + K_3}{b} \quad (2.3)$$

As constantes  $h, b, V_1, V_2, V_3, K_1, K_2$  e  $K_3$  estão representadas na Figura 2.9.

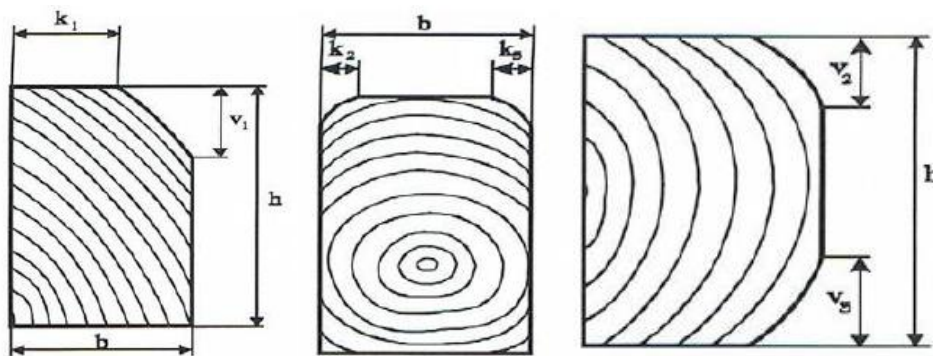


Figura 2.9 – Medição do descaio (LNEC, 1997).

- **Taxa de crescimento**

A taxa de crescimento, não sendo um defeito, é uma singularidade importante na medida em permite estimar, de forma indireta e para o caso da madeira de resinosas, a massa volúmica (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009). É avaliada pela largura média dos anéis de crescimento, medida sobre a linha radial máxima que se possa traçar num dos topos da peça (Figura 2.10).

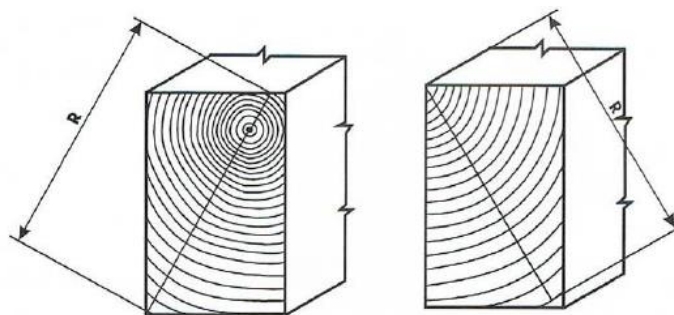


Figura 2.10 – Medição da taxa de crescimento (NP 4305, 1995).

A medição da taxa de crescimento calcula-se através da equação 2.4.

$$\text{Taxa de crescimento} = \frac{R \text{ (mm)}}{n^\circ \text{ de anéis de crescimento anuais na linha de comprimento } R} \quad (2.4)$$

### • Empenos

Os empenos são deformações no elemento de madeira que resultam da variação do seu teor de água e que se encontram associados à sua anisotropia (LNEC, 1997). Acontecem, de maneira geral, depois do processo de secagem e através da retração da madeira, que é diferenciada em faces opostas da peça, onde uma delas apresenta predominância tangencial em relação à outra (Cruz & Nunes, 2012).

Os empenos não representam, de modo direto, perda de resistência do material, sendo que a sua limitação se prende, essencialmente, com dificuldades de utilização das peças em obra (Cachim, 2007). Quanto à sua classificação, os empenos podem ser em arco de face, arco de canto, hélice e em meia cana (Figura 2.11).

Na Figura 2.10, e de acordo com a norma NP 4305 (1995), apresentam-se os métodos para avaliação dos empenos. Quando são em arco de face, de canto ou em hélice, são medidos num comprimento de dois metros; quando são em meia cana, são avaliados sobre toda a largura da peça (NP 4305, 1995).

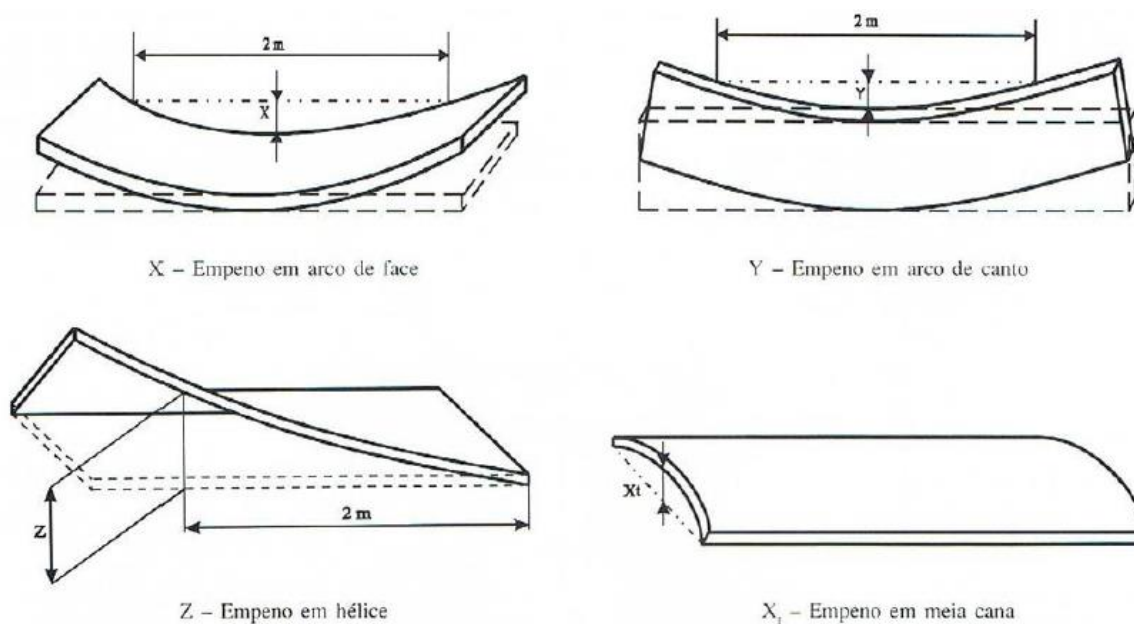


Figura 2.11 – Medição de empenos (NP 4305, 1995).

## 2.2. Propriedades da madeira

### 2.2.1. Propriedades físicas

#### • Humidade e teor de água da madeira

A humidade da madeira traduz-se pelo seu teor de água, que é um dos fatores mais importantes na avaliação de determinado elemento. Isto acontece devido ao caráter higroscópico da madeira (ver Capítulo 2.1.2).

A água é essencial para o desenvolvimento de qualquer ser vivo, pelo que também o é para o da árvore. Após o abate do organismo, qualquer madeira (madeira verde) apresenta uma grande quantidade de água, geralmente com teores superiores a 100%, que começa a perder de forma imediata, devido ao processo de secagem. É importante distinguirem-se três formas em que a água se pode encontrar no interior da madeira: água livre, água de constituição e água de impregnação ou embebição.

A água livre preenche os espaços vazios da estrutura alveolar da madeira e não possui qualquer ligação com a substância lenhosa. Será a água que sairá mais facilmente da madeira, imediatamente após o abate da árvore, e não provoca variações do volume da peça nem alterações da resistência mecânica.

A água de constituição é um dos componentes da substância lenhosa, estando a ela ligada por poderosas forças de sorção química. A sua variação é praticamente nula e, para que seja removida, terá que ocorrer, normalmente, decomposição química da madeira. Por isso, não é considerada no processo de secagem, dizendo-se que a madeira está totalmente seca, ainda que contenha este tipo de água na sua constituição.

A água de impregnação ou embebição preenche os espaços da parede celular da madeira. A sua saída, depois da libertação de toda a água livre, provocará retração da madeira, uma vez que haverá aproximação das fibras e das micelas, fazendo aumentar a rigidez e resistência do elemento. As alterações no comportamento higroscópico da madeira verificam-se, então, relativamente às alterações do teor de água de impregnação.

Imediatamente após o abate da árvore, a madeira começa a perder a sua água livre, de maneira mais ou menos rápida. Essa água encontra-se armazenada nos espaços celulares e intracelulares da madeira e o teor em água pode ser superior a 100%. Quando a madeira perde toda a sua água livre, mas as paredes celulares ainda se encontram completamente saturadas com água de impregnação, diz-se que se atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF). Este valor varia entre 28 e 30% do teor de água da madeira, dependendo da espécie considerada, e é um marco, na medida em que a partir deste ponto, e para valores inferiores de teor de água, o processo de secagem irá conduzir a retrações importantes na madeira, com afetação das propriedades mecânicas.

Na Figura 2.12 procura esquematizar-se as fases de evaporação da água durante o processo de secagem, desde o estado da madeira verde até se encontrar anidra (quando perdeu toda a sua água livre e de impregnação, está totalmente seca).

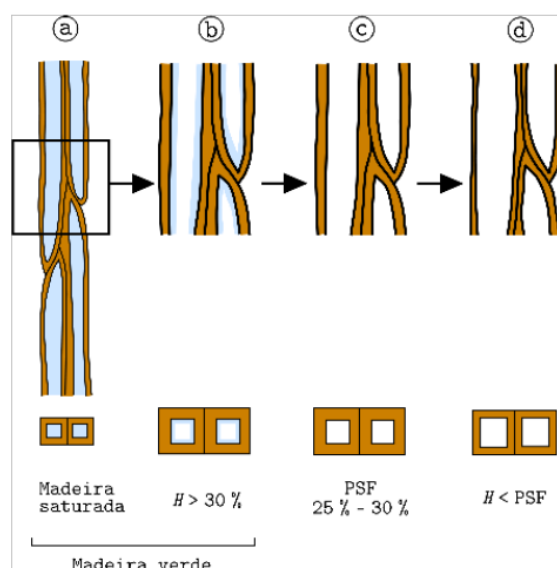


Figura 2.12 – Fases de evaporação da água na madeira (LNEC, 1997).

De forma resumida tem-se, então, que: a madeira verde apresenta uma resistência mecânica muito reduzida relativamente a todo o tipo de esforços (Mateus, 1961); durante o processo inicial de secagem e até se atingir o PSF, não haverá alterações significativas da resistência mecânica; a partir do PSF e para valores inferiores a este, inicia-se o processo de retração da madeira, com o aumento significativo dos valores de resistência mecânica.

Através de um processo de secagem natural, dificilmente se atinge um teor de água inferior a 14-16%. Para valores inferiores a estes, é necessário um processo de secagem em estufa ou processos conjuntos de secagem natural e artificial.

Na conceção de estruturas de madeira, é essencial garantir-se que o teor de água se mantenha entre os 13% e os 17% (Negrão & Faria, 2009). Este valor deve ser especificado em cadernos de encargos, podendo ser medido *in situ*, com recurso a equipamentos portáteis (p. ex. humidímetros para madeira, de contacto ou de “agulhas”) ou laboratorialmente, com recolha de amostras para secagem laboratorial (Cruz & Nunes, 2012).

- **Retração e estabilidade dimensional**

Com o processo de secagem da madeira em curso, e abaixo do PSF, a madeira começa a retrair e o seu volume e massa volúmica aparente começam a diminuir. Dada a anisotropia da madeira, a retração terá comportamentos diferentes em direções distintas (Figura 2.13) sendo, no entanto, aproximadamente linear com a redução do teor de água da madeira. A retração será mais significativa para a direção tangencial, cerca

de 2 vezes superior à radial e cerca de 20 vezes superior à direção longitudinal. Na direção longitudinal, a retração é, geralmente, desprezável (Machado et al., 2009).

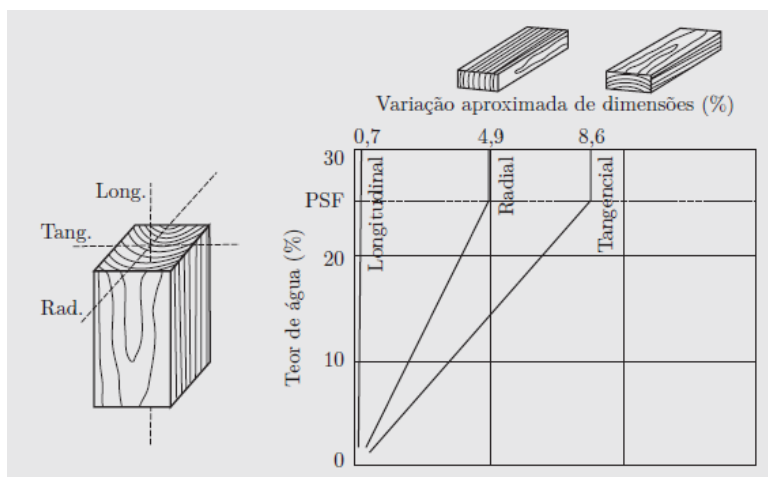


Figura 2.13 – Coeficientes de retração em termos relativos em função do plano considerado (valores para o pinho bravo) (LNEC, 1997).

O fenómeno de retração da madeira é reversível, uma vez que o aumento do teor de água irá provocar o inchamento do elemento, sendo o processo ligeiramente histerético, com um diferencial de aproximadamente 2% entre as curvas de secagem e reumidificação, normalmente ignorado.

Podem determinar-se os coeficientes de retração unitária, para cada espécie de madeira, que correspondem, em cada direção, à variação da dimensão da peça de madeira (retração ou inchamento). São apresentados em %/%, pois traduzem a variação de dimensão na direção considerada que ocorre para cada variação do teor de água de 1%, dentro do intervalo entre 0% e o PSF. São um fator importante na medida em que permitem prever o comportamento da madeira após a sua aplicação.

O fator ou coeficiente de anisotropia é obtido pelo quociente entre os fatores de retração unitária tangencial e radial ( $R_t/R_r$ ) e fornece uma indicação sobre a propensão da madeira para empenar. Este valor varia, normalmente, num intervalo entre 1,5 e 2,5 e é tanto maior quanto maior for a apetência da madeira para o desenvolvimento de empenos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Classificação da anisotropia da madeira (adaptado de Cachim, 2007).

Anisotropia baixa	Anisotropia média	Anisotropia alta
$\frac{R_t}{R_r} < 1,5$	$1,5 \leq \frac{R_t}{R_r} \leq 2,0$	$\frac{R_t}{R_r} > 2,0$

• **Massa volúmica**

A massa volúmica, é uma das características físicas mais importantes para a madeira, pois é correlacionável com a maioria das suas propriedades mecânicas. Um dos parâmetros importantes na avaliação da massa volúmica da madeira é o seu teor de água, uma vez que este valor tem influência direta numa correta avaliação do valor de massa volúmica. Quanto mais elevado for o valor de teor em água na madeira, maior será o valor de massa volúmica medido, por consequência das variações de massa e de volume.

A massa volúmica da madeira,  $\rho_H$ , a um dado valor de teor de água H, é definida pela relação entre a massa,  $m_H$ , e o volume,  $V_H$ , expressando-se, normalmente, em  $\text{kg/m}^3$  (NP 616, 1973) (equação 2.5).

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \tag{2.5}$$

De acordo com a normalização europeia e o Eurocódigo 5 (2004), considera-se o cálculo da massa volúmica de referência,  $\rho_{12}$ , para um valor de teor de água de 12%. O valor de  $\rho_{12}$  pode ser determinado a partir do valor do teor de água, H, através da equação 2.6.

$$\rho_{12} = \rho_H \times \frac{(100 + 12) \times (100 + H'\alpha_v)}{(100 + H) \times (100 + 12\alpha_v)} \quad (2.6)$$

$H'$  representa o teor de água,  $H$ , se este for igual ao PSF ou, o valor do teor de água correspondente ao PSF, caso o teor de água seja superior ao PSF e  $\alpha_v$  representa o coeficiente de retração volumétrica do provete expresso através da equação 2.7.

$$\alpha_v = 100 \times \frac{V_H - V_0}{H \times V_0} \quad (2.7)$$

Nesta,  $V_H$  corresponde ao volume da madeira com um teor de água  $H$  e  $V_0$  corresponde ao volume de madeira no estado anidro ( $H = 0\%$ ).

A determinação da massa volúmica, em valores aproximados e para qualquer valor de teor de água pode, ainda, fazer-se com recurso ao ábaco de Kollmann.

A massa volúmica da madeira varia de espécie para espécie e dentro da própria espécie (Henriques, 2011) e é um indicador relevante para a qualidade da madeira, uma vez que uma massa volúmica maior, corresponde, normalmente, a uma maior resistência mecânica, maior durabilidade, maior impermeabilidade, sendo que também conduz, em muitos casos, a maior retração da madeira e maiores dificuldades de laboração (Cruz et al., 1994).

### 2.2.2. Propriedades químicas

As propriedades químicas da madeira, tal como as físicas ou as mecânicas, variam com a espécie de madeira considerada, mas também dentro da própria espécie. Tratando-se de um material proveniente de um organismo vivo, a madeira possui uma estrutura celular, sendo as paredes celulares compostas, essencialmente, por celulose e hemicelulose, embebidas numa matriz amorfa de lenhina.

A celulose é um composto muito estável e funciona como substância esquelética, conferindo alta resistência à tração ao elemento de madeira (Carvalho, 1996; Ridout, 2000). Está presente em 40 a 50% da composição da madeira e é responsável pela rigidez das paredes celulares (Pfeil & Pfeil, 2003).

A hemicelulose forma-se através da mistura de açúcares resultante do processo de fotossíntese, constituindo cerca de 20-30% da composição das resinosas e 25-40% da composição das folhosas. É responsável por conferir elasticidade à madeira, sendo o ligante da celulose (Pfeil & Pfeil, 2003).

A lenhina confere rigidez à árvore, aglutinando a celulose e contribuindo para a integridade estrutural das fibras. Trata-se de uma substância muito estável e com um papel importante na durabilidade da substância lenhosa. Está presente em cerca de 20-25% da constituição das folhosas e 25-30% da constituição das resinosas (Carvalho, 1996).

### 2.2.3. Propriedades mecânicas

Na avaliação das propriedades mecânicas da madeira, há que ter em conta o facto de se estar a analisar um material com uma constituição anatómica, fortemente heterogéneo e anisotrópico. Em primeiro lugar, a resistência mecânica da madeira depende da espécie florestal considerada, bem como da qualidade das peças, traduzida pelo tipo e dimensão máxima dos defeitos e/ou singularidades existentes, tal como referido anteriormente.

A sua anisotropia faz com que as propriedades mecânicas difiram de acordo com a direção considerada. Em termos práticos, as propriedades resistentes para os planos tangencial e radial não diferem de forma importante, havendo, no entanto, uma diferença muito maior entre estes e o plano longitudinal. Assumem-se, assim, duas situações: a do plano longitudinal, plano paralelo à direção das fibras e a dos planos tangencial e radial, ambos denominados por plano perpendicular à direção das fibras.

A madeira limpa de defeitos, de acordo com Machado et al. (2009), apresenta:

- uma elevada resistência à flexão paralela às fibras (a relação resistência/peso é cerca de 1,3 vezes superior à do aço e cerca de 10 vezes superior à do betão);
- uma boa resistência à compressão e tração paralela às fibras;
- baixa resistência ao corte;
- baixa resistência à compressão e tração perpendicular às fibras;
- baixo módulo de elasticidade.

A resistência mecânica de uma estrutura de madeira é influenciada, ainda, pelo seu teor de água, pelo tempo de atuação das cargas e pelo efeito de escala.

A influência do teor de água depende do tipo de esforço considerado, sendo que se verifica uma diminuição da resistência e do módulo de elasticidade com o aumento do teor de água. Esta variação só se faz notar, naturalmente, para valores inferiores ao PSF, uma vez que para valores acima deste, não existem variações dimensionais consideráveis da peça (vide Capítulo 2.2.1). De acordo com a norma EN 384 (2016), para valores de teor de água entre 10% e 18%, não é necessário fazer qualquer ajuste para o cálculo da tensão de rotura à flexão e à tração paralela às fibras, sendo recomendado um ajustamento de 3% no caso da compressão paralela às fibras por variação percentual do teor de água e uma correção de 2% no caso da elasticidade por cada variação percentual do teor de água.

Em relação à duração de atuação das cargas, traduzida pela variação da resistência última do elemento em função do tempo de atuação de uma carga, esta tem uma influência determinante na capacidade resistente da madeira. Um dado elemento pode resistir à aplicação de determinada carga instantânea, inferior ao valor da tensão de rotura, mas quando essa mesma carga é aplicada durante um maior período de tempo, poderá conduzir à rotura da estrutura. Através de ensaios realizados, concluiu-se que um determinado elemento sujeito a uma carga permanente, poderá suportar cerca de 60% da carga de rotura num ensaio de curta duração (Kraus, 2017). O efeito da duração da carga nas estruturas de madeira foi largamente investigado, tendo-se chegado à denominada curva de Madison. Posteriormente, concluiu-se que o efeito era menos acentuado, sendo a relação traduzida, agora, pelo Eurocódigo 5 (2004).

O efeito de escala ou efeito do tamanho da peça irá influenciar, igualmente, as propriedades mecânicas da madeira. Quanto maior for um elemento de madeira, maiores serão as probabilidades de existirem irregularidades no material logo, a rotura iniciar-se-á mais facilmente nesses pontos críticos. Este fenómeno depende de alguns aspetos tais como a espécie de madeira, a qualidade da madeira e o tipo de esforço considerado. É mais significativo quando a madeira é solicitada a esforços de flexão e tração, por induzirem uma rotura frágil, sendo menos pronunciado no caso de roturas mais dúcteis, como para a compressão.

Segundo o EC 5 (2004), os valores de cálculo das tensões resistentes da madeira ( $f_d$ ) a considerar para efeitos de verificação estrutural em relação aos ELU, são obtidos, a partir dos valores característicos ( $f_k$ ), através da equação 2.8.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \times k_{mod} \quad (2.8)$$

Nesta equação:

$\gamma_m$  – coeficiente parcial de segurança, definido no EC5, para madeiras maciças ( $\gamma_m = 1,3$ ) e para os produtos derivados da madeira.

$k_{mod}$  – fator de correção, definido no EC5, que tem em conta a duração das cargas e as condições ambientais em que a madeira está aplicada; é definido com base na classe de serviço de utilização e na duração das cargas.

A duração das cargas divide-se em cinco classes. A Tabela 2.4 apresenta-as, bem como os períodos de atuação correspondentes e exemplos de ações consideradas.

Tabela 2.4 – Duração das cargas (adaptado de Machado et al., 2009).

Classe de duração	Período de atuação	Exemplos de ações
Permanente (PERM)	Superior a 10 anos	Peso próprio
Longa duração (LD)	Entre 6 meses e 10 anos	Armazenamentos
Média duração (MD)	Entre 1 semana e 6 meses	Sobrecarga de utilização
Curta duração (CD)	Inferior a 1 semana	Vento
Instantânea (INST)	Instantânea	Carga acidental

As classes de serviço dividem-se em três classes distintas. A Tabela 2.5 apresenta as classes de serviço existentes, associadas às condições ambientais (temperatura e humidade relativa do ar) e ao teor de água de equilíbrio no material. A tabela fornece, também, exemplos de situações associados à classe de serviço considerada.

A norma EN 335 (2013) estabelece a correspondência entre as classes de serviço, definidas no EC5 (2004), e as classes de risco, definidas na própria norma EN 335 (2013) (vide Capítulo 3). De referir ainda que a norma NP 460 (1995) estabelece a articulação entre as classes de risco (EN 335, 2013) e as classes de durabilidade, definidas na norma EN 350 (2016).

Os valores característicos ( $f_k$ ) podem ser obtidos através da classe de resistência a que a madeira pertence. Esses valores, normalmente, encontram-se definidos na norma EN 338 (2009), que apresenta os valores das propriedades mecânicas para as diversas classes de resistência (vide Capítulo 2.1.1).

A verificação da segurança aos ELU exige que as tensões atuantes sejam inferiores às tensões resistentes. A não verificação dos ELU é um fenómeno raro, mas com consequências normalmente catastróficas, tais como colapsos parciais, ou até mesmo a rotura total da estrutura. Para além destes, tem que se verificar, também, a segurança aos estados limite de utilização ou serviço (ELS).

Como foi dito anteriormente, a madeira é um material anisotrópico e, por isso, as propriedades mecânicas da madeira são consideravelmente diferentes, caso se considere a direção paralela ou perpendicular às fibras, pelo que é necessário analisar estas duas situações em separado.

Tabela 2.5 – Classes de serviço definidas no EC5 para as estruturas de madeira (adaptado de Machado et al., 2009).

Classe	Condições	W (%)	Exemplos de situações
1	Corresponde a uma temperatura ambiente de 20°C e uma humidade relativa do ar que excede os 65% num pequeno número de semanas no ano	12	Ambientes interiores com aquecimento
2	Corresponde a uma temperatura ambiente de 20°C e uma humidade relativa do ar que excede os 85% num pequeno número de semanas do ano	20	Ambientes exteriores abrigados sem exposição direta a focos de humidade ou contacto com o solo
3	Condições climáticas que conduzem a teores de água na madeira com valores superiores aos da classe 2	>20	Ambientes onde existe exposição a focos de humidade e/ou contacto com o solo
<b>Nota:</b> W (%) é o teor de água de equilíbrio para a maioria das espécies de madeira			

- **Resistência à tração paralela às fibras**

A madeira apresenta altos valores de resistência à tração na direção paralela às fibras, podendo atingir-se valores de resistência três vezes superiores do que para o caso da compressão axial, considerando a madeira limpa (Sardinha, 1988). O movimento de tração no sentido axial irá provocar a aproximação das fibras da madeira, levando a um aumento de aderência e coesão do elemento (Negrão & Faria, 2009).

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência à tração paralela às fibras variam entre os 8 e os 30 MPa para as resinosas e os 11 e os 42 MPa para as folhosas (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

Devido ao facto de a madeira ser um material com uma estrutura fibrosa, qualquer perturbação nos ensaios de tração realizados, que quebre a continuidade das fibras, de maneira prematura, irá introduzir descontinuidades no material e, conseqüentemente, afetar de forma significativa os valores de resistência mecânica. Assim, a norma EN 408 (2010) fornece informações sobre a avaliação da resistência à tração paralela às fibras. A norma EN 384 (2016) estabelece uma relação entre a resistência característica à flexão,  $f_{m,k}$ , e a resistência característica à tração paralela à fibra,  $f_{t,0,k}$ , dada através da equação 2.9.

$$f_{t,0,k} = 0,6 \times f_{m,k} \quad (2.9)$$

A equação anterior pode ser útil no caso de não serem realizados ensaios diretos de determinação da resistência à tração.

Um elemento de madeira terá um comportamento frágil no momento da rotura, sendo que a relação tensão-deformação que se verifica até esse momento será aproximadamente linear (Cachim, 2007).

- **Resistência à tração perpendicular às fibras**

Tal como foi referido anteriormente, qualquer resistência apresentada pela madeira num plano que não seja o paralelo à direção das fibras, será consideravelmente menor. A resistência à tração (Figura 2.14) é muito baixa, cerca de 30 a 70 vezes menor que o valor de tração paralela (Cachim, 2007). Isto acontece porque as fibras de celulose, responsáveis por conferirem resistência à madeira, se dispõem, preferencialmente, no sentido longitudinal do tronco da árvore (Negrão & Faria, 2009).

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência à tração perpendicular às fibras variam entre os 0,4 e os 0,6 MPa (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

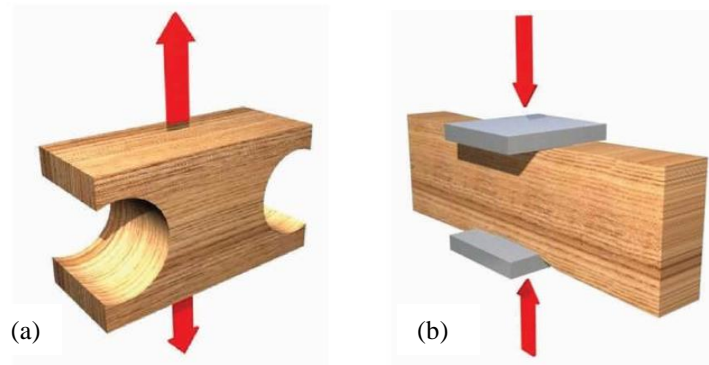


Figura 2.14 – (a) tração perpendicular às fibras; (b) compressão perpendicular às fibras (Durán, 2003).

- **Resistência à compressão paralela às fibras**

A madeira apresenta valores de resistência à compressão paralela à direção das fibras elevados, ainda que inferiores ao verificado para a tração e flexão. O movimento de compressão no sentido axial irá provocar a separação das fibras longitudinais, diminuindo, conseqüentemente, a coesão do elemento e a sua resistência global.

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência à compressão paralela às fibras variam entre os 16 e os 29 MPa para as resinosas e os 18 e os 34 MPa para as folhosas (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

A norma EN 384 (2016) estabelece uma relação entre a resistência característica à flexão,  $f_{m,k}$ , e a resistência característica à compressão paralela às fibras,  $f_{c,0,k}$ , dada através da equação 2.10.

$$f_{c,0,k} = 5 \times f_{m,k}^{0,45} \quad (2.10)$$

A equação anterior pode ser útil no caso de não serem realizados ensaios diretos de determinação da resistência à compressão.

- **Resistência à compressão perpendicular às fibras**

A resistência à compressão perpendicular às fibras (Figura 2.14) é muito inferior à sua correspondente na direção paralela, e pode ser traduzida pela resistência ao esmagamento, sendo função da massa volúmica da madeira (Cachim, 2007; Negrão & Faria, 2009).

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência à compressão perpendicular às fibras variam entre os 2 e os 3,2 MPa para as resinosas e os 7,5 e os 13,5 MPa para as folhosas (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

A relação verificada entre a tensão e a deformação é linear, mas apenas numa fase inicial, atingindo a rotura por plastificação (Cachim, 2007).

- **Resistência à flexão**

A madeira apresenta uma elevada resistência à flexão estática, atingindo valores próximos dos registados para a tração paralela às fibras (Negrão & Faria, 2009). A resistência à flexão é, talvez, uma das características mais importantes da madeira, sendo prova disso o facto de se poder atribuir classes de resistência à madeira em função da sua resistência à flexão, bem como ser possível estimar as restantes propriedades mecânicas com base nesse valor.

Num elemento de madeira, este parâmetro é avaliado através de ensaios com três ou quatro pontos de carga, que vão crescendo gradualmente até se atingir a rotura. De notar que quando a peça está sujeita a esforços de flexão, podem desenvolver-se três tensões básicas: tensões de compressão, de tração e de corte. Como o valor da resistência à compressão é inferior ao da resistência à tração, então, a estrutura vai atingir, em primeiro lugar, o limite de resistência à compressão, começando a notar-se a plastificação das fibras superiores. A linha neutra vai começar a deslocar-se, de forma progressiva, para baixo, na direção das fibras mais tracionadas, onde se dá a rotura por tração, induzida por compressão (Figura 2.15).

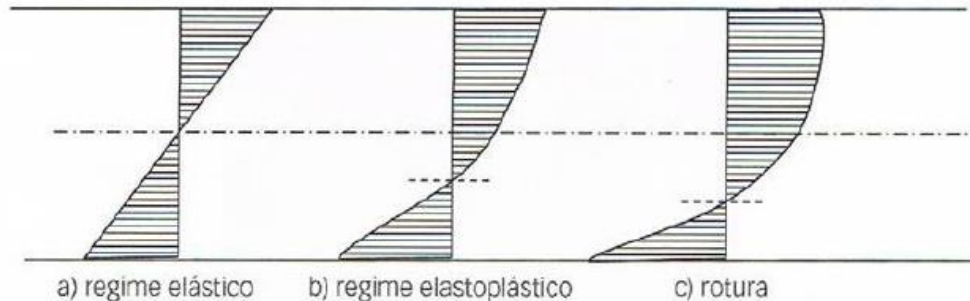


Figura 2.15 – Diagramas de distribuição de tensões (Cachim, 2007).

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência à flexão variam entre os 14 e os 50 MPa para as resinosas e os 18 e os 70 MPa para as folhosas (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

- **Resistência ao corte**

A resistência ao corte da madeira é muito reduzida, podendo existir tensões de corte no plano longitudinal, paralelo às fibras, ou num plano perpendicular às fibras.

A rotura pode dar-se tanto no plano das fibras como no perpendicular (Figura 2.16). Quando ocorre no plano das fibras, elas deslizam entre si, podendo o escorregamento ocorrer na direção paralela ou perpendicular às fibras. Quando ocorre no plano perpendicular, acontece porque as fibras são submetidas a um esforço atuante perpendicular a estas.

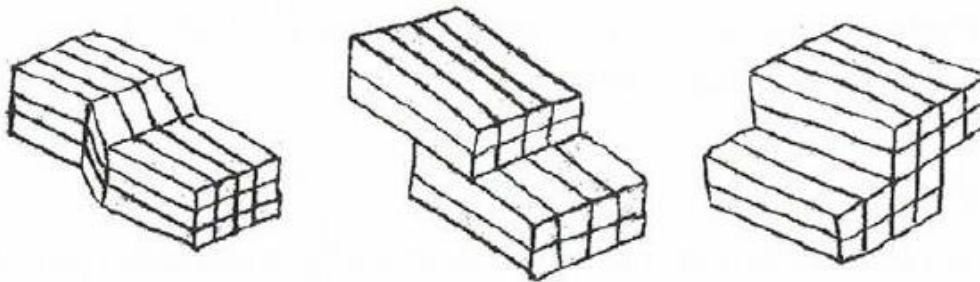


Figura 2.16 -Modos de rotura por corte (Cachim, 2007).

A norma EN 384, 2016 estabelece uma relação entre a resistência característica à flexão,  $f_{m,k}$ , e a resistência característica ao corte,  $f_{v,k}$ , dada através da equação 2.11.

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,8 \\ 0,2 \times (f_{m,k})^{0,8} \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Para madeiras classificadas, e de acordo com a norma EN 338 (2009), os valores característicos da resistência ao corte, variam entre os 3 e os 4 MPa para as resinosas e os 3,4 e os 5 MPa para as folhosas (ver Tabelas 2.1 e 2.2 – Capítulo 2.1.1).

- **Fluência**

O fenómeno de fluência (Figura 2.17) corresponde à deformação de um elemento estrutural, quando sujeito a cargas superiores ao limite de elasticidade do material, e é dependente do tempo. Como material

viscoelástico, a madeira, nestas condições, passará a deformar-se em regime plástico, atingindo a rotura para valores de tensão mais baixos que os indicados pelos ensaios de curta duração (Negrão & Faria, 2009).

Para uma determinada carga constante, aplicada num intervalo de tempo, o elemento de madeira apresentará, além da deformação elástica, um acréscimo de deformação com o tempo. Quando a carga deixa de atuar, apenas se recupera parte da deformação (comportamento elástico), mantendo-se uma deformação residual permanente (comportamento plástico).

A deformação total da estrutura para cargas permanentes,  $u_{tot}$ , é dada pela equação 2.12, onde  $u_{el}$  corresponde à deformação em regime elástico,  $u_c$  corresponde à deformação permanente da estrutura e  $\varphi$  representa o coeficiente de fluência.

$$u_{tot} = u_{el} + u_c \cong u_{el}(1 + \varphi) \quad (2.12)$$

De acordo com o EC 5 (2004), o coeficiente de fluência é dado pelo coeficiente  $k_{def}$ , que varia consoante a classe de serviço considerada.

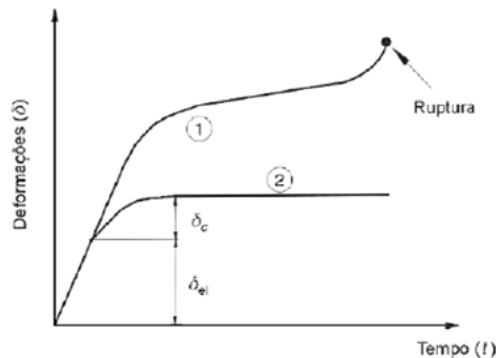


Figura 2.17 – Fluência da madeira (Pfeil & Pfeil, 2003).

### 2.3. Madeira de pinho bravo

#### 2.3.1. Características gerais

Em Portugal, de acordo com dados disponibilizados pelo Inventário Florestal Nacional em 2013, concluiu-se que a floresta tem uma percentagem de ocupação de solo de cerca de 35% (Figura 2.18). Sabe-se, também, que o pinheiro bravo representa a terceira maior superfície florestal em Portugal, com um total de cerca de 714 000 hectares, ficando somente atrás do eucalipto e do sobreiro (Figura 2.22). No entanto, esta espécie já foi mais populosa, tendo vindo a verificar-se um decréscimo, e apresentando já uma diminuição de cerca de 263 000 hectares entre os anos de 1995 e de 2010 (ICNF, 2013).

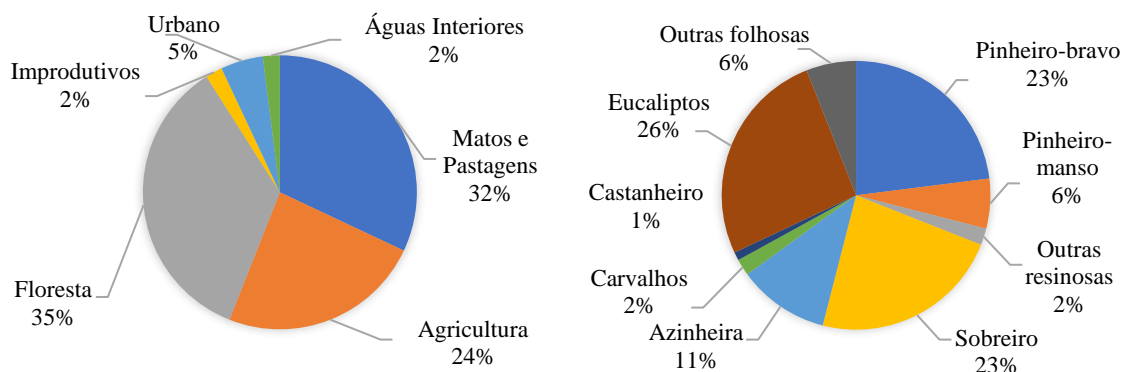


Figura 2.18 – Ocupação do solo (esquerda) e espécies florestais existentes (direita) (ICNF, 2013).

A madeira de pinho bravo (Figura 2.19) provém da espécie florestal resinosa *Pinus pinaster* Ait. As resinosas constituem cerca de três quartos das florestas em todo o mundo, com o género *Pinus spp* a ser o

mais representado, totalizando cerca de 60% de todas as resinosas plantadas (Del Lungo et al., 2006). O género *Pinus spp* é composto por 111 espécies de árvores (Richardson, 1998).

A espécie *Pinus pinaster* é muito comum em Portugal, com a madeira de pinho bravo a ser muito utilizada na indústria da construção, quer para funções estruturais quer para de revestimento.



Figura 2.19 -Provetes de madeira não degradada de pinho bravo.

Esta espécie florestal encontra-se plantada em povoamentos puros (povoamentos constituídos por uma ou mais espécies de árvores em que uma delas ocupa mais de 75% do coberto total) e a árvore atinge uma altura de 25 a 40 m, com um fuste de cerca de dois terços do comprimento total e um diâmetro de 0,30 a 0,60 m. Tratam-se de árvores de crescimento rápido nas primeiras idades e de longevidade relativamente reduzida, entre 100 e 120 anos (LNEC, 1997). No borne apresenta uma cor amarelo-pálida e no cerne um tom castanho ligeiramente avermelhado. A percentagem de borne é mais elevada que a de cerne, o que torna a madeira mais suscetível a degradação por ação de agentes xilófagos. A madeira apresenta um acentuado odor resinoso e os anéis anuais podem apresentar largura variável, embora o anel de outono possua, normalmente, largura constante (Carvalho, 1996).

Em Portugal, destaca-se a existência de madeira de pinho bravo de Leiria e de Viana, sendo que as propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas variam ligeiramente entre as duas variedades.

### 2.3.2. Propriedades físicas

Para a madeira de pinho bravo, a secagem é facilmente conduzida através de processos naturais e artificiais, sendo que se se optar por um processo de secagem ao ar, dificilmente se atingirão valores de teor em água inferiores a 14-16%. Quando a árvore é cortada, a madeira começa logo a perder água (água livre), apresentando tendência imediata para começar a “azular”, devido ao ataque de organismos biológicos, como sejam os fungos. Deve, por isso, efetuar-se uma secagem imediata da madeira, com o cuidado de esta não ser demasiado brusca, podendo dar origem a defeitos da madeira.

Na Tabela 2.6 apresentam-se os valores médios das propriedades físicas para a madeira de pinho bravo. Pelo facto de a madeira ser um material heterogéneo, é muito difícil definir-se um valor exato para determinada propriedade física de qualquer espécie florestal analisada. Por isso, os valores apresentados são meramente indicativos e, naturalmente, existem variações em torno deles. Os ensaios foram realizados no LNEC, com provetes pequenos e com um teor de água de referência de 12%, de modo a ir ao encontro das orientações internacionais.

Tabela 2.6 – Propriedades físicas da madeira de pinho bravo (LNEC, 1997).

Propriedades físicas		Valores médios
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		530-600
Coeficientes de retração unitária (%/%)	Tangencial	0,36
	Radial	0,21
	Volumétrica	0,60
Fator de Anisotropia (%/%)		1,7

## 2. A madeira como material de construção

Na Tabela 2.7, de acordo com a norma EN 350 (2016), estabelecem-se as características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de pinho bravo, nomeadamente no que diz respeito ao ataque por agentes biológicos.

Tabela 2.7 – Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de pinho bravo (LNEC, 1997).

	Durabilidade natural				Impregnabilidade
	Fungos	Térmitas	Carunchos		
			Pequenos	Grandes	
Borne	Pouco durável	Suscetível	Suscetível	Suscetível	Facilmente impregnável
Cerne	Pouco a medianamente durável	Medianamente durável	Durável	Durável	Difícilmente ou não impregnável

### 2.3.3. Propriedades mecânicas

A classificação visual da madeira de pinho bravo, tendo em vista a sua caracterização mecânica, é estabelecida através da apreciação das características (massa volúmica, medula) da madeira, dos seus defeitos (nós, inclinação do fio, bolsas de resina), do corte praticado (descaio) e das alterações da madeira (empenos, fendas, degradação biológica) (LNEC, 1997).

A norma NP 4305 (1995), propõe, com base nos fatores atrás descritos, duas classes de qualidade: a classe E (Estruturas) e a classe EE (Especial para Estruturas). A classe de qualidade EE refere-se a madeiras com qualidade superior e melhores características mecânicas.

Na Tabela 2.8 encontram-se os valores característicos das propriedades mecânicas para a madeira de pinho bravo, tendo em conta as duas classes de qualidade e de acordo com a norma NP 4305 (1995).

Tabela 2.8 – Valores característicos das propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo (adaptado de LNEC, 1997).

Propriedades mecânicas		Classe de qualidade	
		EE	E
(Valores característicos)			
Flexão estática (MPa)	$f_{m,k}$	35	18
Tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t,0,k}$	21	10,8
Tração perpendicular às fibras (MPa)	$f_{t,90,k}$	0,49	0,46
Compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c,0,k}$	24,7	18
Compressão perpendicular às fibras (MPa)	$f_{c,90,k}$	7,3	6,9
Corte (MPa)	$f_{v,k}$	3,4	2,0
Módulo de elasticidade (GPa)			
Paralelo às fibras			
(Valor médio)	$E_{mean}$	14	12
(Valor característico)	$E_{0,05}$	9,38	8,0
Perpendicular às fibras (Valor médio)			
	$E_{mean}$	0,46	0,40
Módulo de distorção (GPa)	$G_{mean}$	0,87	0,75
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )			
(Valor médio)	$\rho_{mean}$	610	580
(Valor característico)	$\rho_k$	490	460

### 3. DEGRADAÇÃO DA MADEIRA

A madeira, como material orgânico e heterogéneo, é suscetível a danos causados pelos ataques de diferentes organismos, tais como fungos, insetos e bactérias (Viitanen et al., 2002). Para além destes agentes biológicos, também pode ser deteriorada pela ação do fogo, por ações mecânicas, por agentes atmosféricos e por contacto com determinadas substâncias químicas. A proteção adequada da madeira em serviço, equacionando todos os potenciais agentes de degradação a que pode estar sujeita, é fundamental (Nunes, 2013).

Uma vez que a madeira é utilizada em diversas situações de exposição, a norma EN 335 (2013) estabelece as classes de risco de aplicação, tendo em conta apenas a deterioração por agentes biológicos e considerando o teor de água da madeira (Tabela 3.1) como principal fator que influencia o tipo de agente de degradação. Se a classe de risco for corretamente estimada e a madeira for devidamente preparada e aplicada, então a probabilidade de existirem casos graves de degradação biológica diminui (Cruz & Nunes, 2012).

Tabela 3.1 – Síntese das classes de risco, situações gerais de serviço e agentes biológicos suscetíveis de atacar a madeira e os seus derivados (adaptado de Nunes, 2013).

Classe de Risco (CR)	Situação geral de serviço	Exemplos de aplicação	Agentes biológicos relevantes
1	Interior seco	Pavimentos, lambris	Carunchos, térmitas de madeira seca
2	Interior ou sob coberto, sem exposição aos agentes atmosféricos. Possibilidade de condensação de água.	Estruturas de cobertura, estruturas de parede	Carunchos, térmitas, fungos cromogéneos e bolores, podridão castanha
3	Exterior, sem contacto com o solo, exposto aos agentes atmosféricos. Quando subdividida: <b>3.1</b> Humidificação possível mas pouco comum <b>3.2</b> Em condições de humidificação prolongadas	Caixilharias e portas exteriores  Decks sem contacto com solo, pérgolas, painéis de vedação, soletos de madeira	Carunchos, térmitas, fungos cromogéneos, podridão castanha, podridão branca
4	Exterior, em contacto com o solo e/ou água doce	Decks sem contacto com o solo ou junto de piscinas  Fundações em água doce, postes de vedação, postes de transmissão aérea	Carunchos, térmitas, fungos cromogéneos, podridão castanha, podridão branca, podridão mole
5	Permanentemente ou regularmente submerso em água salgada	Pontões, fundações em água salgada	Xilófagos marinhos (=CR4, na parte dos elementos fora de água)

A durabilidade natural da madeira é, também, uma das suas características fundamentais. De acordo com a norma europeia EN 350, 2016, esta é definida como sendo “a resistência intrínseca da madeira ao ataque por vários organismos”. Ainda que algumas espécies florestais possuam resistência elevada ao ataque de fungos e insetos (Viitanen et al., 2002), geralmente, a madeira é considerada como um material não durável (Foliente et al., 2002). Esta categorização deve-se: à suscetibilidade ao ataque por parte de

organismos biológicos, à grande diversidade de espécies florestais existentes e ao desconhecimento destas face à exposição a determinadas condições higrotérmicas ambientais.

Outro fator importante e que pode influenciar, de forma negativa, a durabilidade dos elementos de madeira numa estrutura, contribuindo para uma perceção muitas vezes equívoca da madeira como material pouco durável, é a não observância das classes de risco, bem como do modo indicado para a aplicação às diferentes espécies e tipologias de madeiras.

Para além da durabilidade natural da madeira, fatores como a localização da peça na construção e a sua impregnabilidade são também importantes, na medida em que o risco de ataque pode ser minorado.

#### 3.1. Degradação da madeira por agentes físicos e químicos

- **Agentes atmosféricos**

A madeira pode ser deteriorada pela ação de agentes atmosféricos tais como: a precipitação, a humidade relativa, a temperatura, a radiação ultravioleta e o vento.

O nível de degradação existente irá depender, fundamentalmente, das condições de exposição do elemento. Distinguem-se, assim, três tipos de condições: quando o elemento está em ambientes interiores, apenas exposto à variação das condições higrotérmicas; quando este se encontra em ambientes exteriores abrigados, exposto à radiação solar, mas não à ação da chuva; quando se encontra em ambientes exteriores não abrigados, exposto à radiação solar e à ação da chuva direta.

Para o primeiro caso, em ambientes interiores, a deterioração da madeira verifica-se devido aos ciclos variáveis de temperatura e humidade relativa do ar, que conduzem a fenómenos de secagem/humidificação dos elementos, proporcionando variações dimensionais e, conseqüentemente, a formação de defeitos na madeira, tais como fendas e empenos (Machado et al., 2009).

Em ambientes exteriores abrigados, em que o elemento se encontre sujeito à radiação ultravioleta, a deterioração é traduzida pelo escurecimento da madeira, decorrente da decomposição química da lenhina. Observa-se fissuração na superfície da madeira e a sua alteração cromática, para uma tonalidade cinza, muitas vezes associada à “madeira velha”. O processo de degradação será tanto mais rápido se a madeira estiver num ambiente com maior exposição solar, sendo que, no entanto, se trata de um fenómeno muito lento, traduzido pela perda de, em média, 6 mm de superfície de madeira por cada 100 anos de exposição solar. Por isso, a ação da radiação ultravioleta em elementos de madeira apresenta-se com um carácter fundamentalmente estético (Machado et al., 2009).

Por último, e para ambientes exteriores não abrigados, com exposição direta à ação da chuva e da radiação ultravioleta, o efeito torna-se mais gravoso que os anteriores, uma vez que a camada superficial da madeira, outrora degradada por ação da radiação ultravioleta, será exposta à ação direta da chuva e removida por esta, por processos de lixiviação e remoção. Uma vez removida a camada deteriorada, o material lenhoso fica, de novo, exposto à radiação ultravioleta, o que provocará uma nova deterioração. Todo este processo contribui para acelerar a degradação do elemento, que poderá, ainda, ser condicionada pela erosão causada pela ação do vento (Machado et al., 2009).

Para elementos de madeira que fiquem expostos em ambientes marinhos deve, ainda, considerar-se a absorção de sais pela madeira, que provocarão deterioração mecânica devido à sua cristalização, aumentando de volume e, conseqüentemente, provocando a separação das fibras da madeira.

Todos os processos de degradação por ação de agentes atmosféricos, referidos anteriormente, são lentos pelo que não conduzem, por si só, a situações de redução de propriedades mecânicas que comprometam a segurança estrutural. No entanto, estes fenómenos devem ser considerados uma vez que permitem que se criem as condições necessárias para o desenvolvimento de outros agentes de degradação da madeira, tal como os agentes biológicos.

Para que o efeito da deterioração devido a agentes atmosféricos seja minimizado, podem aplicar-se produtos de revestimento, como tintas, vernizes ou velaturas, com a capacidade de refletir ou absorver a radiação ultravioleta (LNEC, 1997).

- **Fogo**

A madeira é um material combustível e, por isso, apresenta um mau desempenho sob o ponto de vista da reação ao fogo. Por este facto, muitas das vezes é-se induzido a pensar, de maneira errada, que a madeira possui uma má resistência ao fogo. A resistência ao fogo das estruturas de madeira, sem qualquer tipo de tratamento prévio, é, geralmente, superior à das estruturas metálicas (Negrão & Faria, 2009). Um correto

dimensionamento da estrutura de madeira confere-lhe uma boa resistência ao fogo, permitindo que esta se mantenha durante determinado período de tempo, essencial para a salvaguarda das vidas humanas.

Durante uma situação de incêndio, a carbonização da madeira inicia-se para temperaturas por volta dos 280 – 300°C e a partir das faces expostas ao fogo. É criada, então, uma camada externa carbonizada (carvão) que permanece aderente ao material e que progride, de forma mais ou menos constante e relativamente lenta, para o interior do elemento. Esta camada, pelo facto de se tratar de um bom isolamento térmico, irá contribuir, de forma positiva, para retardar a subida da temperatura do material subjacente, mantendo-se esta praticamente inalterada e, assim, insuficiente para alimentar a progressão da carbonização, levando à autoextinção da combustão. No interior, a madeira irá manter, assim, as suas propriedades resistentes. (Figura 3.1) (Cruz & Nunes, 2012; Negrão & Faria, 2009; Cruz, 2012).



Figura 3.1 - Esquema da secção de madeira ardida (adaptado de www1, 2007).

A percentagem de madeira carbonizada varia de acordo com a espécie florestal considerada e com as condições de exposição ao fogo. A taxa de combustão varia inversamente com a densidade da madeira. O Eurocódigo 5, 2004 especifica uma taxa constante ao longo do tempo, entre 0,5 e 0,8 mm por minuto, dependente do tipo e densidade da madeira. De referir, ainda, que o comportamento ao fogo é tanto melhor para elementos com grandes secções transversais de madeira expostas, enquanto que peças com secção transversal diminuta apresentarão um mau desempenho (Cruz & Nunes, 2012; Cachim, 2007).

### 3.2. Degradação da madeira por agentes biológicos

A principal causa de deterioração da madeira, em Portugal, advém do ataque de agentes biológicos, nomeadamente fungos e insetos (Cruz & Nunes, 2012). Apesar da degradação por ação de fungos ser importante, esta tende a ser localizada. No que diz respeito à ação dos insetos, esta pode ser extensa e a infestação, geralmente, leva a uma maior deterioração na estrutura de madeira (Gilfillan & Gilbert, 2001). Os insetos que mais degradam a madeira, em Portugal, são as térmitas subterrâneas e os insetos de madeira seca, que podem ser carunchos ou térmitas de madeira seca.

De seguida, irá abordar-se, com maior detalhe, a degradação da madeira por ação de fungos e insetos. A degradação por ação de carunchos não será abordada neste subcapítulo pois, será explorada, com maior pormenor, no capítulo 3.3. Por questões de limitação de espaço, questões relacionadas com o tratamento apenas são apresentadas para este último caso.

- **Fungos**

Os fungos são organismos eucariotas, que podem ser unicelulares ou possuem uma estrutura constituída por células filamentosas (Eaton & Hale, 1993). Nas condições adequadas, alguns tipos de fungos podem dar origem a deterioração.

É comum efetuar-se a distinção entre os fungos que causam manchas, geralmente de cor escura, no borne da madeira (fungos cromogéneos e bolores), daqueles que provocam diversos tipos de podridão (fungos de podridão), presentes no borne e no cerne.

Os fungos cromogéneos não degradam a madeira de forma significativa, pois consomem apenas substâncias presentes nas suas células lenhosas, sem afetarem significativamente a parede celular. Por isso, não têm influência direta na variação das propriedades mecânicas da madeira (Nunes et al., 1990).

De entre os fungos que causam podridão devem distinguir-se os microfungos, que provocam podridão mole, dos restantes, responsáveis por situações mais frequentes (podridão branca e podridão castanha) (Cruz et al., 2015). Este tipo de fungos alimenta-se dos componentes da parede celular da madeira, alterando significativamente toda a estrutura lenhosa e, conseqüentemente, provocando uma diminuição da resistência mecânica da madeira.

Os fungos responsáveis pelo aparecimento de podridão castanha encontram-se, geralmente, associados à degradação de madeiras de resinosas e de algumas madeiras de folhosas com baixa durabilidade, enquanto que aqueles responsáveis pela podridão branca se encontram, de maneira geral, associados à degradação de madeiras de folhosas com média a alta durabilidade. Os microfungos responsáveis pela podridão mole, com um ritmo de atuação mais lento, encontram-se muitas vezes associados à degradação de madeiras de folhosas de alta durabilidade e também a algumas madeiras que anteriormente foram sujeitas a tratamentos preservadores (Leicester, 2001).

O teor de água da madeira e as condições de humidade e temperatura são fatores preponderantes para o desenvolvimento e progressão dos fungos (Eaton & Hale, 1993). Não existe um teor de água único que indique que o ataque irá ocorrer, uma vez que esse nível pode variar devido à diversidade de espécies florestais e de fungos existentes (Berry, 1994). No entanto, o ataque só acontece quando o teor de água na madeira atinge valores superiores a 20-22%, sendo mais rápido para valores superiores a 26% (Cruz & Nunes, 2012; Berry, 1994).

Os fungos necessitam, igualmente, de condições adequadas de oxigénio para se desenvolverem, razão pela qual não atacam madeira saturada e, por isso, não estão presentes na classe de risco cinco, expressa na norma EN 335 (2013) (vide Tabela 3.1) (Eaton & Hale, 1993). Desenvolvem-se em condições ideais de temperatura situadas entre os 10 e os 30°C, não havendo registo de ataque para temperaturas superiores a 40-50°C (Cruz & Nunes, 2012).

O borne de todas as espécies de madeira é considerado não durável ao ataque, enquanto que a durabilidade do cerne varia entre durável e não durável, consoante a espécie florestal; estas estão diferenciadas na norma EN 350 (2016), referida anteriormente.

Alguns exemplos de espécies de fungos são a *Coniophora puteana* Karst., *Gloeophyllum trabeum* Murrill, *Lentinus lepideus* Fr., *Poria spp.*, e *Serpula lacrymans* (Henriques et al., 2014; Bardet et al., 2004; Pinheiro et al., 2013) (Figura 3.2).

O ataque por fungos, em determinado elemento, pode resultar da contaminação através de peças já atacadas ou da germinação de esporos na madeira húmida, o que provoca o aparecimento de um filamento (hifa) que penetra na madeira e se ramifica (Cruz & Nunes, 2012; Eaton & Hale, 1993).

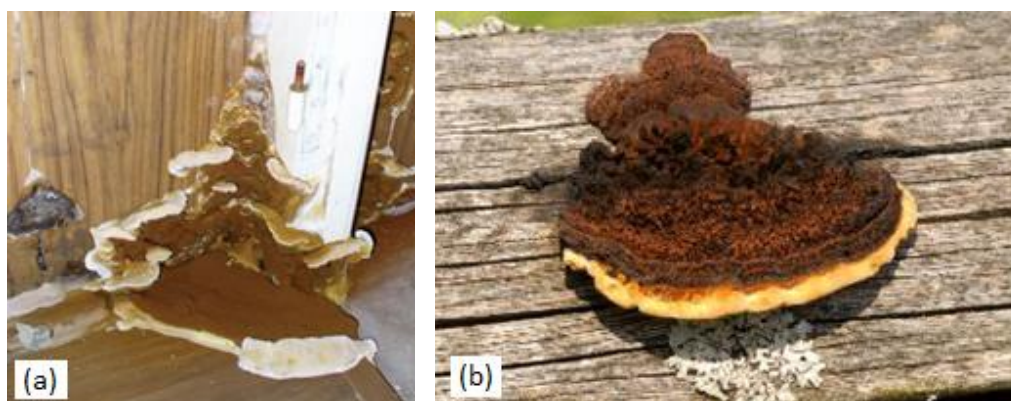


Figura 3.2 – Degradação por ação de fungos; (a) *Serpula lacrymans* (Pottier et al., 2014); (b) *Gloeophyllum trabeum* (Lindsey, 2018).

No interior dos edifícios, e devido ao facto da madeira se encontrar protegida dos agentes atmosféricos, dificilmente se encontrará em posição de vir a ser atacada. A degradação só ocorrerá, por isso, se existirem deficiências da construção que possibilitem a exposição dos elementos (Machado et al., 2009). Assim, estes só serão alvo de degradação se estiverem em contacto com outros que recebam água por capilaridade ou quando expostos ao ar livre, sujeitos às intempéries e, por isso, em condições favoráveis ao ataque. Uma vez que raramente se observam ataques quando os elementos se encontram protegidos dos

agentes atmosféricos, normalmente é suficiente a eliminação da fonte de humidade na madeira e a secagem do elemento para que o ataque seja erradicado (Berry, 1994).

O desenvolvimento de fungos de podridão conduz a perda de massa e de resistência mecânica na madeira, podendo ocasionar a sua completa destruição. A quantificação da gravidade do ataque na resistência mecânica da madeira nem sempre é fácil, podendo dar-se o caso de haver grandes níveis de perda de resistência mesmo com perdas de massa diminutas (Machado et al., 2009).

O rácio entre a área sujeita a degradação e a área intacta é um parâmetro importante que pode ser utilizado quando se pretende determinar o tempo de vida útil de uma estrutura sujeita a degradação por ação fúngica (Van de Kuilen, 2007). No entanto, a resistência mecânica que a estrutura apresenta pode ser suficiente para que se garanta a sua segurança, não sendo necessária a sua substituição, mas apenas um tratamento.

- **Térmitas**

As térmitas são insetos sociais que se organizam em colónias e dividem o trabalho através de um sistema de castas: rei e rainha, reprodutores alados; soldados, cuja função é a defesa da colónia; e obreiras, que constroem o ninho e são responsáveis pela alimentação de toda a colónia, constituindo, também, a casta mais numerosa dentro das colónias.

As térmitas são muito abundantes em ecossistemas terrestres, e têm um papel importante nos ciclos de nutrientes e matéria orgânica, dado o seu contributo para a decomposição de materiais celulósicos, como a madeira (Bignell & Eggleton, 2000).

As térmitas que atacam a madeira podem ser subterrâneas ou de madeira seca. As primeiras estão dependentes da existência de uma fonte de humidade para que sobrevivam e se propaguem, enquanto que as segundas não requerem este tipo de condições. As térmitas de madeira seca podem, por isso, propagar-se em elementos de madeira que não estejam em contacto com o solo (Eaton & Hale, 1993).

Em Portugal, a ação das térmitas é a que apresenta maior dificuldade de diagnóstico, uma vez que existem poucos sintomas externos de atividade (Cruz & Nunes, 2012).

- **Térmitas subterrâneas**

A maioria das espécies de térmitas subterrâneas constroem o ninho no interior do solo, com altos níveis de humidade, pouca luz e onde ocorre a propagação e o desenvolvimento da colónia (Eaton & Hale, 1993). Com o desenvolvimento e aumento da colónia, esta começa a expandir-se e, algumas espécies, começam a transitar, de forma regular, do seu habitat natural para as construções (Nunes, 2008), atacando madeiras com teor de água geralmente superior a 20%, mas não saturada e que se encontre, preferencialmente, no exterior dos edifícios, junto ao solo ou, quando no interior, especialmente nos pisos térreos (Machado et al., 2009).

De uma maneira geral, só se deteta a presença de térmitas subterrâneas na estrutura de madeira (Figura 3.3) aquando de um nível de degradação elevado, passível de comprometer a segurança estrutural. Isto acontece devido à escassez de sintomas externos de atividade, tais como a observação de canais de terra sobre a madeira ou de enxameações de insetos adultos alados (Cruz & Nunes, 2012; Machado et al., 2009). A madeira atacada aparenta estar intacta superficialmente, uma vez que a maioria da degradação acontece no seu interior, dando um aspeto característico "lamelado" à madeira (Figura 3.3), devido aos túneis formados pelas térmitas.

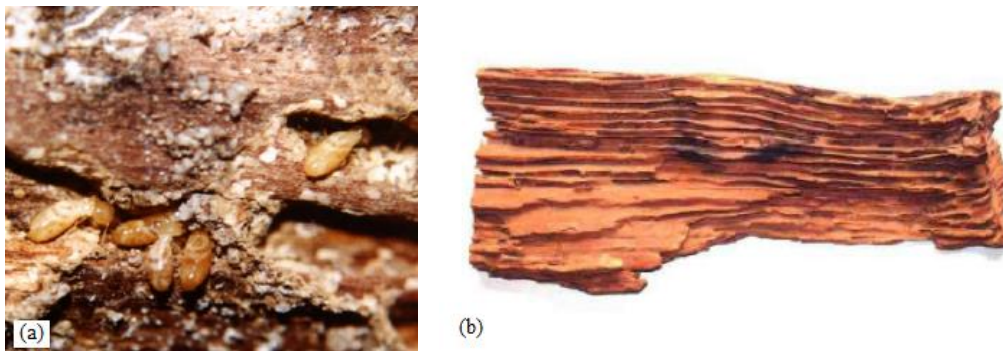


Figura 3.3 - (a) Térmitas subterrâneas (Nunes, 2006); (b) Aspeto "lamelado" da madeira atacada (Cruz & Nunes, 2008).

A espécie *Reticulitermes grassei* (Clément) (Blattodea, Rhinotermitidae) encontra-se com grande frequência em ambientes urbanos e florestais e está muito difundida em Portugal, sendo que todas as madeiras de origem nacional, e em especial o pinho, são suscetíveis ao seu ataque (Cruz & Nunes, 2012).

As térmitas irão provocar diminuição da secção transversal pelo que a gravidade do ataque irá depender da perda de secção provocada. As consequências do ataque podem ser muito graves para a segurança da estrutura, pelo que é de extrema importância o conhecimento da percentagem de madeira consumida pelos insetos.

- **Térmitas de madeira seca**

As térmitas de madeira seca (Blattodea: *Kalotermitidae*) são insetos sociais, que vivem em colónias de pequena dimensão (poucas centenas de indivíduos), organizadas num sistema de castas, e que se alimentam e fazem ninho no interior da madeira seca ou pouco húmida (Pearce, 1997; Lee, 1971).

Em Portugal continental e nos Arquipélagos da Madeira e dos Açores, conhecem-se duas espécies, ambas com capacidade de infestar estruturas de madeira. Uma das espécies é nativa do continente e introduzida em algumas ilhas, a *Kalotermes flavicollis* Fabricius (Nunes et al., 2005), e a outra é introduzida, a *Cryptotermes brevis* (Walker), cuja presença já foi assinalada em quatro ilhas do Arquipélago dos Açores, na Madeira, incluindo em Porto Santo, e mais recentemente na cidade de Lisboa (Nunes et al., 2005; Ferreira et al., 2013).

As duas espécies estão organizadas em colónias, com um sistema de castas definido, que inclui ninfas, pseudo-obreiras e soldados. Quando a colónia atinge a maturidade e em determinadas alturas do ano (Tabela 3.2), formam-se alados, que deixam o ninho para estabelecerem novas colónias (Eaton & Hale, 1993). O registo da sua presença é um indicador claro de infestação.

Quando no interior da madeira, as térmitas de madeira seca, partilham algumas das características do ataque por caruncho pequeno; no entanto, e particularmente no caso de *C. brevis*, podem causar um nível de degradação elevado em períodos de tempo relativamente curtos. É, assim, fundamental para a segurança das estruturas a deteção precoce dos ataques.

Na Tabela 3.2 resumem-se algumas das características que permitem a identificação da presença de térmitas de madeira seca e a distinção entre as duas espécies referidas anteriormente, o que é particularmente importante para o caso de as suas zonas de distribuição se encontrarem sobrepostas.

Tabela 3.2 - Algumas características identificadoras do ataque por térmitas da madeira seca. (adaptado de Parracha et al., 2018).

Espécie	Insetos		Madeira	Sintomas	
	Características diagnosticantes	Época de enxameação <sup>a</sup>		Orifícios	Serrim
<i>Cryptotermes brevis</i>	Alados de coloração acastanhada; soldados com cabeça cilíndrica e achatada na frente, sem mandíbulas salientes	Entre maio e agosto	Resinosas e Folhosas; preferência pelo borne	Orifícios (que podem ter sido de saída de carunchos pequenos) selados por uma película protetora	Partículas fecais soltas, de forma ovoide, facetada de cor variável
<i>Kalotermes flavicollis</i>	Alados de cor negra e com o pronoto amarelo; soldados com mandíbulas compridas e avermelhadas	Entre setembro e novembro	Resinosas e Folhosas; em árvores têm preferência pelo cerne		Partículas fecais de forma ovoide, facetada de cor variável, normalmente interligadas por uma massa de terra

<sup>a</sup> Em Portugal continental e ilhas, para as condições atmosféricas consideradas normais para a zona geográfica referida

Normalmente, a espécie *Kalotermes flavicollis* tem o seu ninho em zonas frágeis de árvores ou arbustos, e utiliza a madeira como fonte de alimento e abrigo. Trata-se de uma espécie altamente polífaga podendo atacar várias espécies de árvores, o que contribui para a sua ampla distribuição. Tem preferência por árvores debilitadas, estando a sua distribuição, normalmente, associada a árvores mortas ou madeira morta de árvores saudáveis.

Ocasionalmente, instala-se em madeira em serviço, mas necessita que esta possua um teor de água um pouco superior ao normal para madeira seca (geralmente acima de 18-20%), pelo que zonas de estruturas de cobertura com problemas de humificação contínua ou ocasional são as que apresentam maior risco de infestação num edifício. A sua importância em termos de danos em madeira com funções estruturais em edifícios pode ser considerada como limitada e ocasional, quando comparada a outras espécies de térmitas, como por exemplo a térmita subterrânea *Reticulitermes grassei*, no continente, ou a *Cryptotermes brevis* nos Arquipélagos dos Açores e Madeira.

A espécie *C. brevis* é, de entre as espécies de térmitas de madeira seca, a que possui o estatuto de praga mais elevado (Nunes et al., 2005) e uma forte disseminação mundial com potencial de crescimento (Ewart et al., 2017). Esta espécie possui um ciclo de vida com divisão de castas, característico dos insetos sociais, e a colonização de uma estrutura ou de um edifício começa, geralmente, pela instalação de um par de alados durante a época de enxameação. A deteção das colónias assenta, sobretudo, numa inspeção visual, sendo que os sinais externos mais visíveis são: o aparecimento na madeira de orifícios de expulsão (“kick-out”) com 1 a 2 mm selados; o aparecimento de pequenas partículas fecais de cor variável; na época de enxameação, o aparecimento de alados. Após um período relativamente curto de instalação, a nova colónia desenvolve-se rapidamente e pode causar deterioração grave nos elementos de madeira em curtos períodos de tempo (poucos anos).

Considerando as diferenças significativas em termos de gravidade de infestação entre as duas espécies de Kalotermitidae referidas anteriormente e presentes no território português, a sua correta identificação assume um papel ainda mais relevante (Tabela 3.2, Figura 3.4).



Figura 3.4 - Degradação por ação de térmitas de madeira seca (www2, 2005).

- **Xilófagos marinhos**

Quando a madeira se encontra em contacto com água salgada, pode ocorrer degradação por ação de xilófagos marinhos (vide Tabela 3.1 – classe de risco 5).

Os xilófagos destroem a madeira, abrindo nela galerias e alojando-se, principalmente, nas zonas da madeira afetada pelo movimento das marés. Quanto à velocidade de degradação do elemento, esta depende das condições do local em que este se encontra e da espécie de xilófago existente (Borges et al., 2010).

### 3.3. Degradação da madeira por carunchos

#### 3.3.1. Generalidades

Os carunchos são insetos pertencentes à ordem Coleoptera; são holometabólicos, ou seja, têm metamorfose completa, passando por diferentes fases no seu desenvolvimento: ovo, larva, pupa e adulto. As larvas dos carunchos que utilizam a madeira como fonte de alimento podem causar sérios danos nos elementos de madeira em serviço (Bravery et. al., 1992). Em Portugal estão presentes diversas famílias de carunchos, sendo que as três mais importantes, em termos de ataque a elementos de madeira, são as famílias: 1) Cerambycidae que inclui os chamados carunchos grandes (por exemplo, a espécie *Hylotrupes bajulus* L.); 2) Anobiidae (por exemplo *Anobium punctatum*); 3) Lyctidae (por exemplo *Lyctus brunneus*). Note-se que estas duas últimas famílias incluem os insetos usualmente denominados por carunchos pequenos (Figura 3.5).

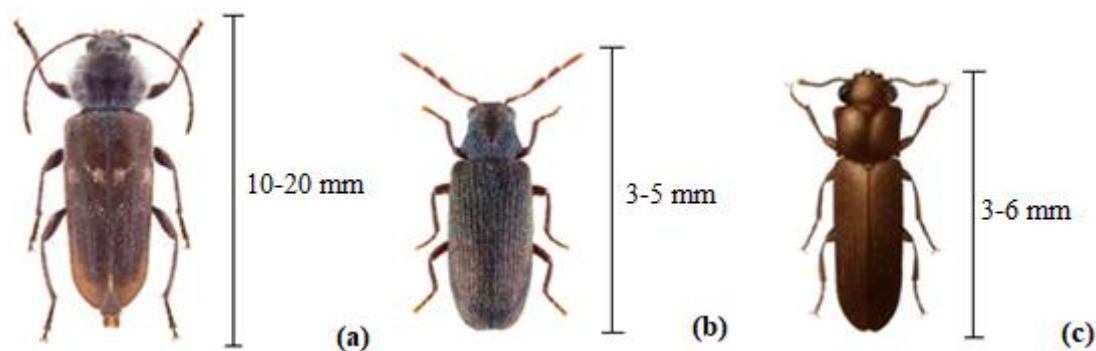


Figura 3.5. Adultos de algumas das principais espécies de carunchos existentes em Portugal; (a) *Hylotrupes bajulus* (adaptado de www3, 2018); (b) *Anobium punctatum* (adaptado de www4, 2018); (c) *Lyctus brunneus* (adaptado de www5, 2018).

A correta identificação da família e espécie de caruncho que está a degradar a madeira é importante para a escolha do tratamento adequado para a estrutura de madeira atacada (Bravery et. al., 1992), bem como para o rastreio da entrada de eventuais espécies invasoras no país. Esta tarefa não é simples, uma vez que podem coexistir várias famílias de carunchos, com diferentes biológicas, preferências alimentares e tipologia de danos causados na madeira.

Na inspeção de uma estrutura de madeira, que deve ser geral e cuidadosa, deve existir uma atenção especial na busca de um conjunto de sinais que permitam identificar, nessa estrutura, a presença de insetos, como larvas xilófagas.

Os sinais mais óbvios de degradação por caruncho são: a presença de orifícios de saída de insetos; a presença de serrim no interior da madeira ou em montículos no exterior e a deteção de insetos adultos no exterior (Figura 3.6). Aspetos como o tipo e estado da madeira (resinosa ou folhosa, borne ou cerne, são ou degradada por fungos); o tamanho e forma dos orifícios de saída dos carunchos adultos na superfície da madeira; a forma, cor e textura do serrim e o tamanho e forma dos túneis, no interior da madeira, podem ser utilizados para a correta identificação da espécie (Tabela 3.3)

Tabela 3.3 - Algumas características do ataque dos principais carunchos em Portugal (adaptado de Cruz & Nunes, 2012; Berry, 1994).

Família de caruncho	Sintomas		
	Orifícios de saída	Serrim	Outros
<b>Cerambycidae</b> (ex: <i>Hylotrupes bajulus</i> )	Ovais - 6 a 10 mm	Granuloso, de cor creme que surge, quer junto aos orifícios de saída, quer compactado nas galerias formadas pelas larvas no interior da madeira	Empolamento da superfície em particular quando existe revestimento em contínuo como uma tinta
<b>Anobidae</b> (ex: <i>Anobium punctatum</i> )	Circulares - 1 a 3 mm	Montículos de serrim, cor creme, formados por pequenos grânulos elipsoidais. Túneis em direções aleatórias.	Muitas vezes associado a madeiras mais velhas e já com ataque por fungos de podridão
<b>Lictidae</b> (ex: <i>Lyctus spp.</i> )	Circulares - 1 a 2 mm	Muito fino, que forma pequenos montículos. Solta-se facilmente dos túneis.	Não ataca madeiras mais velhas uma vez que a madeira tem que ser rica em amido

Na Figura 3.6 apresenta-se uma comparação entre uma imagem com os orifícios de saída dos carunchos, sempre bem abertos, e outra, devido a uma infestação por térmitas de madeira seca, onde é possível notar uma película protetora a fechar os orifícios para o exterior.

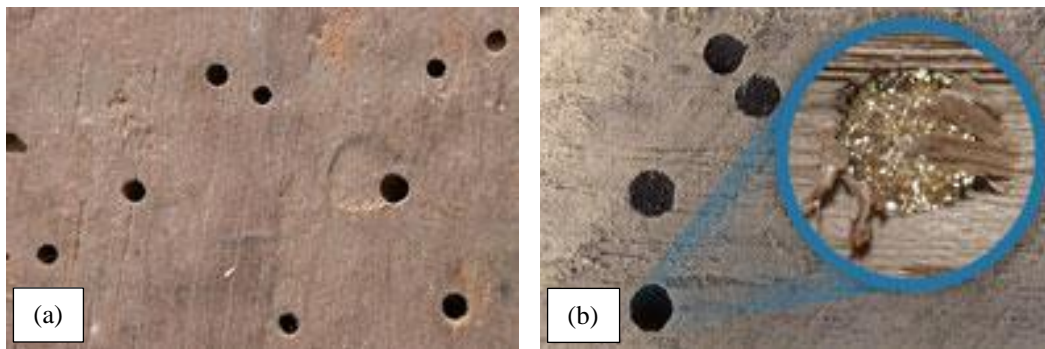


Figura 3.6 - (a) Orifícios de saída de carunchos; (b) Orifícios de térmitas de madeira seca (www1, 2018).

### 3.3.2. Danos e tratamento da madeira

No caso das estruturas de cobertura, caso se verifique a presença de uma infestação, é fundamental avaliar-se a gravidade e a extensão do ataque e aferir se a infestação continua ativa. Uma inspeção visual em que se detetem, para além dos orifícios de saída na superfície da madeira, a presença de insetos adultos e serrim recente, é o método mais fácil e usual para a deteção de uma infestação ativa.

Quando uma infestação é localizada, a substituição da madeira infestada é uma opção exequível, se for economicamente vantajoso e estruturalmente viável. Acontece que, muitas das vezes, não existe necessidade efetiva de substituir a estrutura de madeira, uma vez que a segurança estrutural não está comprometida. Em alguns casos, a aplicação de um tratamento à madeira é suficiente para que a infestação cesse e, dependendo da extensão dos danos, pode não haver necessidade de reparação ou substituição da estrutura. É, por isso, de extrema importância a correta identificação e avaliação dos danos causados por determinado inseto nas estruturas de madeira (Berry, 1994).

Quando se deteta a presença de caruncho grande, *Hylotrupes bajulus* em madeira de resinosas (as folhosas não são suscetíveis a esta espécie), deve existir um cuidado especial com as questões de segurança estrutural pois este inseto consome, tipicamente, todo o borne mesmo que a madeira pareça, à distância, manter a sua integridade. No caso de uma infestação grave por caruncho grande é recomendado considerar que a secção residual dos diferentes elementos da estrutura corresponde ao cerne, que não é consumido.

Frequentemente, a substituição ou o reforço de elementos deteriorados é necessária após a realização de um tratamento *in situ* da madeira original, por exemplo através da aplicação de inseticidas líquidos. Para a realização deste tratamento curativo com produtos inseticidas adequados, a zona de borne mais degradada deve, sempre que possível, ser retirada por raspagem, para que se elimine o serrim acumulado que atuaria como barreira à penetração dos produtos preservadores. Os inseticidas líquidos podem ser aplicados por injeção, pulverização ou pincelagem, sendo que outras soluções como a aplicação em pastas ou gel podem ser adequadas. Para os elementos novos de madeira que venham a ser introduzidos na estrutura, deve ponderar-se a necessidade de realização de um tratamento preventivo a posteriores infestações ou a utilização de uma madeira com durabilidade natural superior. Sempre que os produtos preservadores forem aplicados por impregnação superficial na madeira (por exemplo pincelagem) deve existir um cuidado especial na utilização da madeira tratada uma vez que procedimentos de pregagem ou corte, após o tratamento, podem quebrar a barreira aos insetos criada pelo produto e, conseqüentemente, permitir uma reinfestação.

No caso do ataque por carunchos pequenos, uma das grandes dificuldades prende-se com a necessidade de quantificar a resistência das secções transversais da madeira com danos devido à ação destes agentes biológicos (Cruz & Machado, 2013). Os efeitos desta ação podem ser considerados, de forma geral, assumindo uma redução da secção transversal ou adotando propriedades mecânicas inferiores para essas secções transversais (Cruz & Machado, 2013). No entanto, desconhece-se o impacto real da ação do inseto em estruturas de madeira, com forte influência nas decisões sobre o nível de intervenção necessário.

A maior parte das infestações causadas por caruncho pequeno têm pouca importância estrutural, ainda que estejam ativas durante longos períodos de tempo. Por isso, normalmente, não é necessária a substituição da madeira, optando-se apenas por intervenções curativas para que o ataque seja controlado.

A gravidade do ataque das espécies pertencentes ao género *Lyctus*, que se alimentam de folhosas ricas em amido, pode inserir-se em duas categorias de risco (Berry, 1994): 1) baixa gravidade - para estruturas com mais de 20 anos de idade, a madeira já não possui amido (a fonte de alimento deste inseto) e, por isso,

a segurança estrutural, normalmente, não é posta em causa; 2) alto risco - para estruturas mais modernas (< 20 anos), em que a madeira possui amido e em que a infestação se pode propagar. Neste último caso podem ocorrer danos estruturais e, por isso, é necessário um levantamento estrutural e, em último caso, a substituição dos elementos afetados.

Uma última nota refere-se à madeira infestada retirada de serviço, que não deve ser reaproveitada, a menos que seja sujeita a um tratamento prévio adequado para o controlo dos insetos xilófagos.

#### 3.3.3. Caruncho pequeno – Família Anobiidae

A família de caruncho pequeno Anobiidae possui cerca de 13 espécies identificadas e tem estatuto de peste em países com climas temperados, como no caso de Portugal (Eaton & Hale, 1993). Dentro desta família destacam-se as espécies *Anobium punctatum* e a *Xestobium rufovillosum*.

- ***Xestobium rufovillosum***

O *Xestobium rufovillosum* é conhecido na literatura anglo-saxónica como “*deathwatch beetle*”. Esta designação foi-lhe atribuída pelo facto de no passado ser usual ouvir-se nos tribunais o som característico da sua ação, enquanto as pessoas julgadas eram sentenciadas à morte (Weaver, 1997). Apesar da presença deste inseto não se encontrar documentada em Portugal, este é bastante comum em toda a Europa.

Este inseto é conhecido pelos danos causados em edifícios históricos. Os insetos adultos possuem uma coloração acastanhada e um comprimento que varia entre 6 e 9 mm, enquanto que as larvas podem atingir até 9 mm de comprimento (Bravery et al., 1992).

O ataque destes insetos pode ser identificado pela presença de serrim em forma de “disco”. Os orifícios de saída são circulares, com dimensão média de 3 mm de diâmetro.

Preferem madeiras com um teor de água mais elevado e previamente degradadas por fungos de podridão, sendo que, por isso, algumas folhosas tropicais, com durabilidade mais elevada, sejam imunes ao ataque. Atacam, preferencialmente, madeiras de folhosas, apesar do ataque também se poder dar em resinosas (Eaton & Hale, 1993).

- ***Anobium punctatum***

O *Anobium punctatum*, conhecido na literatura anglo-saxónica como “*woodworm*” ou “*common furniture beetle*”, encontra-se muito associado à degradação de madeira de mobiliário. Apesar de assim ser, este inseto ocorre de forma mais frequente e causa maiores danos em madeira com função estrutural, do que propriamente em mobília. No entanto, pode ser introduzido dentro dos edifícios através de mobília infestada, dando origem à sua propagação (Eaton & Hale, 1993).

Os insetos adultos possuem uma coloração castanho escura e um comprimento entre 3 e 5 mm, enquanto que as larvas podem atingir até 6 mm de comprimento (Bravery et al., 1992).

Estes insetos atacam, preferencialmente, o borne de madeiras resinosas ou folhosas. Algumas das características associadas ao ataque desta espécie podem ser consultadas na Tabela 3.3.

## 4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

### 4.1. Programa experimental

#### 4.1.1. Considerações gerais

A campanha experimental realizada no presente estudo teve dois objetivos principais:

- 1) avaliar o impacto da degradação devido à ação de caruncho pequeno nas propriedades mecânicas de estruturas antigas de madeira;
- 2) contribuir para o desenvolvimento de um modelo, com base em elementos de madeira degradados, que seja representativo do nível de degradação existente num determinado elemento estrutural.

Para responder ao primeiro objetivo, realizaram-se ensaios mecânicos (compressão paralela às fibras e arrancamento perpendicular às fibras) em provetes de madeira antiga (*Pinus pinaster* Ait., que continua a ser muito utilizada na indústria da construção em Portugal) degradados por caruncho, designados como “provetes naturais” (PN), e em provetes com tentativa de simulação da degradação, designados com “provetes artificiais” (PA). Manteve-se, ainda, um grupo de controlo com provetes de madeira “sã” (PS). Foram ensaiados 216 provetes (97 ao arrancamento e 119 à compressão).

Os ensaios mecânicos foram realizados no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Neste capítulo descreve-se o processo de categorização e caracterização das amostras, bem como os procedimentos desenvolvidos nas campanhas de ensaios para a caracterização mecânica dos provetes. Apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos efetuados em provetes degradados pela ação de caruncho e com simulação da degradação. No fim, correlacionam-se e comparam-se os resultados obtidos e conclui-se sobre estes.

#### 4.1.2. Categorização e caracterização das amostras

Neste trabalho, optou-se pela simulação da degradação por caruncho pequeno em provetes de madeira por não ser possível, com os meios disponíveis à data, determinar-se a percentagem de volume de madeira consumida pelos carunchos nos provetes com “degradação natural”. Por se desconhecer a percentagem de material perdido, desconhece-se, igualmente, a massa volúmica do material (original e residual), fator de extrema importância na avaliação da segurança da estrutura e correlacionável com a maioria dos parâmetros de avaliação das propriedades mecânicas. Nos provetes com degradação simulada (PA), ao conhecer-se a percentagem de material perdido, conhece-se, também, a massa volúmica. Se os valores obtidos nos ensaios mecânicos para PA se aproximarem daqueles que se venham a obter para PN, então, a degradação artificial foi bem conseguida e é possível estabelecer-se uma correlação entre PA e PN e, posteriormente, entre a massa volúmica para um provete degradado e um qualquer parâmetro mecânico avaliado. A madeira utilizada foi classificada visualmente e foi-lhe atribuída uma classe de resistência para resinosas C18.

Foram ensaiados, à compressão, 119 provetes (41 PN e 72 PA), enquanto foram ensaiados, ao arrancamento, 97 provetes (10 PN e 72 PA). O grupo de controlo com provetes de madeira sã (PS), isenta de degradação, teve um total de 21 amostras (6 para os ensaios de compressão e 15 para os de arrancamento). Para se simular a degradação nos PA, consideraram-se 3 padrões de furação (aleatório, em quincôncio e ortogonal) e dois níveis de percentagem de material perdido (furação numa direção, com 0,7% de material perdido, e furação em 2 direções, com 1,4% de material perdido). A furação numa direção foi efetuada na direção paralela às fibras, enquanto a furação em 2 direções foi efetuada nas direções paralela e tangencial às fibras. As densidades de furação adotadas foram estimadas depois de se contabilizar o número de orifícios de saída nas várias secções das vigas degradadas “naturalmente”. A Tabela 4.1 apresenta o sistema de furação utilizado, enquanto o esquema da Figura 4.1 apresenta uma representação da campanha experimental realizada.

Tabela 4.1 – Sistema de furação.

Diâmetro	Comprimento	Furos			Área secção a furar	Volume material perdido	% material perdido
		Volume	Densidade	Número			
mm	mm	mm <sup>3</sup>	furos/cm <sup>2</sup>	furos	mm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	%
1,5	50	335,4	1	25	2500	0,88	0,7
			2	50	2500	1,77	1,4

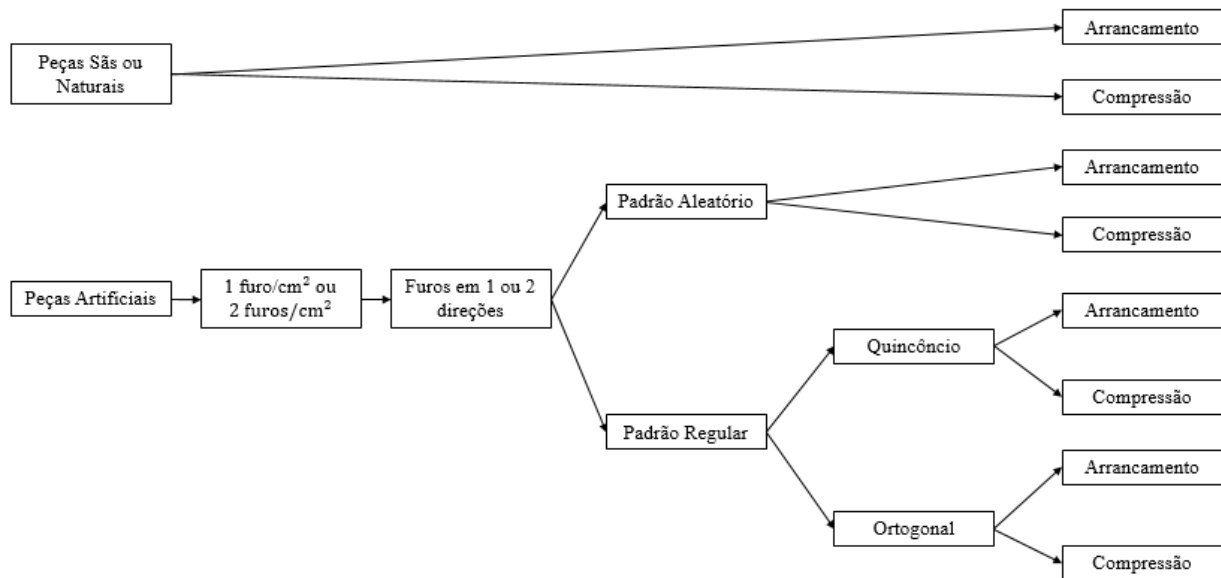


Figura 4.1 – Representação esquemática da campanha experimental realizada.

#### 4.1.2.1. Peças artificiais e sãs (PA e PS)

A madeira utilizada para a simulação da degradação por caruncho pequeno e para o grupo de controlo foi adquirida, ainda verde, em peças com  $0,08 \times 0,16 \times 4,00 \text{ m}^3$ . Posteriormente, foi cortada em troços com aproximadamente 1 m e submetida a um processo de secagem em estufa até atingir um teor de água médio de 12%. Quando se atingiu um teor em água próximo do de referência ( $H = 12\%$ ), as peças foram cortadas nas Oficinas de Carpintaria e de Mecânica do LNEC. Obtiveram-se 165 provetes (78 para os ensaios de compressão e 87 para os ensaios de arrancamento). De seguida, as peças artificiais foram sujeitas ao processo de furação para simulação da degradação, de acordo com o estipulado na Tabela 4.1 e no esquema da Figura 4.1.

Os provetes obtidos para os ensaios de compressão têm dimensões médias de secção transversal de  $2,5 \times 5 \text{ cm}^2$  e 10 cm de comprimento, enquanto os provetes obtidos para os ensaios de arrancamento têm dimensões médias de secção transversal de  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  e 10 cm de comprimento.

#### 4.1.2.2. Peças naturais (PN)

A madeira utilizada para o estudo da degradação por ação de caruncho pequeno proveio da demolição das asnas de suporte de uma cobertura de um edifício do início do século XX, em Sintra. Obtiveram-se 3 vigas (Figura 4.2) com vários níveis de degradação, causados, na sua maioria, pela espécie de caruncho pequeno *Anobium punctatum*. Depois, procedeu-se a uma análise visual e à marcação da madeira. Nesta fase deu-se mais atenção a dois aspetos: procurou efetuar-se a marcação na madeira de modo a que se obtivessem provetes, o mais possível, isentos de defeitos; identificaram-se e contabilizaram-se os orifícios de saída na madeira de forma a inferir as zonas que, possivelmente, apresentariam maior grau de degradação.



Figura 4.2 - Peças no processo de análise visual e de marcação.

Para a marcação da madeira, utilizou-se uma abordagem simples, em que se atribuiu uma designação a cada segmento de madeira marcado, através da numeração:

$$X_1 - X_2 - X_3$$

$X_1$  corresponde à peça em análise ( $X_1 \in \{1,2,3\}$ ) e  $X_2$  corresponde ao troço da peça em análise. Dividiu-se cada uma das peças em 5 troços, por isso ( $X_2 \in \{1,2,3,4,5\}$ ).  $X_3$  corresponde à face considerada da peça em análise ( $X_3 \in \{1,2,3,4\}$ ). Para além disso, contabilizaram-se as secções transversais de cada uma das vigas (lado A e B). Neste caso usou-se a mesma numeração explanada anteriormente, com a diferença que, para este caso,  $X_3 \in \{A, B\}$ .

Na Figura 4.3 apresenta-se um exemplo da numeração utilizada.

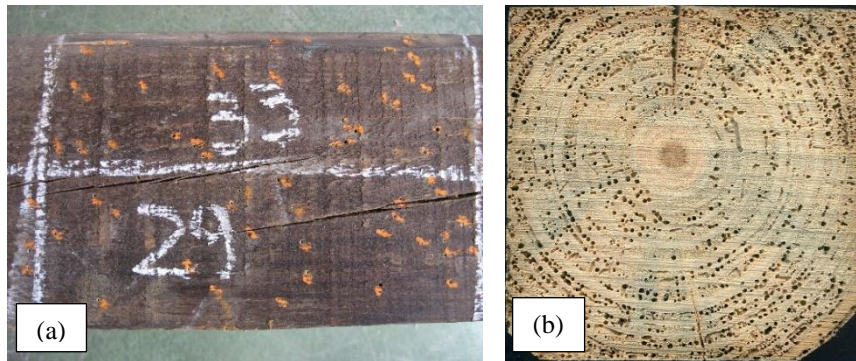


Figura 4.3 – (a) Viga 2 marcada {2,1,4}; (b) Secção transversal viga 3 {3,4,A}.

Depois da madeira estar marcada, contabilizou-se o número de orifícios de saída em cada peça e por cada troço considerado. Os resultados encontram-se na Figura 4.4. A contabilização efetuada para cada peça, por cada troço e para cada face considerada, encontra-se em tabelas disponíveis em Anexo (4A, 4B). De notar, ainda, que existe um padrão na distribuição dos túneis na secção transversal da madeira. Os túneis estão distribuídos, fundamentalmente, pelos anéis de primavera, menos densos, progredindo, geralmente, numa direção tangencial aos anéis de outono, mais densos. Este facto constituiu a principal razão para a furação numa só direção ter sido sempre paralela às fibras.

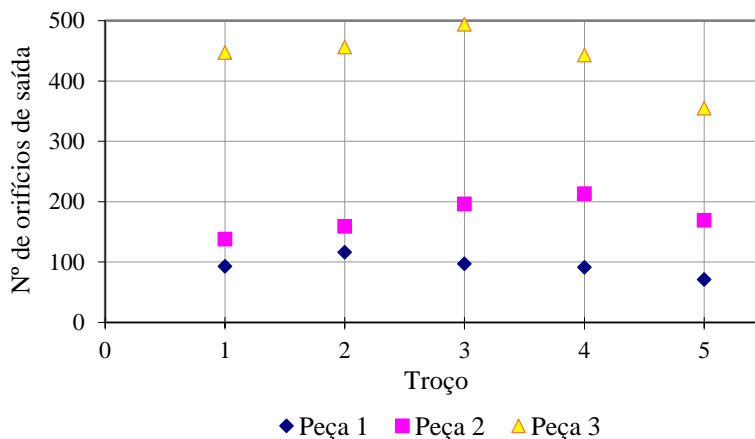


Figura 4.4 - Número de orifícios de saída existentes por troço de peça considerado.

Posteriormente, as vigas foram cortadas nas Oficinas de Carpintaria e de Mecânica do LNEC. Obtiveram-se 30 provetes de dimensões médias de secção transversal de  $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ . Dos provetes obtidos, 10 foram utilizados para os ensaios de arrancamento, sendo que os outros 20 foram novamente cortados, até se obterem 41 provetes de dimensões médias de secção transversal de  $2,5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ . Estes provetes foram utilizados nos ensaios de compressão.

Após serem cortados, os provetes resultantes das peças com degradação, foram condicionados numa câmara climática com condições de temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e de humidade relativa (HR) de  $65 \pm 5\%$ , de

modo a atingirem um teor de água idêntico ao de referência e de acordo com o especificado na norma EN 408 (2010).

### 4.2. Procedimentos experimentais

#### 4.2.1. Determinação do teor de água e massa volúmica

Depois de terem sido retirados da câmara climática, efetuou-se um levantamento das dimensões de todos os provetes existentes (PA, PN e PS), determinando-se, também, a respetiva massa.

A massa volúmica, para um dado valor de teor de água  $H$ , foi determinada, de acordo com a norma NP 616 (1973), utilizando-se a equação 4.1.

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (4.1)$$

em que  $m_H$  é a massa do provete e  $V_H$  o seu volume, determinado pelo produto das dimensões obtidas durante a medição dos provetes. O resultado é obtido em  $\text{kg/m}^3$ . De notar que este valor de massa volúmica tem que ser corrigido caso o teor de água dos provetes não esteja no valor de referência, estabelecido pela normalização internacional em 12%.

O valor de teor em água foi medido, para cada provete, de acordo com a ISO 13061-1 (2014) e de acordo com a equação 2.1 (vide secção 2.1.2 do Capítulo 2).

Como se verificaram variações ligeiras em torno do teor de água das amostras, no fim, corrigiu-se o valor da massa volúmica obtida para cada provete para um valor de teor de água de referência de 12%. Utilizou-se a equação 4.2.

$$\rho_{12} = \rho_H \times \frac{(100 + 12) \times (100 + H\alpha_v)}{(100 + H) \times (100 + 12\alpha_v)} \quad (4.2)$$

em que  $H$  corresponde ao teor de água “real” do provete e  $\alpha_v$  representa o coeficiente de retração volumétrica. Para a madeira de pinho bravo tem-se que  $\alpha_v = 0,60$  (ver Tabela 2.6 – Capítulo 2.3.2).

#### 4.2.2. Ensaio de compressão paralela às fibras

O ensaio de compressão axial ou na direção paralela às fibras, para obtenção do parâmetro  $f_{c,0}$ , foi realizado de acordo com o especificado na norma NP 618 (1973). O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN (Figura 4.5) e consistiu na aplicação de forças progressivamente crescentes no provete a uma velocidade constante até que se atingisse a rotura. A velocidade de aplicação da carga foi estimada de modo a que a rotura ocorresse em cerca de 180 segundos. Neste ensaio foram utilizados dois pratos acoplados à máquina (Figura 4.5), um fixo e um móvel, provido de uma rótula de modo a permitir a aplicação da carga sem induzir flexão. A força de rotura corresponderá à força máxima aplicada durante o intervalo de tempo do ensaio.

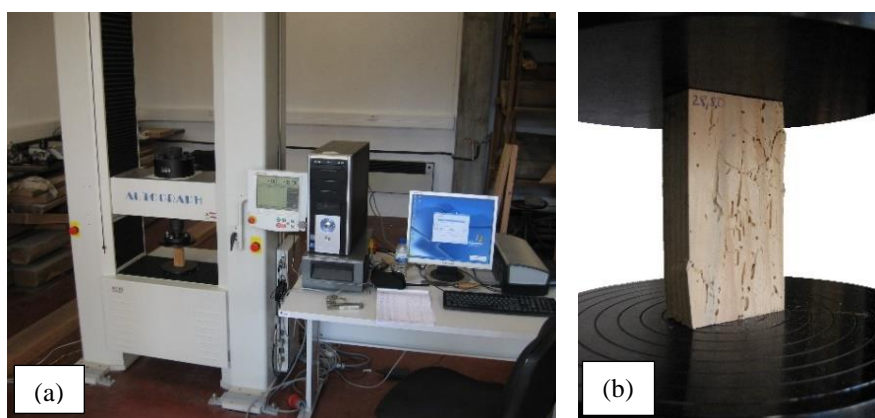


Figura 4.5 – Ensaio de compressão axial: (a) equipamento de ensaio; (b) pormenor de um ensaio de compressão.

A resistência à compressão paralela às fibras,  $f_{c,0}$ , é obtida através do quociente entre a força máxima ( $F_{máx}$ ), correspondente à rotura, e a área de impacto ( $A$ ), dada através da equação 4.3.

$$f_{c,0} = \frac{F_{máx}}{A} \quad (4.3)$$

Na Figura 4.6 apresenta-se um gráfico típico de força-deslocamento obtido neste ensaio. O gráfico, a título de exemplo, refere-se ao ensaio de compressão de 5 PA (1.2.1-A; 1.2.1-B; 1.2.2-A; 1.2.2-B; 1.2.3-B). Da análise do gráfico, pode concluir-se que, até se atingir a carga máxima, que leva à rotura, o comportamento do material é aproximadamente elástico linear, tal como referido no Capítulo 2.2.3.

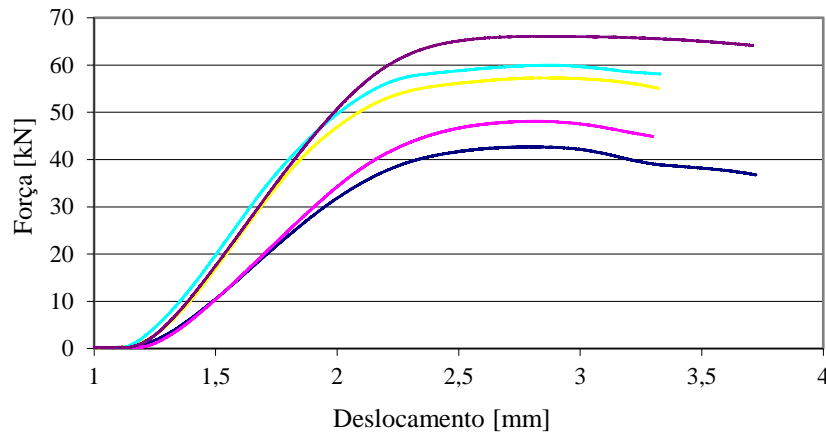


Figura 4.6 - Exemplo de gráfico força-deslocamento, obtido para PA, até à rotura em compressão.

#### 4.2.3. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras

O ensaio de arrancamento na direção perpendicular às fibras foi efetuado de acordo com as instruções indicadas pela norma BS EN 1382 (1999). O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN, com acessórios adaptados para o efeito e tem como objetivo final avaliar a resistência à extração da ponta de um parafuso, aparafusado de forma normalizada num provete de madeira (Figura 4.7).

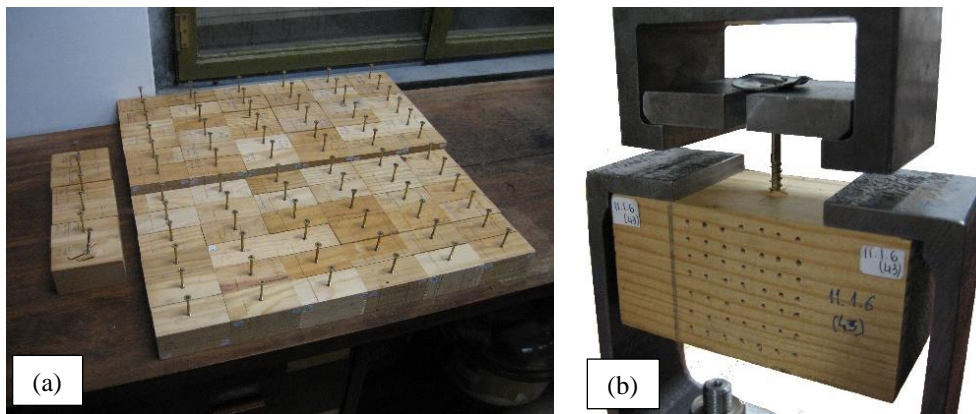


Figura 4.7 - Ensaio de arrancamento: (a) PA para ensaio; (b) pormenor de um ensaio de arrancamento.

Para este ensaio utilizou-se uma profundidade de penetração da madeira de 20 mm e uma pré-furação com um diâmetro de 4 mm, para ir ao encontro de um estudo realizado por Gilfillan & Gilbert (2001).

Os parafusos são aparafusados na amostra de madeira, com pré-furação, na direção perpendicular às fibras. Não se efetua distinção entre os planos radial e tangencial, uma vez que se verificou que os valores da força de arrancamento não diferem de forma importante entre estes dois planos (Figura 4.8). No fim, avalia-se a força máxima necessária para o arrancamento do parafuso.

#### 4. Avaliação das propriedades mecânicas do material

No cálculo do valor da resistência ao arrancamento, utilizou-se a equação 4.4 (BS EN 1382, 1999), em que  $F_{m\acute{a}x}$  se refere ao valor da força máxima de arrancamento do parafuso,  $l_p$  se refere à profundidade de penetração do parafuso no elemento de madeira e  $d$  se refere ao diâmetro interior do parafuso. Utilizou-se um valor de  $l_p = 20 \text{ mm}$  e um valor de  $d = 3,5 \text{ mm}$ .

$$f = \frac{F_{m\acute{a}x}}{d \times l_p} \quad (4.4)$$

Utilizou-se um parafuso com um diâmetro nominal de 6 mm e um comprimento, desde a cabeça até à ponta de 60 mm. O fuste é parcialmente roscado num comprimento de 20 mm, medidos desde a ponta, sendo o restante liso até à cabeça, que apresenta um formato cónico. Na ponta roscada apresenta um rasgo, que tem a função de facilitar o aparafusamento.

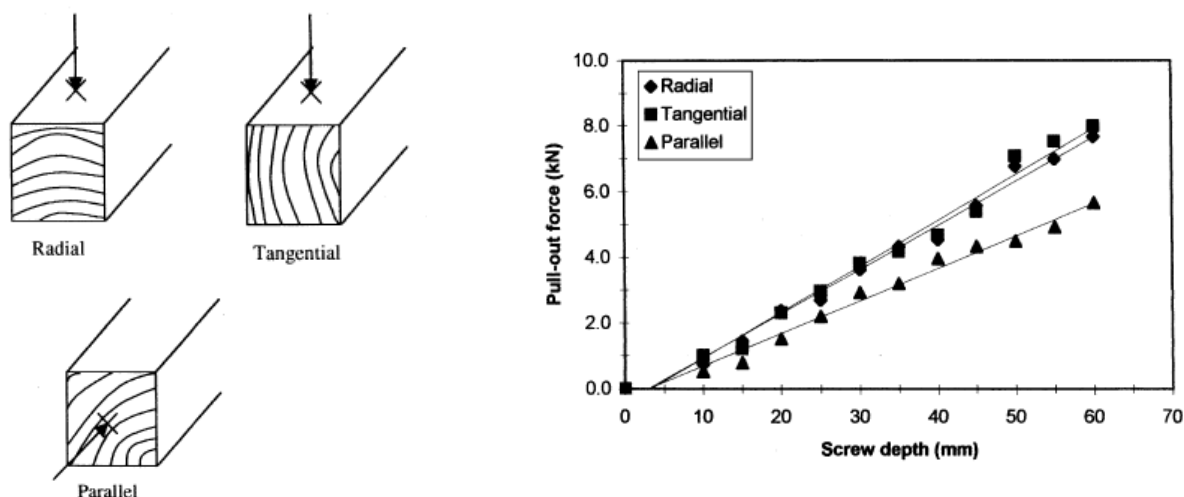


Figura 4.8 - Resultados dos ensaios de Gilfillan & Gilbert (2001).

### 4.3. Apresentação e discussão de resultados

Nesta secção apresentam-se os principais resultados experimentais obtidos para a caracterização das amostras (teor de água e massa volúmica) e para os ensaios mecânicos realizados (compressão e arrancamento), bem como a sua análise e correlação.

#### 4.3.1. Teor de água e massa volúmica

Tal como se referiu anteriormente, para os provetes PN, condicionados em câmara climática até massa constante após serem cortados, não se mediu o teor de água diretamente, por se saber que este estará próximo do teor de água de referência. Além disso, para madeira com degradação, é difícil efetuar uma medição precisa do teor de água com recurso a equipamentos portáteis. Para os provetes PA, mediu-se o teor de água de acordo com o especificado na ISO 13061-1 (2014).

A obtenção do teor de água e da massa volúmica foi efetuada para 136 provetes, antes de serem cortados para o ensaio à compressão, ou seja, a medição destes parâmetros foi efetuada para os provetes de dimensões médias de secção transversal de  $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ .

Obteve-se um valor médio de teor de água de 12,3%, muito próximo do valor de referência,  $H = 12\%$ , tal como esperado, e um valor médio de massa volúmica,  $\rho$ , de  $579 \text{ kg/m}^3$ . Apesar de se ter obtido um teor de água médio próximo do de referência, efetuaram-se os ajustes necessários para a correção da massa volúmica obtida para um valor de teor de água de referência de 12%. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos.

Na Figura 4.9 apresenta-se o histograma de massa volúmica antes da correção para o teor de água de referência, enquanto que a Figura 4.10 apresenta o histograma de massa volúmica depois da correção para um teor de água de 12%.

Tabela 4.2 - Valores de teor de água e de massa volúmica obtidos antes e depois da correção para um teor de água de 12%.

	Teor de água (H)	Massa volúmica ( $\rho$ )	Massa volúmica ( $\rho_{12}$ )
Valor	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Médio ( $\mu$ )	12,3	579	578
Mínimo	9,5	470	470
Máximo	16,0	698	681
Desvio padrão ( $\sigma$ )	1,4	57,4	51,4
Variância ( $\sigma^2$ )	1,9	3292,7	2641,1
C.V (%)	11,5	9,9	8,9

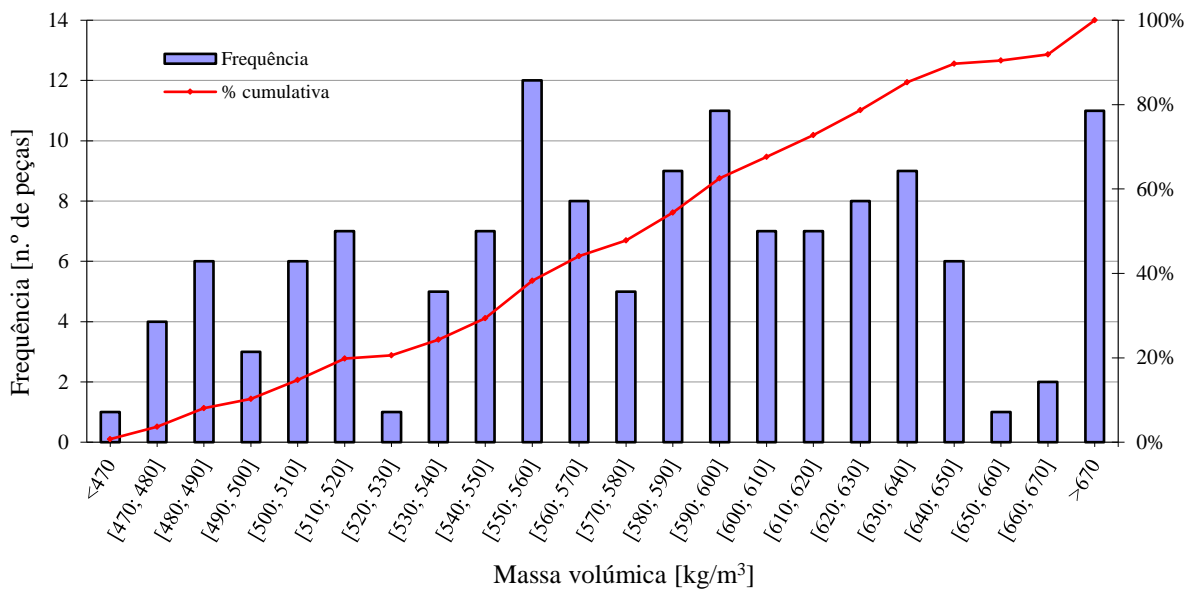


Figura 4.9 – Histograma da massa volúmica "original" dos provetes, sem correção para H = 12%.

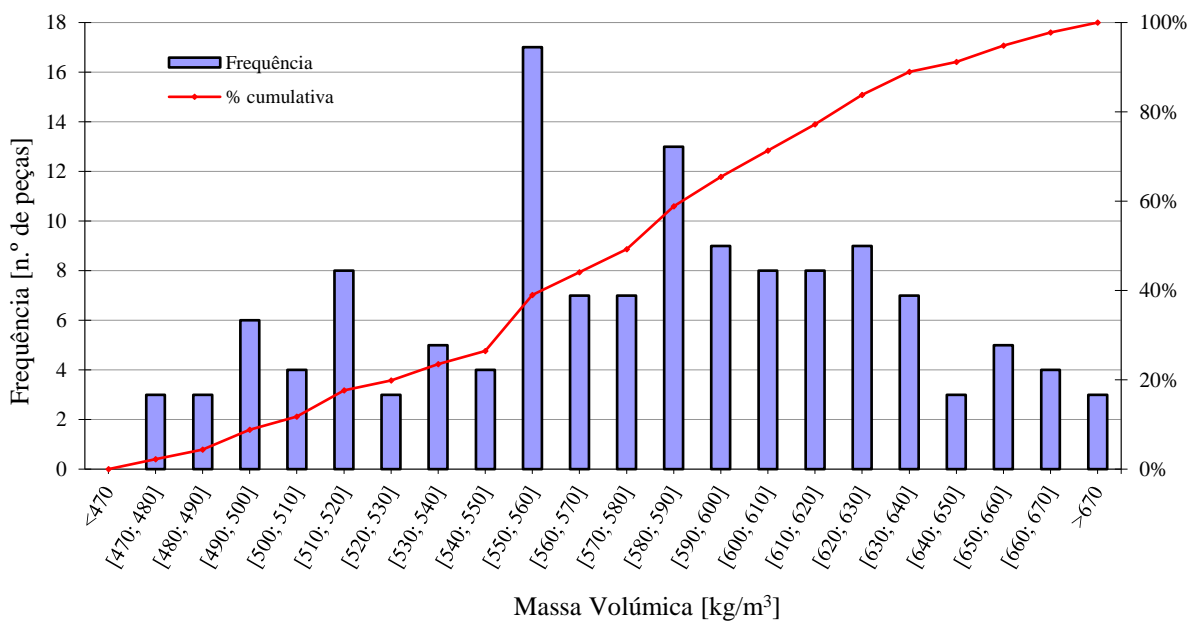


Figura 4.10 – Histograma da massa volúmica dos provetes, com correção para H = 12%.

Tal como se pode inferir através da análise do histograma da Figura 4.10, a maior frequência de peças está no intervalo de massa volúmica entre os 550 kg/m<sup>3</sup> e os 560 kg/m<sup>3</sup>, com um total de 17 peças. De notar ainda que, tal como referido através da Tabela 2.8 do Capítulo 2.3.3., a NP 4305, 1995 propõe um valor médio característico de massa volúmica para madeira de pinho bravo de 580 kg/m<sup>3</sup> para uma classe de qualidade E e um valor de 610 kg/m<sup>3</sup> para uma classe de qualidade EE (NP 4305, 1995). O valor médio corrigido obtido na caracterização das amostras foi de 578 kg/m<sup>3</sup>, muito próximo daquele proposto pelo LNEC para madeira de pinho bravo com classe de qualidade E.

### 4.3.2. Resistência à compressão paralela às fibras

Tal como referido anteriormente, realizaram-se ensaios de compressão paralela à direção das fibras para provetes PA, PN e PS. Foram ensaiados 125 provetes (41 PN, 72 PA e 6 PS).

#### 4.3.2.1. Peças naturais (PN)

Antes de se realizar o ensaio de compressão nas 41 peças com “degradação natural”, efetuou-se a medição das secções transversais de cada provete com recurso a uma craveira. De seguida, calculou-se a área de impacto para cada peça. Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios para as peças naturais (PN).

Tabela 4.3 – Valores de força máxima e resistência à compressão paralela às fibras em peças PN.

	<b>F<sub>máx</sub></b>	<b>f<sub>c0</sub></b>
<b>Valor</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>
<b>Médio (μ)</b>	32,9	27,2
<b>Mínimo</b>	19,5	16,2
<b>Máximo</b>	46,0	38,4
<b>Desvio padrão (σ)</b>	4,91	4,09
<b>C.V (%)</b>	14,9	14,9
<b>Excluídos</b>	-	-

Na Figura 4.11 apresenta-se o histograma da resistência à compressão paralela às fibras,  $f_{c,0}$ , obtida para os provetes com “degradação natural” por caruncho (PN). Tal como se pode observar através da análise do gráfico, os resultados experimentais obtidos ajustam-se à distribuição Normal.

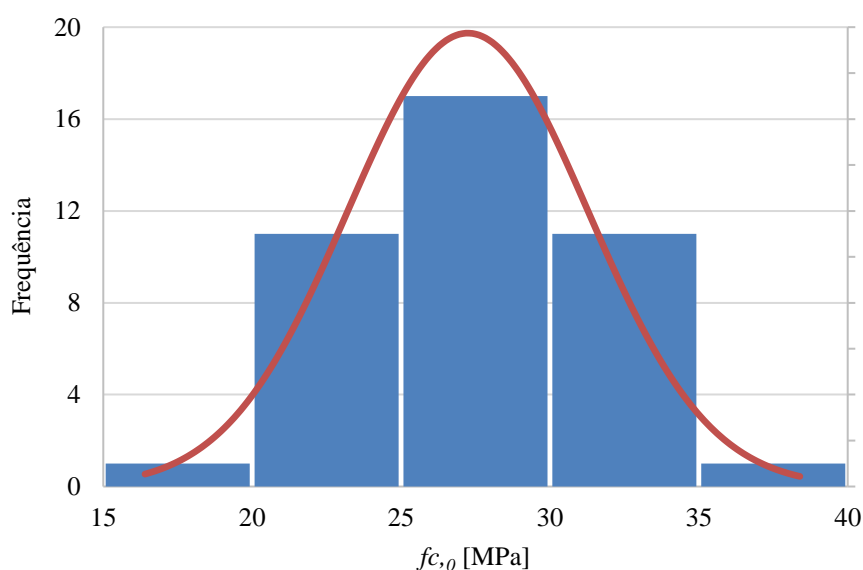


Figura 4.11 – Histograma dos valores obtidos para a resistência à compressão dos PN, com sobreposição da densidade de valores, permitindo uma análise visual da normalidade dos dados.

Em termos numéricos, a qualidade do ajustamento pode ser medida por diversos parâmetros estatísticos, de onde se destaca o teste de Shapiro-Wilk, que permite avaliar a hipótese de uma amostra provir de uma distribuição Normal,  $X \sim N(\mu, \sigma)$ , onde os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  são estimados a partir da própria amostra. Vários autores consideraram o teste de Shapiro-Wilk, aparentemente, como o melhor teste de aderência à normalidade (Cirillo & Ferreira, 2003; Otzuna et al., 2006, Leotti et al., 2005, citados por Lopes, et al., 2013). Estes testes fornecem o parâmetro valor de prova (*p-value* na literatura anglo-saxónica). Quanto mais próximo da unidade se encontrar o *p-value* do teste, melhor a qualidade do ajustamento, sendo a hipótese rejeitada em termos estatísticos quando o *p-value* é inferior a 0,05, uma vez que se assumiu uma confiança de 95% no teste.

Através da realização do teste de Shapiro-Wilk, obteve-se um valor de *p-value* de 0,61. Por este valor ser superior a 0,05, então, não se pode rejeitar a hipótese nula dos resultados provirem de uma distribuição Normal com uma confiança de 95%, o que está de acordo com o gráfico apresentado na Figura 4.11.

#### 4.3.2.2. Peças artificiais e peças sãs (PA e PS)

Tal como para as peças com degradação natural, para as peças com degradação artificial e sãs, também se começou por efetuar a medição das secções transversais de cada provete, com recurso a uma craveira. Para as peças artificiais, procedeu-se, também, à identificação de cada peça, para se ter em conta a percentagem de material perdido, a direção da furação e o padrão utilizado na furação na determinação da resistência à compressão paralela às fibras. Utilizou-se a notação da Tabela 4.4, em que X corresponde ao número da peça com aquelas características. Ensaíram-se 6 peças por cada grupo, pelo que  $X \in \{1,2,3,4,5,6\}$ .

Tabela 4.4 – Notação utilizada na identificação das peças sãs e artificiais.

			<b>Identificação</b>		
Peças Sãs			1.2.X		
Padrão Aleatório			2.2.X		
Peças Artificiais	1 furo/cm <sup>2</sup>	1 direção	Padrão Quincôncio	6.2.X	
			Regular Ortogonal	10.2.X	
		2 direções	Padrão Aleatório		4.2.X
			Padrão Quincôncio	Regular Ortogonal	8.2.X 12.2.X
	2 furo/cm <sup>2</sup>	1 direção	Padrão Aleatório		3.2.X
			Padrão Quincôncio	Regular Ortogonal	7.2.X 11.2.X
		2 direções	Padrão Aleatório		5.2.X
			Padrão Quincôncio	Regular Ortogonal	9.2.X 13.2.X

Os resultados obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.5.

Tendo em conta o padrão de furação, os valores médios obtidos para cada grupo de peças estudado são muito semelhantes. O maior valor médio obtido verificou-se para o conjunto 1.2.X, referente às peças sãs, como era expectável, uma vez que não possuem qualquer tipo de furação (degradação). Os valores médios das peças com padrões aleatório, quincôncio e ortogonal não diferem de forma importante, pelo que nada se pode concluir. O padrão aleatório, na teoria, seria o que deveria apresentar valores mais próximos dos verificados para PN, uma vez que os túneis formados pelos carunchos na madeira possuem direções aleatórias. De facto, verifica-se que os grupos 2.2.X e 3.2.X, ambos com padrões aleatórios, apresentam os valores médios mais próximos daquele determinado para PN, quando comparados com os restantes. No entanto, tal não acontece com o grupo 5.2.X, também ele com um padrão aleatório e com um valor médio superior ao determinado, por exemplo, para o grupo 12.2.X, com um padrão ortogonal.

Os valores obtidos para o coeficiente de variação também não possuem diferenças importantes entre os diferentes padrões estudados. Os menores valores de C.V verificam-se para os grupos de amostras 9.2.X

#### 4. Avaliação das propriedades mecânicas do material

e 13.2.X, o que pode ser justificado pelo facto de apenas 4 amostras por cada um desses grupos terem sido consideradas, uma vez que 2 amostras por cada grupo foram excluídas, devido a erros nos ensaios.

Tabela 4.5 – Valores de resistência obtidos para o ensaio de compressão paralela às fibras em peças PA e PS.

Identificação	Valor médio ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	Coefficiente de Variação (C.V)	Excluídos
	MPa	MPa	%	
1.2.X	47,6	8,9	18,7	1
2.2.X	38,9	7,1	18,3	-
6.2.X	43,7	6,7	15,3	1
10.2.X	43,0	8,0	18,6	-
4.2.X	47,1	11,2	23,8	1
8.2.X	43,5	6,5	14,9	-
12.2.X	43,8	7,5	17,1	-
3.2.X	38,6	6,7	17,4	-
7.2.X	44,6	3,0	6,7	-
11.2.X	38,9	6,7	17,2	1
5.2.X	44,3	6,2	13,9	-
9.2.X	46,0	0,9	2,0	2
13.2.X	39,5	1,2	3,0	2

Devido ao facto de não se terem notado diferenças importantes nos resultados obtidos para os diferentes padrões de furação estudados, bem como para as 2 direções de furação adotadas, considera-se, apenas, daqui para a frente, o fator referente à percentagem de material perdido (1 furo/cm<sup>2</sup>, com 0,7% de material perdido e 2 furos/cm<sup>2</sup>, com 1,4% de material perdido).

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.12.

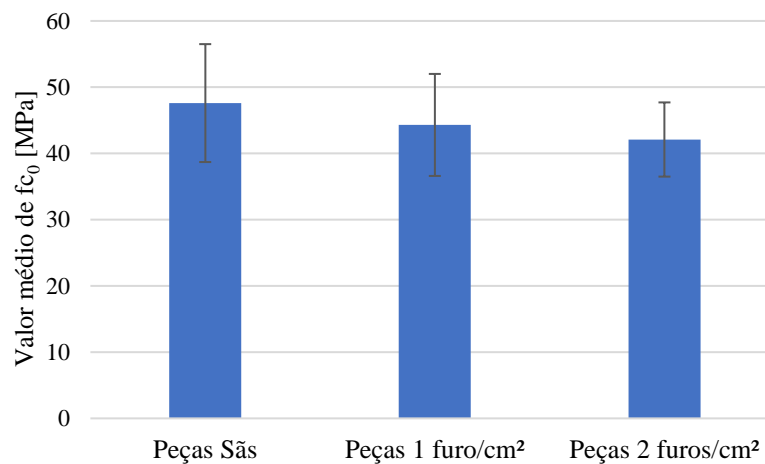


Figura 4.12 – Valores médios e desvios-padrão de resistência paralela às fibras obtidos para peças PS e PA.

Tal como se pode observar através da análise da Figura 4.12 existe, de facto, uma diminuição nos valores médios obtidos para as peças sãs ( $\mu = 47,6$  MPa), quando comparado com aqueles obtidos para as peças com simulação da degradação ( $\mu = 44,3$  MPa para peças com 1 furo/cm<sup>2</sup> (0,7% de material perdido);  $\mu = 42,1$  MPa para peças com 2 furos/cm<sup>2</sup> (1,4% de material perdido)). No entanto, estas diferenças ficaram aquém do que se esperava, uma vez que se obteve um  $\mu = 27,2$  MPa para os provetes degradados por caruncho.

Estabeleceram-se, ainda, correlações entre a massa volúmica “original” (medida antes da furação dos provetes) e a resistência à compressão paralela às fibras, para os provetes PS e PA. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.13 e na Figura 4.14.

A interpretação dos coeficientes de correlação é sempre difícil quando se analisa um material como a madeira, fundamentalmente devido à grande variabilidade existente (Machado & Palma, 2011). Adotou-se a seguinte interpretação para os coeficientes de correlação:  $0,8 \leq r$ , alta correlação;  $0,6 \leq r < 0,8$ , correlação média;  $0,4 \leq r < 0,6$ , correlação baixa;  $0,2 \leq r < 0,4$ , correlação muito baixa;  $0 \leq r < 0,2$ , sem correlação.

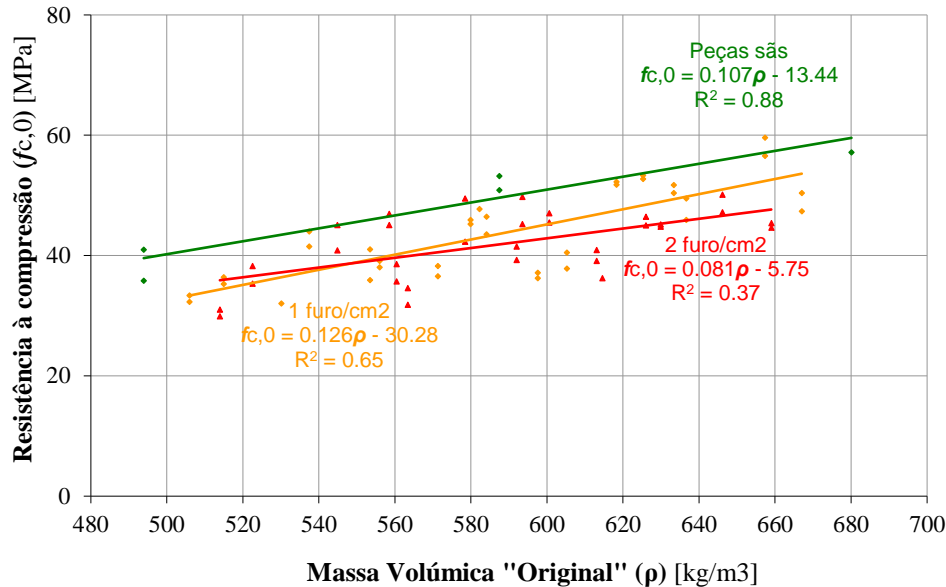


Figura 4.13 – Correlações obtidas entre  $f_{c,0}$  e a massa volúmica para amostras PS e PA com 1 furo/cm<sup>2</sup> e 2 furos/cm<sup>2</sup>.

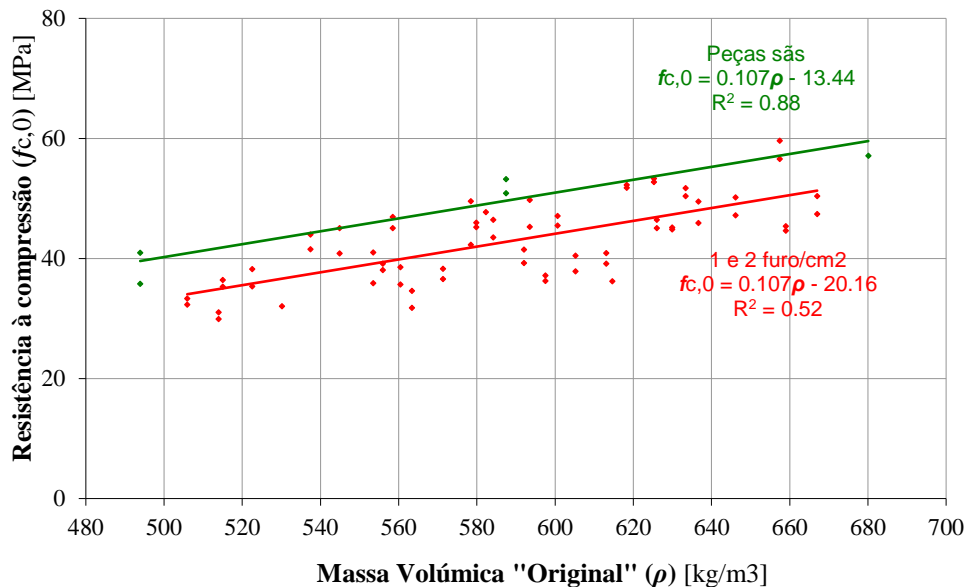


Figura 4.14 – Correlações obtidas entre  $f_{c,0}$  e a massa volúmica para amostras PS e PA.

A Figura 4.13 apresenta as correlações obtidas entre a resistência à compressão paralela às fibras e a massa volúmica, considerando, em separado, as amostras com uma furação de 1 furo/cm<sup>2</sup> e de 2 furos/cm<sup>2</sup>, enquanto que a Figura 14 apresenta as correlações obtidas para as peças sãs e para as peças artificiais no total (1 furo/cm<sup>2</sup> e 2 furos/cm<sup>2</sup>). Através da análise das regressões lineares apresentadas, é possível

identificar o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo estiver da unidade, mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra.

Obteve-se uma correlação alta entre a resistência à compressão e a massa volúmica para as peças sãs ( $r^2 = 0,88$ ), que começa a perder a qualidade à medida que a furação aumenta ( $r^2 = 0,65$  para peças artificiais com 1 furo/cm<sup>2</sup> e  $r^2 = 0,37$  para peças artificiais com 2 furos/cm<sup>2</sup>). Se não se efetuar distinção entre a furação nos provetes, obtém-se um fator de determinação de  $r^2 = 0,52$  para todas as peças artificiais, o que se traduz numa correlação baixa entre a resistência à compressão paralela às fibras e a massa volúmica, para estes provetes.

Cruz & Machado (2013) obtiveram um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,74$  entre a resistência à compressão paralela às fibras para peças com degradação natural e a massa volúmica “original”. Concluíram que, como expectável, para valores de massa volúmica “original” semelhantes, as amostras com maior grau de degradação obtiveram valores de resistência à compressão menores. A mesma conclusão é obtida para este estudo, apesar de se ter obtido um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,52$  para as peças artificiais, valor inferior ao obtido por Cruz & Machado (2013), e que pode ser justificado, mais uma vez, pela dificuldade que existe na simulação da degradação por caruncho.

#### 4.3.2.3. Correlação e comparação de resultados

Na Figura 4.15 apresentam-se os *boxplots* das peças sãs, peças artificiais e peças naturais. As peças sãs apresentam um coeficiente de variação  $C.V = 18,7\%$ , enquanto que as peças artificiais apresentam um  $C.V = 15,5\%$  e as peças naturais um  $C.V = 15,0\%$ . O facto de o coeficiente de variação ser maior para as peças sãs pode ser explicado pelo facto de apenas se ter utilizado 5 amostras de controlo para PS, o que pode não ser representativo o suficiente, devido à variabilidade existente dentro da espécie. Quanto aos coeficientes de variação obtidos para PA e PN, estes apresentam valores idênticos, o que pode ser explicado, mais uma vez, pela dimensão da amostragem, neste caso maior. De notar ainda que o valor máximo de resistência obtido para PA ( $f_{c,0} = 59,6$  MPa) supera o valor máximo de resistência obtido para PS ( $f_{c,0} = 57,1$  MPa), o que pode ser explicado por: haver variabilidade dentro da espécie da madeira (material heterogéneo), o que faz com que um dos provetes, ainda que furado, apresente uma resistência superior a um provete são; o nível de furação não ter sido muito elevado (esta amostra foi sujeita a uma furação de 1 furo/cm<sup>2</sup>, com uma percentagem de material perdido de 0,7%), o que pode não ser suficiente para haver uma diferença efetiva nos valores de resistência obtidos entre PS e PA para todas as amostras consideradas.

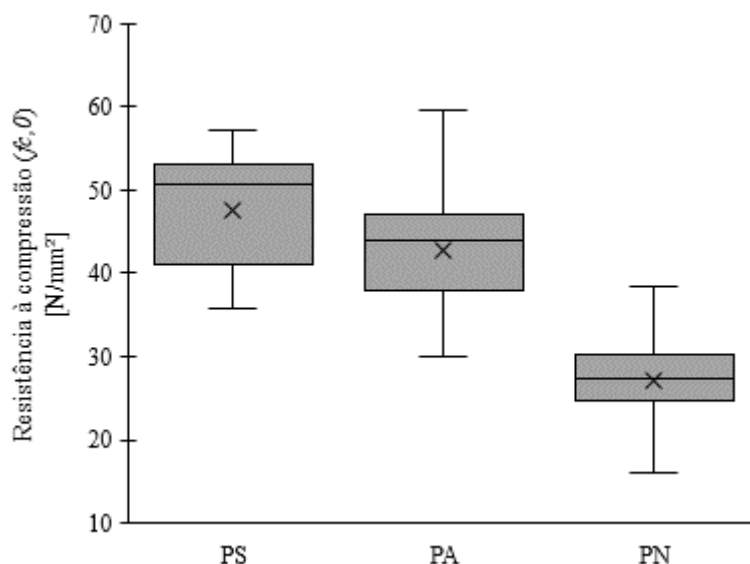


Figura 4.15 – *Boxplots* para PS, PA e PN.

Por fim, pode concluir-se que, apesar de ter havido um decréscimo médio de resistência entre as peças sãs e as peças com 1 furo/cm<sup>2</sup>, e entre estas e as peças com 2 furos/cm<sup>2</sup>, estes valores ainda ficaram muito longe daqueles obtidos para os provetes naturais. Assim, a percentagem de madeira consumida pelos carunchos nas amostras naturais estudadas, tem que ser superior a 1,4%, sendo de extrema importância o

conhecimento desse valor e a definição de classes de degradação, por forma a que se possa concluir sobre a percentagem de madeira consumida pelos carunchos em determinada estrutura e, conseqüentemente, sobre a sua segurança estrutural.

#### 4.3.3. Resistência ao arrancamento perpendicular às fibras

Tal como referido anteriormente, realizaram-se ensaios ao arrancamento perpendicular à direção das fibras para provetes PA, PN e PS. Foram ensaiados 97 provetes (10 PN, 72 PA e 15 PS).

##### 4.3.3.1. Peças naturais (PN)

Ensaíram-se ao arrancamento perpendicular às fibras 10 PN. Efetuou-se uma pré-furação com um diâmetro de 4 mm, fator que não tem influência direta nos resultados obtidos (Gilfillan & Gilbert, 2001). Na Tabela 4.6 apresentam-se os resultados dos ensaios de arrancamento.

Tabela 4.6 – Valores de força máxima e resistência ao arrancamento perpendicular às fibras em peças PN.

Valor	F <sub>máx</sub> kN	f MPa
Médio ( $\mu$ )	2,2	25,4
Mínimo	1,5	17,1
Máximo	2,9	33,1
Desvio padrão ( $\sigma$ )	0,45	5,09
C.V (%)	19,9	19,9
Excluídos	-	-

Tal como para os resultados obtidos para os provetes PN, nos ensaios de compressão, também estes dados se ajustam à distribuição Normal. Obteve-se um *p-value* de 0,484 através da realização do teste de aderência à normalidade de Shapiro-Wilk.

As conclusões obtidas são semelhantes àquelas obtidas para os ensaios de compressão. Os valores de C.V são consideráveis, mas de acordo com os valores normalmente encontrados para este tipo de ensaio (Llana et al., 2018).

##### 4.3.3.2. Peças artificiais e peças sãs (PA e PS)

Para a identificação das amostras utilizadas nos ensaios de arrancamento utilizou-se a notação da Tabela 4.7. Uma vez mais, ensaiaram-se 6 peças por cada grupo, pelo que  $X \in \{1,2,3,4,5,6\}$ .

Tabela 4.7 – Notação utilizada na identificação das peças sãs e artificiais.

			Identificação	
Peças Sãs			1.1.X	
Peças Artificiais				
Peças Artificiais	1 furo/cm <sup>2</sup>	1 direção	Padrão Aleatório	2.1.X
			Padrão	Quincôncio
		Regular	Ortogonal	10.1.X
		2 direções	Padrão Aleatório	4.1.X
			Padrão	Quincôncio
		Regular	Ortogonal	12.1.X
	2 furo/cm <sup>2</sup>	1 direção	Padrão Aleatório	3.1.X
			Padrão	Quincôncio
		Regular	Ortogonal	11.1.X
		2 direções	Padrão Aleatório	5.1.X
			Padrão	Quincôncio
		Regular	Ortogonal	13.1.X

#### 4. Avaliação das propriedades mecânicas do material

Os resultados obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores de resistência ao arrancamento perpendicular às fibras em peças PA e PS.

Identificação	Valor médio ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	Coefficiente de Variação (C.V)	Excluídos
	MPa	MPa	%	
1.1.X	48,6	8,6	17,7	2
2.1.X	40,7	9,1	22,4	-
6.1.X	36,4	4,8	13,2	-
10.1.X	37,6	5,7	15,2	-
4.1.X	42,0	8,3	19,8	-
8.1.X	40,4	5,1	12,6	-
12.1.X	38,7	2,4	6,2	1
3.1.X	36,3	5,1	14,0	-
7.1.X	37,9	5,1	13,5	-
11.1.X	39,5	6,3	15,9	-
5.1.X	39,8	9,8	24,6	-
9.1.X	35,4	5,9	16,7	-
13.1.X	38,8	1,8	4,6	1

Tal como aconteceu para os resultados obtidos para os ensaios de compressão, os valores médios obtidos para cada grupo de peças estudados não apresentaram diferenças importantes, quando se tem em conta o padrão ou a direção de furação. O maior valor médio obtido verificou-se para o grupo das peças sãs. De notar que, para este mesmo grupo, obteve-se um coeficiente de variação  $C.V = 17,7\%$ , 1% abaixo do verificado para o grupo de controlo nos ensaios de compressão. Isto pode ser justificado pelo facto de a amostragem neste grupo para os ensaios de arrancamento ser maior (15 provetes, quando para a compressão tinham-se apenas 5).

Optou por se considerar, daqui para a frente, apenas a percentagem de material perdido, tal como se fez na análise dos resultados dos ensaios de compressão. No que diz respeito a estes valores (Figura 4.16), existe, de facto, um decréscimo de resistência ao arrancamento, com o aumento da percentagem de material perdido.

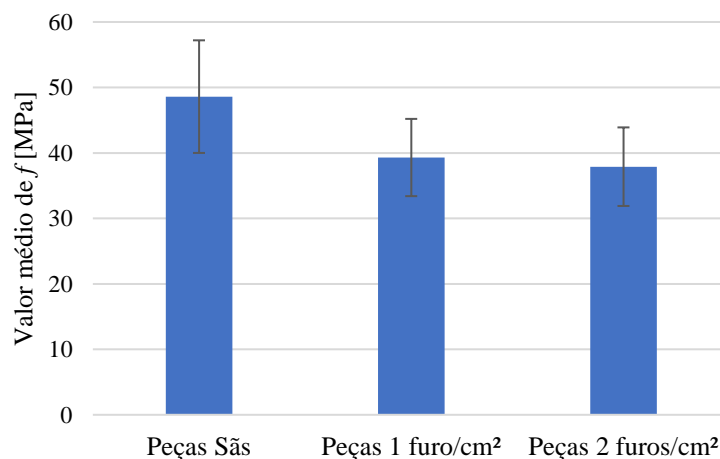


Figura 4.16 – Valores médios e desvios-padrão de arrancamento perpendicular às fibras obtidos para peças PS e PA.

Tem-se um valor médio  $\mu = 48,6$  MPa para as peças sãs, seguido de um valor médio  $\mu = 39,3$  MPa para as peças com uma percentagem de material perdido de 0,7 e, finalmente, um valor médio de  $\mu = 37,9$  MPa para as peças com 1,4% de material perdido. Note-se que a diferença entre os valores médios obtidos

para as peças com 1 furo/cm<sup>2</sup> e para as peças com 2 furos/cm<sup>2</sup> é muito pequena, apenas 1,4 MPa, com um aumento de 0,7% de material perdido. Estes resultados ficaram, tal como tinha acontecido para os resultados dos ensaios de compressão, longe dos esperados ( $\mu = 25,4$  MPa para PN).

O Eurocódigo 5 (2004) propõe um valor de resistência característica ao arrancamento a um ângulo de 90° com as fibras dado pela equação 4.5, onde  $\rho_k$  representa a massa volúmica característica.

$$f_{ax,90,k} = 0,52 \times d^{-0,5} \times l_{ef}^{-0,1} \times \rho_k^{0,8} \quad (4.5)$$

em que  $d$  corresponde ao diâmetro exterior do parafuso (mm),  $l_{ef}$  ao comprimento de penetração do parafuso na madeira (mm) e  $\rho_k$  à massa volúmica característica (kg/m<sup>3</sup>).

Estabeleceram-se correlações, tal como para os resultados dos ensaios à compressão, entre a massa volúmica “original” e a resistência ao arrancamento perpendicular às fibras, para os provetes PS e PA. Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 4.17 e 4.18.

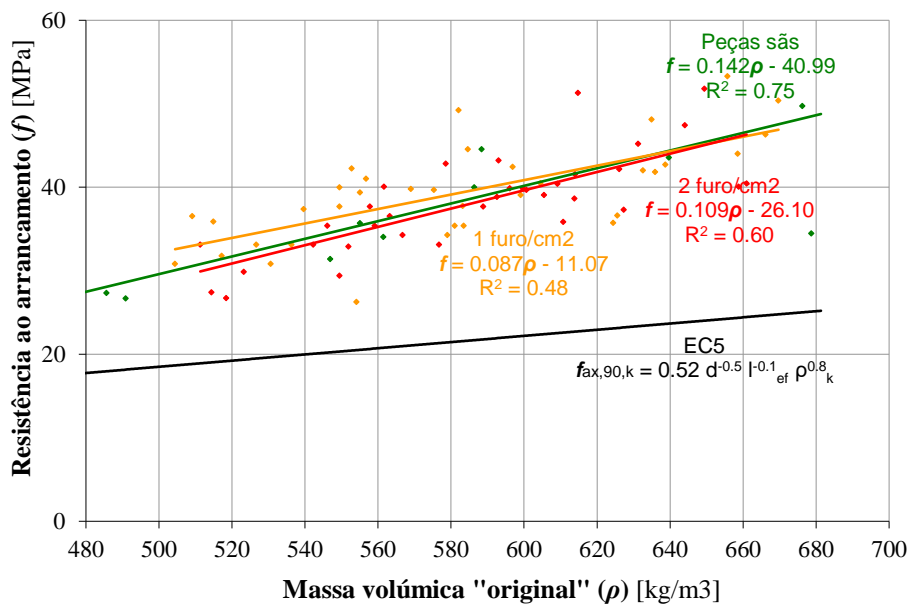


Figura 4.17 – Correlações obtidas entre  $f$  e a massa volúmica para amostras PS e PA com 1 furo/cm<sup>2</sup> e 2 furos/cm<sup>2</sup>.

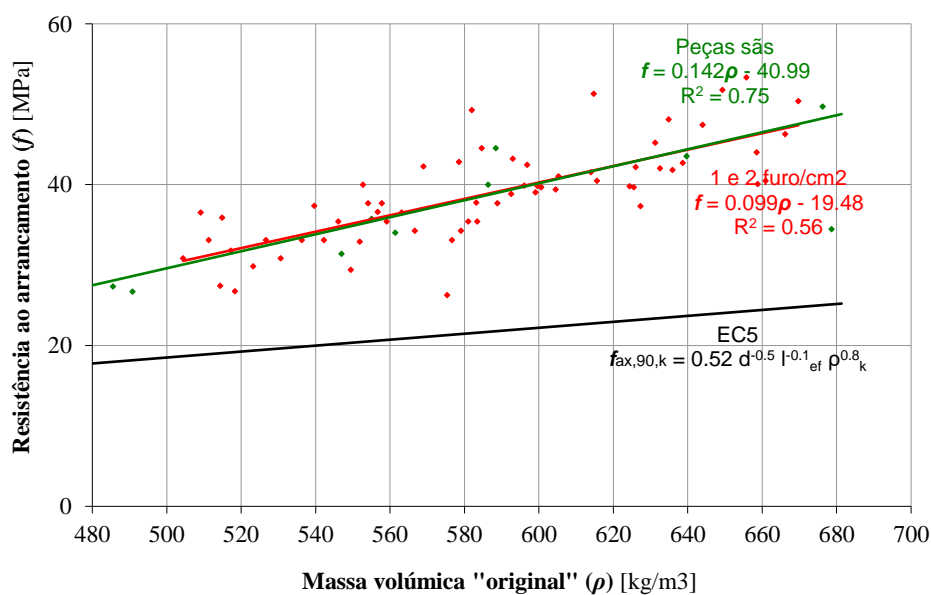


Figura 4.18 – Correlações obtidas entre  $f$  e a massa volúmica para amostras PS e PA.

Obteve-se uma correlação média entre a resistência ao arrancamento e a massa volúmica para as peças sãs ( $r^2 = 0,75$ ) e uma correlação baixa para as peças com 1 e 2 furos/cm<sup>2</sup> ( $r^2 = 0,56$ ). Todos os provetes analisados (PS e PA) cumprem a segurança de acordo com o EC5 (2004). No entanto, já vimos anteriormente que os resultados obtidos, quer para a compressão, quer para o arrancamento, para os provetes PA, ainda ficaram distantes daqueles obtidos para os provetes PN, pelo que interessa verificar se a segurança estrutural continua a ser verificada quando analisados estes provetes, com degradação “natural”.

De referir, ainda, um estudo elaborado por Maldonado et. al. (2007) que propõe uma fórmula para o cálculo da resistência ao arrancamento perpendicular às fibras (Equação 4.6), para peças sãs da espécie *Pinus pinaster* Ait., em função da massa volúmica.

$$f = 0,1139 \times \rho - 33,033 \quad (4.6)$$

A Figura 4.19 apresenta as correlações obtidas entre a resistência ao arrancamento e a massa volúmica original para as amostras sãs e artificiais, com referência às fórmulas propostas pelo EC5 (2004) e por Maldonado et al. (2007).

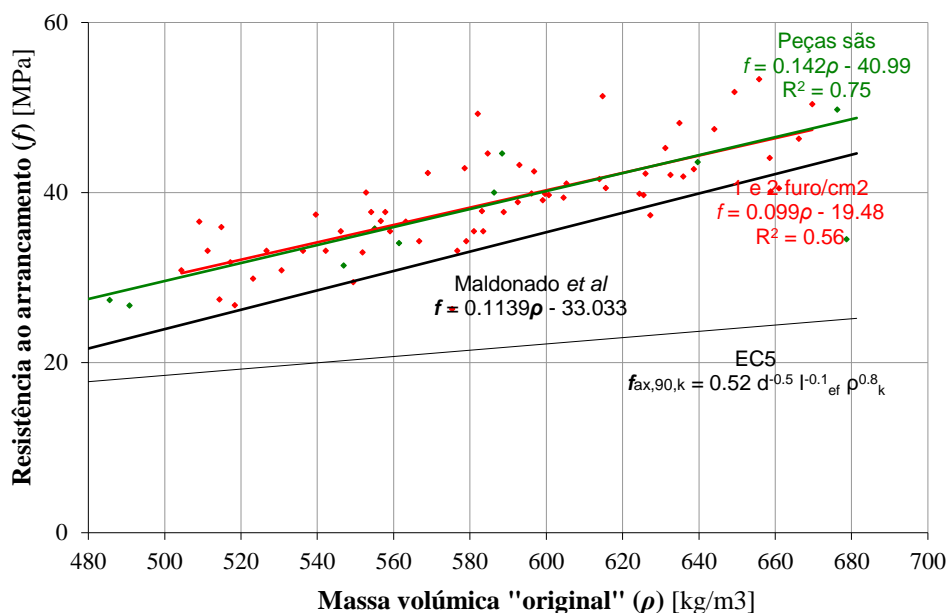


Figura 4.19 – Correlações obtidas entre  $f$  e a massa volúmica para amostras PS e PA, com referência a correlação proposta por Maldonado et. al. (2007).

#### 4.3.3.3. Correlação e comparação de resultados

Na Figura 4.20, apresentam-se os *boxplots* das peças sãs, peças artificiais e peças naturais. As peças sãs apresentam um coeficiente de variação,  $C.V = 17,7\%$ , enquanto as peças artificiais apresentam um  $C.V = 15,4\%$  e as peças naturais um  $C.V = 18,8\%$ . O facto de o coeficiente de variação obtido para PN ser superior ao obtido tanto para PS como para PA, pode ser explicado pelo facto de a amostragem deste grupo ter sido menor, com apenas 10 amostras.

A diferença no nível de resistência ao arrancamento obtido para PN e para PA, com uma diferença considerável, vem confirmar, mais uma vez, o facto de a simulação da degradação nos provetes PA não ter sido bem conseguida. Os provetes PN apresentam, de facto, um nível de degradação maior que o simulado. No entanto, e como os níveis de degradação nas estruturas de madeira podem variar, não é possível obter uma estimativa correta da percentagem de material perdido em determinado elemento de madeira.

Os resultados obtidos através da equação proposta por Maldonado et. al. (2007) estão bastante próximos daqueles obtidos neste trabalho experimental, sendo, no entanto, ligeiramente inferiores. Este dado pode ser justificado pelo facto de a madeira analisada no estudo ter uma média de valores de massa volúmica de  $500 \text{ kg/m}^3$ , valor inferior ao valor médio de massa volúmica das amostras deste estudo,  $577,6 \text{ kg/m}^3$ .

No fim, tal como para os resultados obtidos para os ensaios à compressão paralela às fibras, apesar de se ter verificado um decréscimo nos valores de resistência entre PS e PA, e entre estes e PN, os valores obtidos para PA ficaram aquém do que era esperado, ainda longe dos valores médios obtidos para PN.

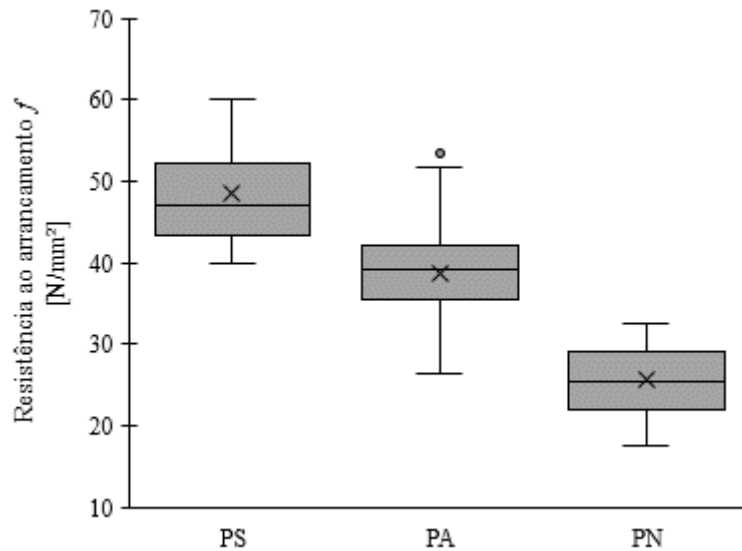


Figura 4.20 – *Boxplots* para PS, PA e PN.

#### 4.4. Síntese final

O presente capítulo teve como objetivo principal a avaliação do impacto da degradação devido à ação de caruncho pequeno nas propriedades mecânicas de estruturas de madeira antigas. Para tal, ensaiaram-se 216 amostras à compressão paralela às fibras e ao arrancamento perpendicular às fibras. A massa volúmica dos provetes PN é desconhecida, pois não se conhece a percentagem de madeira consumida pelos carunchos. Para os provetes PS, admitiu-se 0,7% e 1,4% de material perdido. Correlacionaram-se os resultados obtidos para os ensaios de compressão e de arrancamento, com a massa volúmica, para os provetes PA.

As principais conclusões que se retiram deste estudo são:

- Os padrões de simulação e o facto de se terem utilizado 2 direções de furação, não tiveram influência direta nos resultados quer dos ensaios à compressão, quer ao arrancamento.
- Existe um decréscimo na resistência, quer à compressão, quer ao arrancamento, quando se comparam os provetes PS com os PA com 1 furo/cm<sup>2</sup>, e quando se comparam estes com os PA com 2 furos/cm<sup>2</sup>. No entanto, estes valores ainda se apresentam distantes dos obtidos para os PN, pelo que a percentagem de material perdido nos PN é maior.
- O facto de não se ter conseguido uma simulação da degradação por caruncho indica que a intensidade de degradação de um dado elemento de madeira não deve ser generalizada a partir da degradação superficial que este apresenta. A intensidade das galerias no interior da madeira tende a ser muito maior, do que aquela que existe à superfície.
- Existe uma relação inversa entre a intensidade de degradação e as resistências ao arrancamento e à compressão.
- Obtiveram-se boas correlações entre os valores de resistência ao arrancamento e à compressão e a massa volúmica para os provetes PA.
- Os resultados obtidos sugerem que, apesar de uma estrutura apresentar um elevado nível de degradação por carunchos, a massa volúmica continua a ser um fator da maior importância na avaliação da segurança estrutural, sendo, por isso, muito importante a sua determinação.



## 5. ANÁLISE QUANTITATIVA DE MADEIRA DEGRADADA POR CARUNCHO

### 5.1. Considerações gerais

No Capítulo anterior, referente à avaliação das propriedades mecânicas do material, concluiu-se que não se conseguiu simular a degradação na madeira por ação de caruncho pequeno, uma vez que os resultados dos ensaios mecânicos realizados a provetes degradados artificialmente distanciaram-se aos obtidos com provetes de madeira degradada de “forma natural”. Concluiu-se, também, fruto da discrepância obtida nos resultados, que a percentagem de material perdido, para o nível de degradação analisado, tem que ser superior a 1,4, uma vez que foi esse o valor máximo considerado na degradação artificial.

De facto, o conhecimento do volume de madeira consumido e, posteriormente, a massa volúmica do material, são fatores de extrema importância para que se conheça o nível de degradação da estrutura e, consequentemente, se possa aferir se a segurança estrutural está ou não garantida.

Alguns estudos têm sido realizados (Gilfillan & Gilbert, 2001; Cruz & Machado, 2013; Mendes et. al., 2018) no sentido de se chegar a um valor de massa volúmica residual da madeira, por forma a relacionar a perda de material devida à ação de caruncho com a respetiva perda de propriedades mecânicas. No entanto, os estudos não têm sido conclusivos, na medida em que não se encontra uma relação clara entre os valores de massa volúmica obtidos e as propriedades mecânicas do material.

Os estudos realizados por Gilfillan & Gilbert (2001) e por Cruz & Machado (2013) procuram generalizar a degradação da madeira no interior do elemento com base na avaliação da área visível dos orifícios de saída, enquanto que o estudo realizado por Mendes et. al. (2018) procura a obtenção da massa volúmica residual da madeira emergindo o provete em água para que se conheça o volume de vazios e, posteriormente, a massa volúmica residual da madeira. Se para os primeiros estudos se concluiu não haver uma relação clara entre a área dos orifícios de saída expostos à superfície do elemento e as respetivas propriedades mecânicas, para o estudo realizado por Mendes et al. (2018) surgem várias questões, tais como o facto de a madeira ser um material fortemente higroscópico e, apesar de poder ser aspirada, ser praticamente impossível retirar toda a quantidade de serrim que se encontra compactado no interior das galerias.

Por isso, e na sequência tanto do estudo realizado no Capítulo 4, como daqueles realizados anteriormente, optou-se pela determinação da percentagem de material perdido e, posteriormente, da massa volúmica residual do material com recurso à técnica de micro tomografia computadorizada (micro-CT).

O objetivo final desta abordagem é o de se contribuir para o desenvolvimento de um modelo, com base em elementos de madeira degradados, que seja representativo do nível de degradação existente num determinado elemento estrutural. Com base neste modelo, será possível, através de ensaios *in situ* (p ex. ensaio de arrancamento) realizados na estrutura degradada, concluir sobre o seu estado de degradação e, consequentemente, sobre a resistência residual existente.

Para se responder a este objetivo, realizaram-se 18 aquisições (em 18 provetes) recorrendo-se à técnica de micro-CT para a determinação da percentagem de material perdido. Um objetivo secundário deste capítulo será o de melhorar a eficiência da micro-CT aplicada ao estudo da madeira ao se descrever e se apresentar os vários passos tomados durante o estudo.

A aquisição de imagens com recurso a micro-CT foi realizada no Laboratório de Mineralogia e Petrologia (LAMPIST) do Instituto Superior Técnico (IST).

Neste capítulo descreve-se o processo de preparação das amostras e todo o processo inerente à micro-CT (desde a aquisição das imagens até à apresentação e discussão de resultados). No fim conclui-se sobre os resultados obtidos e reflete-se sobre a aplicação da técnica.

### 5.2. Princípios de micro tomografia computadorizada

A técnica de micro tomografia computadorizada (micro-CT) é uma metodologia não destrutiva que tem vindo a ter uma utilização crescente no estudo dos materiais e que possibilita o estudo da sua microestrutura interna (Rozenbaum et. al., 2016). Esta técnica permite efetuar estudos de microscopia a nível qualitativo e quantitativo através de uma representação tridimensional (3D) de objetos que não sejam opacos aos raios-X, como é o caso da madeira (Maurício et. al., 2012). Utiliza os mesmos princípios que a tomografia computadorizada (CT), muito utilizada e com bastantes estudos realizados na área da saúde, nomeadamente para se examinar os órgãos e ossos de doentes (Baird & Taylor, 2017). A única diferença entre micro-CT e CT prende-se com o facto de em micro-CT ser possível uma análise mais detalhada, à escala microscópica, do material em estudo. Se, por um lado, a resolução utilizada em micro-CT permite

essa análise e quantificação mais detalhadas, por outro, e para o caso em estudo, pode provocar problemas relacionados com representatividade dos resultados e efeito de escala, que serão minimizados, tanto quanto possível, através da aquisição de um maior número de amostras.

O uso de micro-CT tem vindo a aumentar nos últimos anos para o estudo de diferentes materiais onde se pretende uma análise não destrutiva. No caso da madeira, vários estudos têm sido realizados recentemente. Fuchs et al. (2004); Himmi et al. (2014) e Kigawa et al. (2009) utilizaram a micro-CT para detetar danos de térmitas ou carunchos na madeira, enquanto que Charles et al. (2018) recorreram à micro-CT para quantificar a percentagem de madeira consumida por xilófagos marinhos.

No presente estudo utilizou-se um scanner micro-CT (Skyscan 1172 – 1.3 Mpix, 2007, Bélgica) (Figura 5.1). Para o tratamento dos resultados (fases correspondentes à reconstrução, tratamento de imagens e análise de resultados) utilizou-se o seguinte software de análise e tratamento de dados:

- 32NRecon (programa de reconstrução);
- CTvox (programa de visualização);
- CTAn (programa de tratamento de imagem e de cálculo);
- Imagej (programa de tratamento de imagem e de cálculo).



Figura 5.1 – Scanner micro-CT Skyscan 1172 - 1.3 Mpix utilizado para a aquisição das imagens.

A metodologia inicia-se com a fase correspondente à aquisição das imagens que é realizada através da captação de radiografias do provete enquanto este roda em torno de um eixo vertical fixo. O tempo necessário de aquisição de todas as radiografias para um dado provete, o número de radiografias obtidas e a resolução máxima utilizada irão influenciar, naturalmente, a qualidade final das imagens. Deve, por isso, definir-se desde o início quais os parâmetros que se esperam e aquilo que se pretende ver. Assim, e na fase de aquisição, alguns parâmetros podem e devem ser regulados de modo a que se obtenha o melhor output possível. Regula-se a intensidade de corrente e a voltagem, mantendo-se a potência no seu valor máximo de 10W, decidindo-se sobre a utilização ou não de filtros (Maurício et al., 2012).

As radiografias obtidas irão corresponder, de acordo com a Lei de Lambert-Beer, à projeção 2D do efeito combinado da absorção da radiação X, em função da distribuição 3D dos coeficientes de atenuação dos raios X ao longo do seu trajeto retilíneo (Maurício et. al., 2012). O total da soma dos coeficientes de atenuação dos raios X que passam pelo objeto é dado através da equação 5.1 em que  $I$  representa a intensidade dos raios X que já passaram o objeto,  $I_0$  a intensidade inicial do feixe e  $\mu$  o coeficiente de atenuação linear do material (equação 5.2) (Rajczakowska et. al., 2015).

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (5.1)$$

$$\mu = \sum f_i \mu_i \rho_i \quad (5.2)$$

Na equação 5.2,  $i$  corresponde a um qualquer elemento atómico,  $\rho_i$  corresponde à massa volúmica do material,  $f_i$  corresponde à massa atómica e  $\mu_i$  representa o coeficiente de atenuação de massa do feixe energético (Rajczakowska et. al., 2015 citando Stock, 2009).

Depois de derivar 5.1 obtém-se a equação 5.3, que dá a taxa de atenuação em função da distância.

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (5.3)$$

No caso de materiais heterogéneos, como a madeira, o coeficiente de atenuação  $\mu$  varia com a distância pelo que se utiliza a equação 5.4 para o cálculo da intensidade (Rajczakowska et. al., 2015 citando Stock, 2009).

$$I(x) = I_0 e^{(-\int \mu dx)} \quad (5.4)$$

A metodologia utilizada desde a fase de aquisição até à obtenção dos resultados finais compreende um conjunto de passos intermédios para que, no fim, os resultados finais estejam tanto quanto possível mais próximos dos “resultados reais”. Isto acontece porque as imagens provenientes da fase de aquisição, apesar de possuírem uma resolução suficiente para mostrarem todos os pormenores de interesse, possuem, também, ruído e artefactos, que são impossíveis de eliminar por completo. Tentar-se-á, então, com recurso a programas de tratamento de imagem, eliminar o máximo que se consiga de ruído, mantendo-se a informação morfológica e estrutural.

Assim, a metodologia utilizada é a seguinte:

- 1) seleção da amostra – ter em atenção fatores como a representatividade e as dimensões das amostras a analisar;
- 2) preparação da amostra – quase inexistente;
- 3) aquisição da informação – através da realização de várias radiografias à amostra;
- 4) filtragem da imagem – eliminação do máximo de ruído criado durante o processo de aquisição e que condiciona os resultados finais;
- 5) reconstrução – objeto fica definido por um conjunto de “fatias”
- 6) segmentação e análise – transformação das imagens originais, depois de terem sido reconstruídas, em imagens binárias válidas, com a definição de um algoritmo válido para cada nível de degradação considerado;
- 7) definição da ROI (região de interesse) para cada imagem, sendo que a interpolação entre as diferentes ROI's cria o volume total de interesse (VOI);
- 8) cálculo dos parâmetros de interesse;
- 9) análise e tratamento dos resultados obtidos;
- 10) construção de modelos 3D dos VOI para visualização;
- 11) correlação dos resultados.

### 5.3. Materiais e métodos

Nesta secção começa por se descrever a preparação das amostras para o processo de aquisição de imagens. Depois, mencionam-se todos os processos inerentes à metodologia utilizada para a micro-CT.

#### 5.3.1. Preparação das amostras

A madeira utilizada no estudo proveio da demolição das asnas de suporte de uma cobertura de um edifício da metade do século XX, em Lisboa. Esta madeira apresentava um nível de degradação por caruncho pequeno superior àquela utilizada anteriormente, no estudo do Capítulo 4. A degradação devia-se, essencialmente, a insetos da família Anobiidae (Figura 5.2).

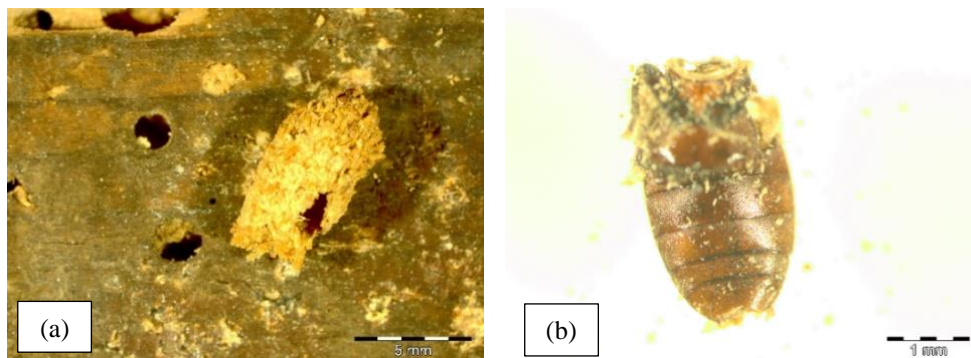


Figura 5.2 – Processo de identificação da espécie atacante: (a) pupa; (b) inseto da família Anobiidae.

A peça de madeira (Figura 5.3) foi, posteriormente, dividida em 4 fatias (3 fatias com degradação e o cerne). O cerne não se encontrava atacado uma vez que esta família de insetos, de maneira geral, ataca somente o borne (EN 350, 2016). Por isso, não se considerou qualquer amostra retirada do cerne para a avaliação em micro-CT.



Figura 5.3 – Peça de madeira utilizada no estudo de micro-CT.

Posteriormente, a peça foi cortada nas Oficinas de Carpintaria e de Mecânica do LNEC. Obtiveram-se 18 amostras, de dimensões médias de  $40 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$ . Essas 18 amostras foram novamente cortadas, tendo-se obtido 18 amostras de dimensões médias de  $40 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$  (Figura 5.4). Estas últimas foram submetidas à micro-CT e são representativas dos diferentes “níveis de degradação” ao longo da peça. Cada uma destas amostras ficou corretamente identificada para que depois possa ser associada ao provete de onde proveio, que será ensaiado mecanicamente. Não foi necessário qualquer tratamento prévio às amostras antes de serem submetidas ao processo de aquisição, uma vez que esta técnica não destrutiva requer muito pouco ou quase nenhuma preparação prévia das amostras (Campbell & Sophocleous, 2014).

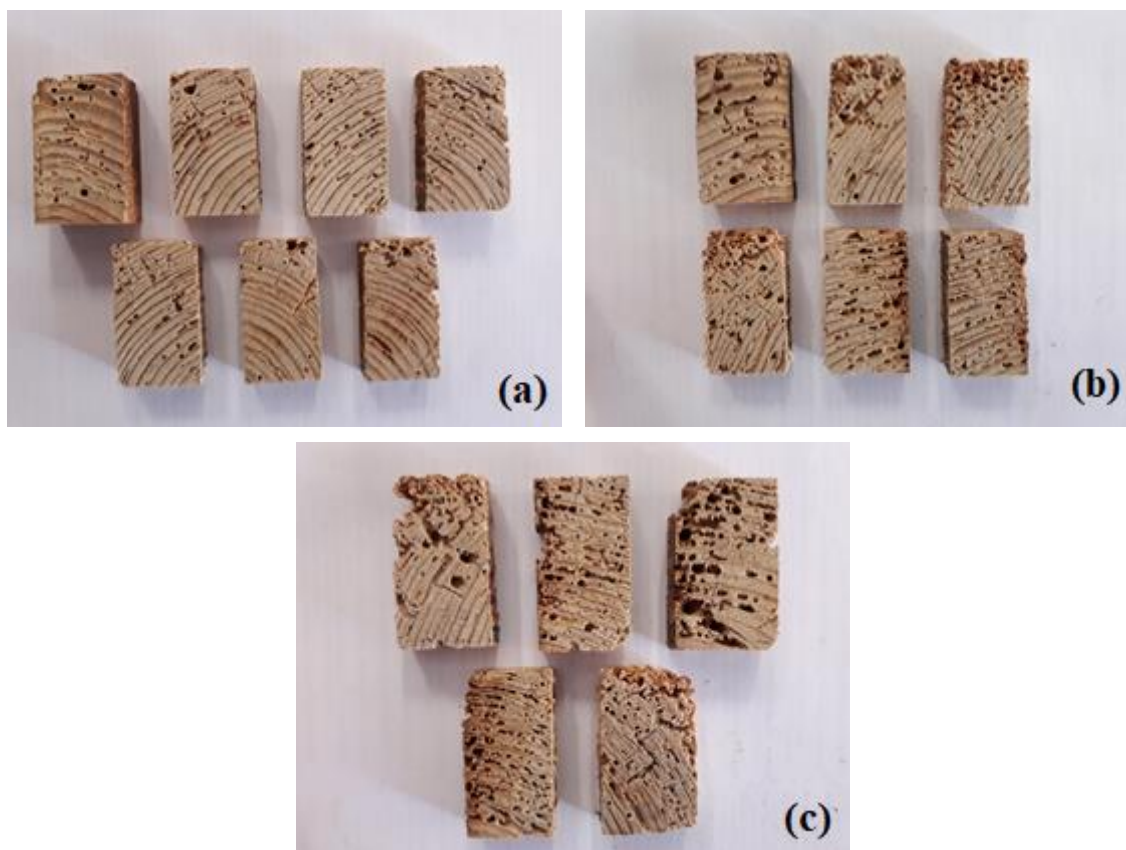


Figura 5.4 – Amostras de madeira degradada submetidas à micro-CT distribuídas por “níveis de degradação”: (a) nível 1; (b) nível 2; (c) nível 3.

As amostras foram, conseqüentemente, distribuídas por 3 níveis de degradação através de uma análise visual (Figura 5.4), sendo que o nível 1 corresponde ao nível de degradação mais baixo e o nível 3 ao nível de degradação mais alto. De notar que, como esta distribuição foi feita apenas com base numa apreciação visual do nível de degradação das amostras, não quer dizer que determinada amostra não esteja mais degradada do que aparenta ou o contrário. Depois de determinados os parâmetros de interesse, existe a necessidade de reajustamento destes níveis.

O nível 1 de degradação ficou com 7 amostras, o nível 2 com 6 amostras e o nível 3 com 5 amostras. As amostras foram condicionadas durante 2 semanas em câmara climática a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ , de acordo com a EN 408 (2010), para estabilizarem antes do processo de aquisição.

### 5.3.2. Processo de aquisição

O processo de aquisição das radiografias é o primeiro passo, propriamente dito, da técnica de micro-CT. A amostra deve ser colocada num suporte fixo e permanecer estática durante todo o processo, enquanto que roda em torno de um eixo vertical fixo (Maurício et. al., 2010).

Existem um conjunto de parâmetros cuja definição prévia afeta de forma substancial a qualidade das imagens, tais como a resolução, a voltagem, o tempo de aquisição, o número de imagens adquiridas, o ângulo de rotação, entre outros.

O primeiro fator que irá influenciar fortemente a qualidade das imagens é a seleção da resolução que irá ser utilizada na aquisição. Recomenda-se uma resolução 1000 vezes menor que a largura da amostra (du Plessis et. al., 2017). No entanto, é possível utilizar-se medidas standard, definidas pela empresa responsável pelo equipamento, para cada tipo de material estudado, sendo que não existe, até ao momento, medidas standard globalmente aceites para cada tipo de material.

A voltagem definida para a fonte emissora de raios-X é altamente dependente do tipo de material e da sua composição. Para amostras de origem biológica recomenda-se uma voltagem definida num intervalo entre 30 e 100 kV (du Plessis et. al., 2017).

No que diz respeito ao tempo de aquisição, este pode variar de equipamento para equipamento, por exemplo devido à sensibilidade do detetor ou à distância existente entre a fonte emissora de raios-X e o detetor (du Plessis et al., 2017 citando Singhal et al., 2013), enquanto o número de imagens adquiridas varia com o tamanho da amostra. Uma amostra maior requererá um maior número de imagens adquiridas, tal como expectável.

Assim, a melhor solução de algoritmo de aquisição deverá ser encontrada tendo sempre em conta os parâmetros de output que se pretendem e o tipo de material em estudo.

Os parâmetros definidos para o processo de aquisição para as 18 amostras de madeira estudadas foram sempre os mesmos e encontram-se descritos na Tabela 5.1. Para além destes parâmetros, referir, também, que a distância entre a fonte emissora de raios-X e a amostra e entre a fonte emissora de raios-X e o detetor foi 257 e 350 mm, respetivamente, com um tempo de aquisição de 1,5h.

Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros definidos para o processo de aquisição

Parâmetros			
<b>Resolução máxima</b>	2 $\mu\text{m}$	<b>Voltagem</b>	60 kV
<b>Intensidade corrente</b>	165 $\mu\text{A}$	<b>Número de Imagens</b>	288
<b>Ângulo de rotação</b>	0.7°	<b>Filtros</b>	Al 0.5 mm
<b>Tamanho Voxel</b>	18.09 $\mu\text{m}$	<b>Tamanho do ficheiro</b>	16-bit

De notar, ainda, que uma redução do ângulo de rotação, bem como um aumento do número de radiografias, irá, naturalmente, levar à produção de imagens com melhor qualidade. No entanto, o nível de benefício pode não ser justificativo do facto de tal opção também contribuir para o aumento do tempo de aquisição, tempo de reconstrução e tamanho dos ficheiros.

### 5.3.3. Reconstrução

O processo de reconstrução sucede o de aquisição das imagens (radiografias) em formato 2D, e tem como principal objetivo a construção de um objeto 3D. Para esse efeito, utiliza-se o *software* de reconstrução NRecon, fornecido pela empresa Bruker.

O processo de reconstrução envolve um conjunto de *settings* cuja definição vai condicionar a qualidade do objeto 3D obtido. O *software* NRecon permite o ajustamento de três parâmetros de reconstrução: *smoothing*, *beam-hardening factor correction* e *ring artefact reduction*. Este ajustamento irá condicionar, naturalmente, a qualidade final do objeto 3D que se venha a obter. No entanto, não existem parâmetros de ajustamento ótimos generalizados, sendo que a melhor solução possível para cada estudo realizado varia tanto com o tipo de scanner utilizado, como com o tipo de material estudado. Para além destes parâmetros, é também possível escolher-se o tipo de ficheiro de output que se pretende, podendo tratar-se de um ficheiro de 16 bits ou de 32 bits. As duas opções são válidas sendo que, naturalmente, imagens exportadas num ficheiro de 32 bits possuirão melhor qualidade.

Para além destes parâmetros, deve, também, selecionar-se a área a ser reconstruída. Esta área deve corresponder à área de interesse (parâmetro que deve ser pensado anteriormente). Áreas que não sejam de interesse não devem ser reconstruídas, pois irão contribuir para o aumento do tamanho dos ficheiros de output e do tempo do processo de reconstrução. No entanto, deve ser dada uma ligeira folga em relação à área total de interesse para que toda a informação relevante seja recolhida e não haja informação importante perdida.

Neste estudo, adotaram-se os parâmetros de reconstrução base definidos na Tabela 5.2 para todas as amostras em estudo e escolheu-se exportar a informação em ficheiros de 32 bits.

Tabela 5.2 – Parâmetros de reconstrução base adotados utilizando o software NRecon.

Parâmetro	Descrição	Setting sugerido
Smoothing	Suaviza as imagens e remove ruído	Width; 3 pixels
Beam-hardening factor correction	Corrige a absorção de raios-X de baixa energia no exterior da amostra	30-55%
Ring artefact reduction	Corrige o comportamento não linear de pixels que causam artefactos de anel	≈ 20

Depois de o conjunto de imagens 2D ter sido reconstruído para obtenção de um objeto 3D, é possível a sua visualização com recurso ao programa CTVox (Figura 5.5).

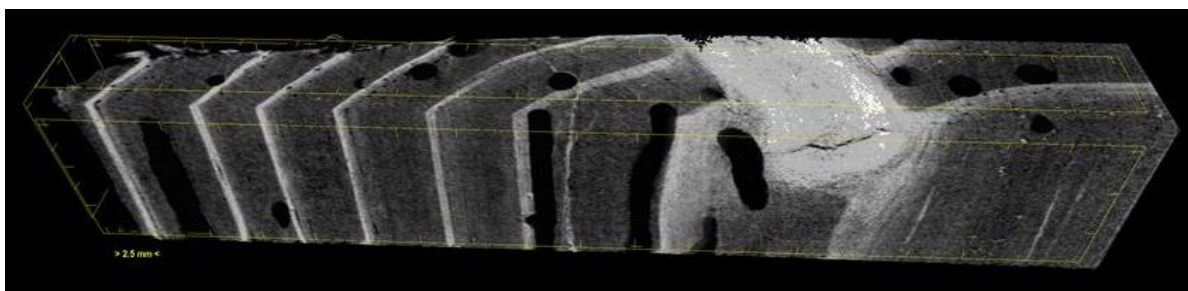


Figura 5.5 – Objeto 3D reconstruído. Visualização através do programa CTVox.

De seguida, já com as imagens reconstruídas, utilizou-se o programa DataViewer para ajustar a escala de cinzentos das imagens, por forma a permitir uma melhor visualização (Figura 5.6). Nesta fase do estudo, e com este programa, escolhe-se, também, qual o plano de visualização com que se vai trabalhar as imagens na fase seguinte (análise). Existem 3 escolhas possíveis: coronal – eixos x y; sagital – eixos x z; transaxial – eixos y z. Neste estudo optou-se pelo plano coronal por ser o plano onde as imagens possuíam menos ruído e artefactos e, por isso, ser mais fácil efetuar-se a distinção entre madeira e vazios (galerias formadas pelos carunchos).

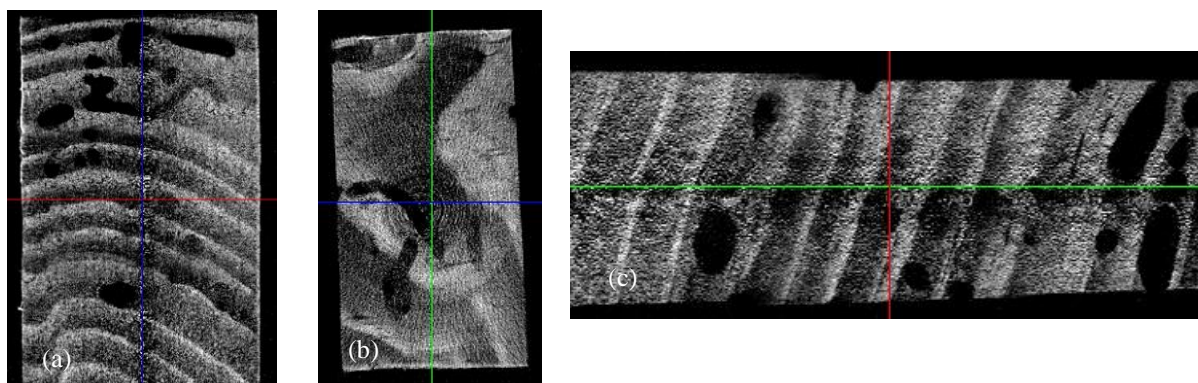


Figura 5.6 – Imagens 2D do objeto reconstruído: (a) plano coronal; (b) plano sagital; (c) plano transaxial.

### 5.3.4. Análise

Depois da reconstrução, as imagens obtidas (fatias do objeto) podem então ser alvo de análise para obtenção de dados quantitativos. Este processo é altamente dependente do *software* que se utilize (du Plessis et al., 2017). Tal como foi referido anteriormente, para este estudo, utilizou-se o programa CTAn (programa de tratamento de imagem e de cálculo), fornecido pela Bruker, em alternância com o programa ImageJ (programa de tratamento de imagem e de cálculo), fornecido pela NIH. O *software* ImageJ permite, ao contrário do CTAn, uma auto interpolação de um subconjunto de imagens, o que pode trazer algumas vantagens relacionadas com a eliminação de ruído localizado, por exemplo.

Um dos tratamentos de imagem mais importantes e que é feito nesta fase é a segmentação, que consiste na transformação das imagens originais, numa escala de 256 níveis de cinzento, em imagens binarizadas mais simples (Figura 5.7). Estas imagens irão possuir os componentes estruturais de interesse para o estudo realizado, no caso presente, madeira sã e vazios, que devem encontrar-se separados o melhor possível para a fase de cálculo. Deve, também, ter-se em atenção o facto de ainda haver ruído nas imagens binarizadas, que é impossível remover de forma total, quer no processo de filtragem, quer na própria análise. Por esse motivo, esta etapa deve ser realizada com todo o cuidado, por forma a que não se comece a deturpar o estudo, confundindo, por exemplo, madeira sã com vazios ou vazios com o próprio ruído. É fulcral para a veracidade do estudo que o ruído seja eliminado enquanto se mantém a informação morfológica e estrutural do material, que pode estar à mesma ordem de escala que o ruído (Rozenbaum et al., 2016).

Deve definir-se, então, um algoritmo de tratamento de imagens mais ou menos generalizado para todas as amostras em estudo, para que o erro cometido para cada conjunto de imagens seja o menor possível.

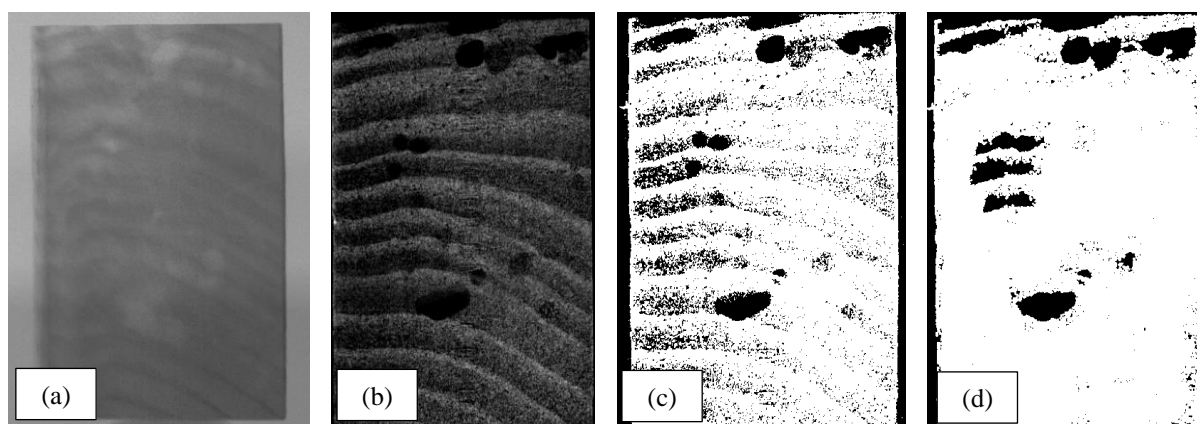


Figura 5.7 – Imagens das várias fases da técnica de micro-CT: (a) Processo de aquisição; (b) Depois da reconstrução; (c) Imagem binarizada; (d) Imagem tratada pronta para o cálculo.

Definiram-se 3 algoritmos base para os 3 níveis de degradação propostos anteriormente (Tabela 5.3, 5.4 e 5.5). Depois, para cada conjunto de imagens pertencente a cada amostra estudada, adapta-se o algoritmo base definido anteriormente para esse nível.

Tabela 5.3 – Algoritmo 1 definido para o Nível de degradação 1.

Algoritmo 1		
Parâmetro	Descrição	Setting sugerido
Thresholding	Faz uma segmentação por forma a transformar imagens numa escala de cinzentos em imagens binárias	Global; low level 17, high level 255
Despeckle	Remove os <i>speckles</i> das imagens binárias	Remove white speckles < 500 voxels Remove black speckles < 150 voxels
Morphological operations	Preenche os orifícios e fecha/abre poros existentes	Closing; 2D space; Kernel round, radius 5

O primeiro comando para cada um dos algoritmos passa por um *threshold*, para que o conjunto de imagens passe de uma escala de cinzentos para um conjunto binário. A partir desta segmentação inicial passa-se a possuir conjuntos discretos de imagens binárias, com os dois parâmetros de interesse definidos e separados (madeira e vazios). No entanto, a escolha do tipo de *threshold* a utilizar varia de utilizador para utilizador e pode resultar em diferenças consideráveis nos resultados de output (Parkinson et al., 2008). Por isso, o comando de *threshold* deve ser escolhido por um só utilizador e mantido no algoritmo para todo o estudo. Para este estudo em particular, devido à definição de 3 níveis de degradação diferentes, decidiu-se, também, utilizar-se 3 algoritmos de tratamento diferentes, cada um com uma opção diferente de *threshold*. Esta decisão foi tomada por não se saber, à partida, qual a melhor opção de *threshold* para o estudo. No entanto, não se espera diferenças substanciais nos resultados obtidos uma vez que os comandos foram aplicados de forma controlada e sempre pelo mesmo utilizador

Antes do *threshold* propriamente dito, as imagens podem, ainda, ser filtradas para que se remova parte do ruído existente. Depois, o *software* CTAn disponibiliza um conjunto de comandos para o ajuste dos parâmetros em análise, tais como os comandos *despeckle*, filtragem ou operações morfológicas. Cada um destes comandos terá como função o tratamento do conjunto de imagens binarizadas com o objetivo de se chegar, no fim, a um conjunto de imagens de onde seja possível calcular os parâmetros de interesse. De referir que o processo de tratamento difere de utilizador para utilizador, pelo que se deve definir um algoritmo base que se siga ao longo de todo o estudo. Note-se que esta divergência de critérios de análise pode começar logo no comando de *threshold*, tal como referido anteriormente, uma vez que logo aí existem diversas opções possíveis.

Tabela 5.4 – Algoritmo 2 definido para o Nível de degradação 2.

Algoritmo 2		
Parâmetro	Descrição	Setting sugerido
Filtering	Remove ruído das imagens, reduzindo-o	Median; 2D space; radius 1
Thresholding	Faz uma segmentação por forma a transformar imagens numa escala de cinzentos em imagens binárias	Automatic (Otsu method); 2D space; Background dark
Despeckle	Remove os <i>speckles</i> das imagens binárias	Remove white speckles < 500 voxels Remove black speckles < 150 voxels
Morphological operations	Preenche os orifícios e fecha/abre poros existentes	Closing; 2D space; Kernel round, radius 5

Durante este processo de análise, deve ainda definir-se a região de interesse para cada imagem (ROI). Depois, através de uma auto interpolação entre as diferentes regiões de interesse definidas anteriormente, chega-se a um volume de interesse (VOI) para cada conjunto de imagens analisado.

Por fim, com as imagens binarizadas e tratadas de acordo com o interesse do estudo e com a VOI definida, é possível, então, calcular os parâmetros de interesse (no caso presente, madeira sã e vazios). Este

cálculo é efetuado através de uma análise 3D do objeto em estudo. Uma vez obtidos os resultados, começa-se a fase de apresentação e sua discussão.

Tabela 5.5 – Algoritmo 3 definido para o Nível de degradação 3.

Algoritmo 3		
Parâmetro	Descrição	Setting sugerido
Thresholding	Faz uma segmentação por forma a transformar imagens numa escala de cinzentos em imagens binárias	Adaptative (mean-C); 2D space; Background dark; radius 1; constant 0
Despeckle	Remove os <i>speckles</i> das imagens binárias	Remove white speckles < 500 voxels Remove black speckles < 200 voxels
Morphological operations	Preenche os orifícios e fecha/abre poros existentes	Closing; 2D space; Kernel round, radius 5 Erosion; 2D space; Kernel round; radius 1

#### 5.4. Apresentação e discussão de resultados

Depois de todo o processo inerente à micro-CT, pode, então, exportar-se do programa CTAn os resultados para cada amostra estudada, sob a forma de um ficheiro *txt*. No caso de estudo, como existem apenas 2 parâmetros de interesse, não é necessária uma análise final de resultados, pois existe uma distinção clara entre o que é madeira sã e vazios (parâmetros de interesse). No relatório, de entre os vários parâmetros de *output*, destacam-se os parâmetros *tissue volume*, referente ao volume de madeira sã e vazios e o *bone volume*, referente apenas à madeira (esqueleto). O parâmetro *tissue volume* corresponde ao volume total de interesse (VOI) auto interpolado para cada conjunto de imagens. O volume de vazios irá corresponder à diferença entre os parâmetros *tissue volume* e *bone volume*.

Para além destes parâmetros de *output*, é também possível extrair um conjunto de outros parâmetros para uma análise mais detalhada do objeto, como, por exemplo, o comprimento das galerias no interior da madeira. No entanto, deve ter-se atenção se se optar pela utilização de mais algum parâmetro, que não os de interesse, uma vez que os algoritmos foram definidos para o estudo de dois parâmetros de interesse em particular (madeira e vazios).

Nesta fase, deve, também, visualizar-se o modelo tridimensional no interior dos volumes de interesse para o objeto, obtido através do programa CTvox, e compará-lo com a imagem 3D inicial, em escala de cinzentos, obtida através de um programa de visualização (Figura 5.8).

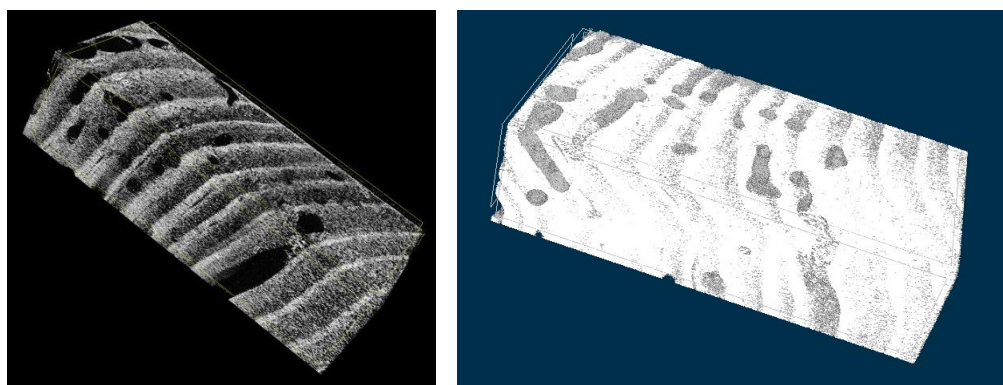


Figura 5.8 – Imagens da amostra 1.1; (a) Imagem inicial 3D em escala de cinzentos; (b) Imagem binarizada e tratada pronta para o processo de cálculo.

Depois de submetidas ao processo de aquisição em micro-CT, as amostras permaneceram em ambiente condicionado durante 2 semanas, numa câmara climática com condições de temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e de humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ , de modo a estabilizarem e a atingirem um teor de água idêntico ao de referência ( $H = 12\%$ ), de acordo com o especificado na norma EN 408 (2010).

## 5. Análise quantitativa de madeira degradada por caruncho

Posteriormente, as amostras foram pesadas com uma balança de precisão 0,01g e registaram-se os valores obtidos.

Para a determinação da massa volúmica original (massa volúmica da madeira antes de se encontrar sujeita a degradação), calculou-se a razão entre a massa do provete ( $m$ ) e o parâmetro *wood volume* ( $w.v$ ) (correspondente ao volume de madeira e de vazios existente), através da equação 5.5.

$$\rho_{original} = \frac{m}{w.v} \quad (5.5)$$

Para a determinação da massa volúmica residual (massa volúmica da madeira degradada), efetuou-se a razão entre a massa do provete ( $m$ ) e o parâmetro *total volume* ( $t.v$ ) (correspondente ao volume de madeira degradada, sem contabilizar com o volume de vazios), através da equação 5.6.

$$\rho_{degradado} = \frac{m}{t.v} \quad (5.6)$$

Na Tabela 5.6 apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das 18 amostras estudadas.

Tabela 5.6 – Valores obtidos depois da análise em micro-CT em cada nível e amostra (parâmetros de interesse, massas e massas volúmicas).

Amostra	Total Volume	Wood Volume	Material perdido	Massa	Massa Volúmica Original	Massa Volúmica Residual	
	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	%	g	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
Nível 1	1.1	14,847	14,206	4,32	9,388	660,8	632,3
	1.2	8,529	7,811	8,42	4,763	609,8	558,4
	1.3	8,631	6,309	26,90	2,544	403,2	294,8
	1.4	8,179	7,158	12,48	3,862	540,3	472,2
	1.5	8,774	7,071	19,41	3,412	482,5	388,9
	1.6	7,021	6,022	14,23	2,988	496,2	425,6
	1.7	7,216	6,260	13,25	3,084	492,7	427,4
Nível 2	2.1	7,576	6,293	16,94	3,455	549,0	456,1
	2.2	7,352	6,731	8,45	4,360	647,7	593,0
	2.3	8,798	7,868	10,57	4,541	577,1	516,1
	2.4	8,913	8,074	9,41	4,520	559,8	507,1
	2.5	9,168	8,299	9,48	4,308	519,1	469,9
	2.6	9,250	8,339	9,85	4,776	572,7	516,3
Nível 3	3.1	8,011	6,224	22,31	3,212	516,1	400,9
	3.2	7,020	5,413	22,89	2,912	537,9	414,8
	3.3	7,154	5,595	21,79	2,782	497,2	388,9
	3.4	6,319	4,854	23,18	2,152	443,3	340,6
	3.5	7,291	5,865	19,56	2,807	478,6	384,9

Através da consulta dos dados da tabela anterior, pode concluir-se que a amostra com maior percentagem de material perdido (provete 1.3) pertence ao nível 1 de degradação, que seria o nível onde supostamente a degradação, bem como a percentagem de material perdido, seriam menores. Isto confirma o que era expectável e terá mesmo que se fazer uma reordenação das amostras por nível, desta vez tendo como base as percentagens de material perdido obtidas através da micro-CT. Este facto vem, mais uma vez, confirmar o facto de não ser possível generalizar determinado grau de degradação superficial para o interior da madeira, uma vez que a intensidade da degradação tende a aumentar (Gilfillan & Gilbert, 2001; Cruz & Machado, 2013; Nunes et. al., 2019).

Na Figura 5.9 apresenta-se o histograma dos valores obtidos para a percentagem de material perdido.

Efetuiu-se, então, uma reorganização das amostras por nível de degradação propondo-se 3 níveis de degradação possíveis:

- Nível 1 – < 10 % de material perdido;
- Nível 2 – 10 a 20 % de material perdido;
- Nível 3 – > 20% de material perdido.

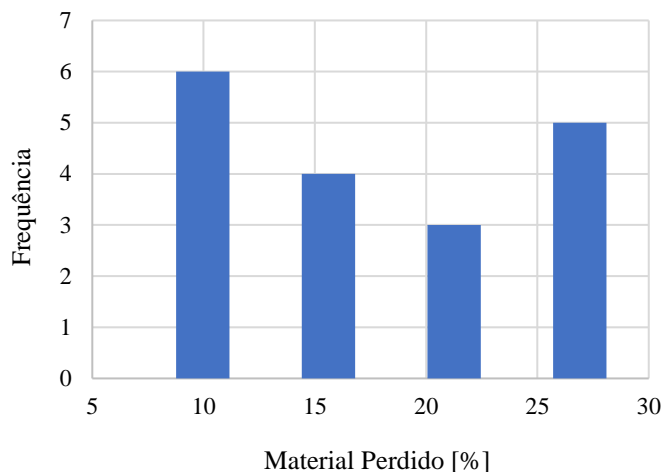


Figura 5.9 – Histograma dos valores obtidos para a percentagem de material perdido.

Estes níveis são propostos apenas com base na distribuição de resultados obtidos nas amostras submetidas a micro-CT. No capítulo 6, as amostras irão ser ensaiadas mecanicamente, pelo que será possível relacionar, por fim, a perda de massa volúmica com as propriedades mecânicas do material.

Um estudo efetuado por Brozovsky et. al. (2008) propõe a definição de 3 classes de degradação, mas apenas com base na redução de secção transversal superficial de madeira degradada por caruncho (Tabela 5.7), abordagem que já se comprovou poder não ser representativa.

Tabela 5.7 - Classes de degradação propostas por Brozovsky et al. (2008).

Classes	Importância estrutural	Redução da secção transversal (%)	Número de orifícios de saída por m <sup>2</sup> de superfície de madeira
1	ligeira	< 5	6 a 10
2	média	5 a 15	11 a 24
3	alta	> 15	> 24

Na Figura 5.10 apresentam-se os *boxplots* da percentagem de material perdido, massa volúmica original e massa volúmica residual depois da reorganização das amostras por nível de degradação. Os resultados obtidos para as massas volúmicas (original e residual) decrescem com o aumento da percentagem de material perdido. A maior perda de massa volúmica verificou-se para o nível 3 de degradação com uma perda média de  $21,9 \pm 1,37\%$ . Para os níveis 1 e 2, a perda média de massa volúmica foi de  $8,4 \pm 2,04\%$  e  $15,3 \pm 3,48\%$  respetivamente. Considerando todas as amostras, obteve-se uma perda de massa volúmica média de  $76,9 \pm 26,6 \text{ kg/m}^3$  ( $14,8 \pm 5,9\%$ ), com uma massa volúmica original média de  $537 \pm 59 \text{ kg/m}^3$  e uma massa volúmica residual média de  $459 \pm 80 \text{ kg/m}^3$ . O LNEC propõe um valor médio característico de massa volúmica para madeira de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) de  $580 \text{ kg/m}^3$  para uma classe de qualidade E (LNEC, 1997), próximo daquele obtido para a massa volúmica original média.

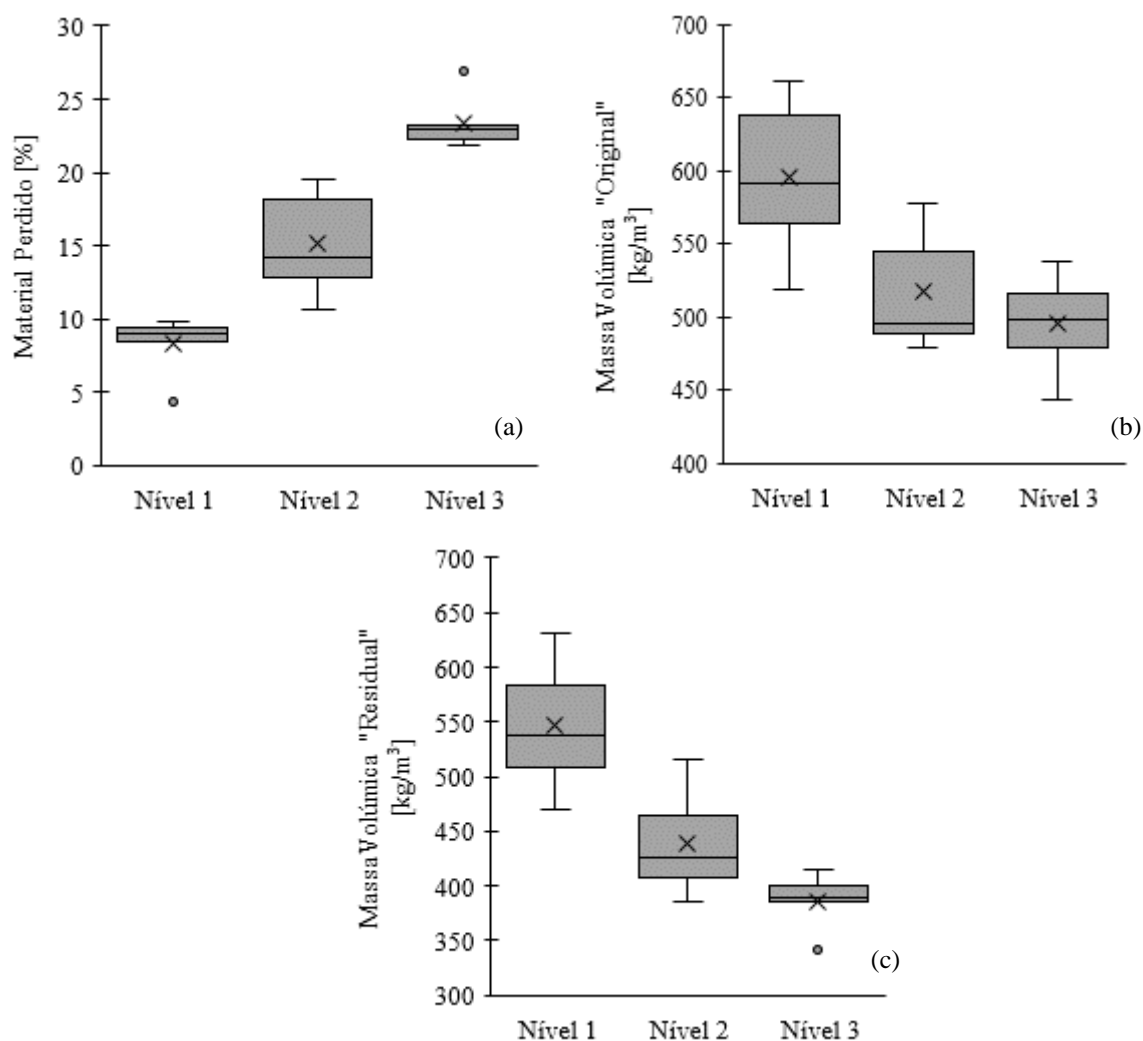


Figura 5.10 – *Boxplots*: (a) percentagem de material perdido; (b) massa volúmica original; (c) massa volúmica residual.

A Figura 5.11 estabelece a correlação entre a massa volúmica original da madeira e a percentagem de material perdido. Tal como expectável, quanto maior for o nível de degradação no elemento, maior a percentagem de material perdido, logo, menor é a massa volúmica do material. Obteve-se um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,67$ , o que expressa uma correlação média entre os dois parâmetros analisados.

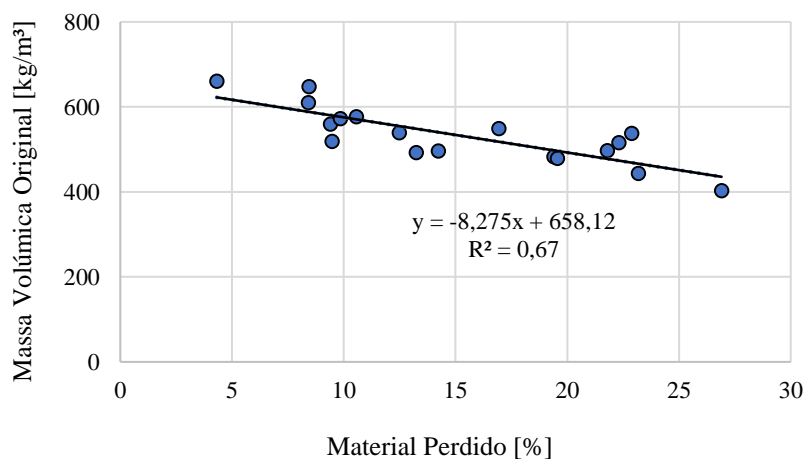


Figura 5.11 – Correlação obtida entre a massa volúmica original e a percentagem de material perdido.

A Figura 5.12 estabelece a correlação entre a massa volúmica residual e a percentagem de material perdido. Obteve-se uma correlação alta ( $r^2 = 0,85$ ) entre os dois parâmetros analisados. Note-se que o coeficiente de determinação obtido para esta correlação é bastante superior àquele alcançado para a correlação entre a massa volúmica original e a percentagem de material perdido. O resultado obtido confirma que a técnica de micro-CT foi utilizada da melhor forma no estudo da madeira e que é possível continuar-se o estudo no sentido de encontrar uma correlação entre um qualquer parâmetro mecânico quantificado e a massa volúmica para madeira degradada.

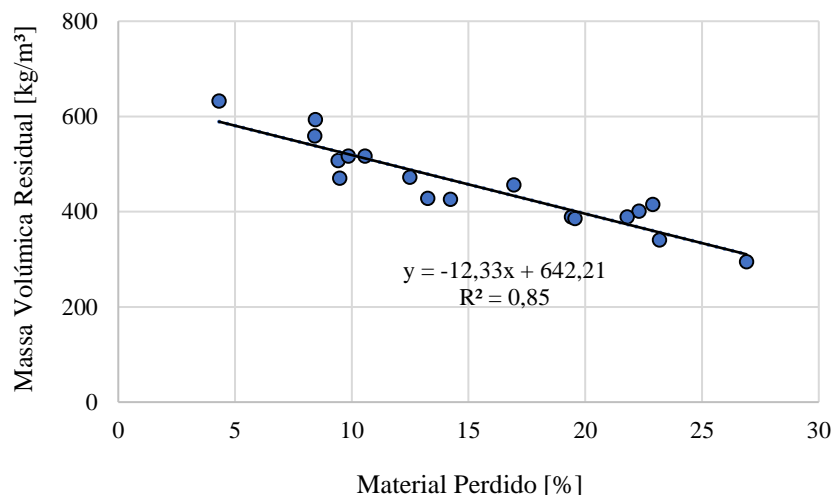


Figura 5.12 – Correlação obtida entre a massa volúmica residual e a percentagem de material perdido.

### 5.5. Síntese final

O presente capítulo teve como objetivo principal o de se proceder a uma análise quantitativa de madeira degradada por caruncho (quantificar madeira sã (esqueleto) e vazios (madeira consumida pelos carunchos)). Para se responder a este objetivo, recorreu-se à técnica não destrutiva de micro tomografia computadorizada. Recolheram-se 18 aquisições em micro-CT (18 provetes) representativos do estado de degradação encontrado em determinado elemento com funções estruturais. Aplicou-se, depois, toda a metodologia inerente ao processo de micro-CT a essas amostras até se binarizar (madeira sã e vazios) cada um dos conjuntos de imagens recolhidos. No fim, correlacionaram-se os resultados obtidos (percentagem de material perdido) com a massa volúmica original e residual para cada uma das amostras estudadas.

As principais conclusões que se retiram são:

- É possível a quantificação da percentagem de material consumido por caruncho pequeno utilizando uma técnica não destrutiva como a micro tomografia computadorizada.
- Obtiveram-se bons coeficientes de determinação quando se relacionou a percentagem de material perdido com as massas volúmicas (original e residual), apesar da existência de erros, impossíveis de eliminar por completo, durante a metodologia de análise dos resultados provenientes do processo de aquisição e de reconstrução.
- Os resultados das percentagens de material perdido obtidos foram superiores ao que era expectável, reforçando a importância da avaliação do impacto de caruncho pequeno em estruturas de madeira.
- Os resultados obtidos sugerem que é possível continuar-se o estudo, avaliando as propriedades mecânicas dos provetes submetidos a micro-CT e, no fim, correlacionar-se esses resultados com a massa volúmica do material, com a finalidade de se concluir sobre a segurança estrutural existente.



## 6. DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO *IN SITU* DE MADEIRA DEGRADADA POR CARUNCHO

### 6.1. Considerações gerais

Tal como referido anteriormente, os danos causados por insetos xilófagos em estruturas de madeira são justificadamente frequentes para a substituição total ou parcial da estrutura (Cruz et al., 2015). Este facto deve-se, fundamentalmente, a dificuldades relacionadas com a avaliação da extensão e severidade de tais danos. Acontece que, frequentemente, os elementos de madeira existentes são avaliados como não possuindo qualquer resistência e são, por isso, substituídos. No entanto, pode acontecer que tais elementos possuam resistência suficiente para garantir a segurança estrutural ou, não possuindo tais mínimos, possam vir a ser reforçados em vez de substituídos. Para isso, é importante que se conheça o nível de segurança estrutural existente depois da degradação, através de uma ferramenta de avaliação da qualidade da madeira *in situ*.

O principal objetivo deste estudo é, como referido, avaliar o impacto de caruncho pequeno na segurança estrutural, através da correlação entre a perda das propriedades mecânicas do elemento, obtida através de um ensaio mecânico realizado *in situ* (por exemplo, ensaio de arrancamento) e a massa volúmica original e residual de tal elemento, obtidas através da aplicação da técnica de micro-CT. Uma vez obtida a massa volúmica original e residual, pode concluir-se sobre a segurança estrutural existente, uma vez que a massa volúmica é um fator essencial para avaliação da qualidade da madeira, sendo correlacionável com a maioria dos parâmetros de avaliação mecânica. No fim, será possível o desenvolvimento de um modelo de avaliação, com base em elementos degradados, que seja representativo do nível de degradação existente num dado elemento estrutural, podendo concluir-se sobre a segurança estrutural existente.

Para se responder ao objetivo final do capítulo e da dissertação, realizaram-se ensaios mecânicos (arrancamento e corte na direção das fibras). Os ensaios de arrancamento foram realizados *in situ* na peça, antes de esta ser segmentada e cortada em provetes para a micro-CT. Os ensaios de corte foram realizados nos provetes de dimensões médias  $40 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$ . A importância da realização dos ensaios de corte prende-se com o facto de o esforço transversal ser máximo nas extremidades das vigas e, por isso, essas zonas constituírem zonas de maior fragilidade, assim como as ligações.

Os ensaios mecânicos foram realizados no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos desenvolvidos nas campanhas de ensaios para a caracterização dos provetes e apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos efetuados. No fim, correlacionam-se estes resultados com os valores de massa volúmica, obtidos através da técnica de micro-CT (Capítulo 5).

### 6.2. Procedimentos experimentais

#### 6.2.1. Ensaio de arrancamento perpendicular às fibras

O ensaio de arrancamento na direção perpendicular às fibras foi realizado na peça de madeira, na tentativa de reprodução de um ensaio de avaliação *in situ*, antes de esta ter sido cortada e de acordo com as instruções indicadas pela norma BS EN 1382 (1999). O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN, com acessórios adaptados para o efeito, e tem como objetivo final avaliar a resistência à extração da ponta de um parafuso de madeira (Figura 6.1).



Figura 6.1 – Detalhe do ensaio de arrancamento na peça de madeira.

Tal como para os ensaios de arrancamento realizados para a campanha experimental do Capítulo 4, aqui também se utilizou uma profundidade de penetração na madeira de 20 mm e uma pré-furação com 4 mm, para ir ao encontro do estudo realizado por Gilfillan & Gilbert em 2001. Os parafusos foram aparafusados na madeira, com pré-furação na direção perpendicular às fibras. No fim, avalia-se a força máxima necessária para o arrancamento do parafuso.

O procedimento de ensaio foi igual ao da campanha experimental do Capítulo 4, pelo que se encontra explanado na secção 4.3.3.1. Neste caso, teve-se o cuidado de deixar uma distância de pelo menos 3 cm entre a zona de arrancamento e o limite do corte dos provetes, que seriam posteriormente utilizados para o estudo micro tomográfico e para os ensaios mecânicos. Isto deve-se ao facto de o ensaio de arrancamento introduzir algumas perturbações na madeira pelo desvio que provoca na orientação das fibras.

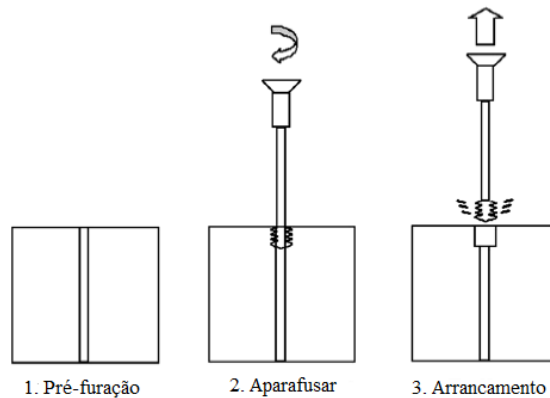


Figura 6.2 – Esquema do ensaio de arrancamento (adaptado de Tannert et al., 2014).

O ensaio de arrancamento é um ensaio semi destrutivo que pode ser realizado *in situ* na estrutura de madeira. Com os valores obtidos através deste ensaio é possível estimar-se a massa volúmica e avaliar-se a qualidade da madeira. No entanto, este ensaio providencia apenas um parâmetro de análise mecânica local. Para que se estime as propriedades mecânicas de um elemento deve realizar-se o teste em vários locais e utilizar uma média dos resultados obtidos (Tannert et al., 2014).

Neste estudo, realizaram-se 4 ensaios de arrancamento em 4 locais diferentes da peça. Não se realizou um maior número de ensaios devido à dimensão reduzida da peça e pelo facto de esta ter sido, consequentemente, cortada para recolha dos provetes para análise em micro-CT. Os provetes para análise em micro-CT, e até mesmo os restantes, que serão ensaiados ao corte, não poderiam, devido à sua dimensão reduzida, estar degradados devido ao teste de arrancamento. Por isso, a madeira onde se realizaram os ensaios de arrancamento não foi utilizada na continuação do estudo.

### 6.2.2. Ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623

O ensaio de corte na direção paralela às fibras (Figura 6.3) foi efetuado de acordo com as instruções indicadas pela norma NP 623 (1973). O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN e consistiu na aplicação de forças progressivamente crescentes no provete a uma velocidade constante até que se atingisse a rotura. A velocidade de aplicação da carga foi estimada de modo que a rotura ocorresse em cerca de 180 segundos.



Figura 6.3 – Ensaio de corte segundo a NP 623 (1973).

A resistência ao corte paralelo às fibras ( $\tau$ ) é obtida através do quociente entre a força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ), correspondente à rotura, e a área de rotura ( $a \times b$ ), dada através da equação 6.1.

$$\tau = \frac{F_{m\acute{a}x}}{a \times b} \quad (6.1)$$

O ensaio realizou-se em 6 provetes (3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 1.4; 1.2) de dimensões médias de secção transversal de  $40 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$  (provetes sobrantes do processo de corte das amostras utilizadas no estudo da micro-CT).

### 6.2.3. Ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408

O ensaio de corte na direção paralela às fibras (Figura 6.4 a,c) foi efetuado de acordo com as instruções indicadas pela norma EN 408 (2010). O ensaio também foi realizado na prensa universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250kN e consistiu na aplicação de forças progressivamente crescentes no provete a uma velocidade constante até que se atingisse a rotura. A velocidade de aplicação da carga foi estimada de modo a que a rotura ocorresse em cerca de 180 segundos.

A resistência ao corte paralelo às fibras ( $\tau$ ) é obtida através da equação 6.2 em que  $F_{m\acute{a}x}$  corresponde à força de rotura,  $l$  ao comprimento da secção de corte e  $b$  à largura da secção de corte.

$$\tau = \frac{F_{m\acute{a}x} \times \cos(14^\circ)}{l \times b} \quad (6.2)$$

Este ensaio consiste na colagem de duas placas metálicas a duas faces opostas do provete de madeira (Figura 6.4 b) procedendo-se, depois, à aplicação de forças através dessas peças metálicas. A principal vantagem na utilização deste ensaio em relação ao preconizado na norma NP 623 (1973), prende-se com o facto de haver uma distribuição mais uniforme das tensões de corte.

De referir, ainda, que se optou pela realização de ensaios de corte na direção paralela às fibras por a distribuição dos túneis formados pelos carunchos ser predominante nesta direção (Gilfillan & Gilbert, 2001). Sabe-se, ainda, que o corte paralelo é responsável por um grande número de fraturas na madeira (Santos, 2007), pelo que é expectável que a situação piore se a madeira estiver degradada devido à ação dos carunchos.

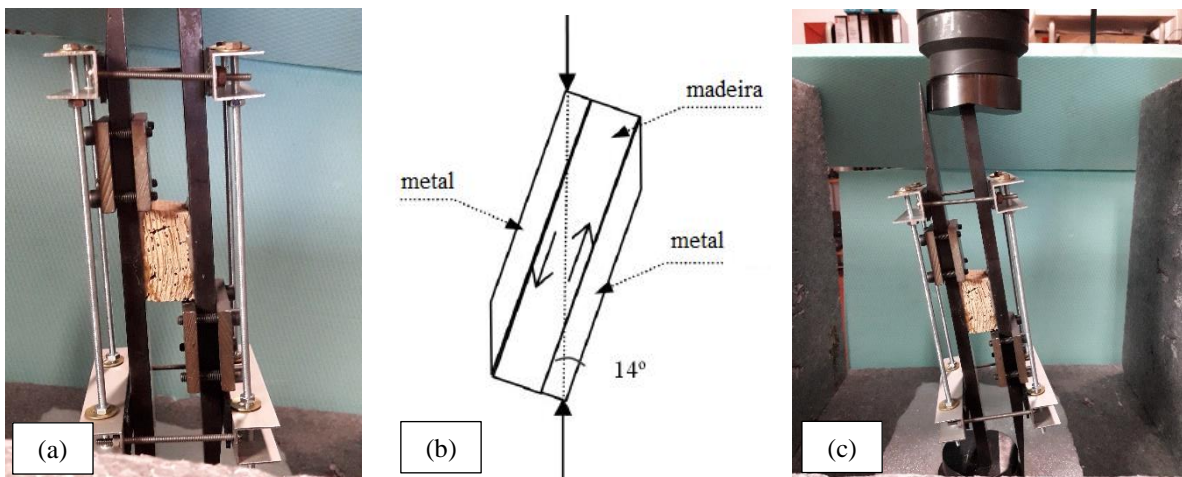


Figura 6.4 – Ensaio de corte segundo a EN 408 (2010): (a,c) pormenores do ensaio; (b) esquema do ensaio (adaptado da EN 408, 2010).

A resina utilizada nestes ensaios foi uma resina epoxídica *Araldite*<sup>®</sup> com resistência máxima a forças de tração de  $320 \text{ kg/cm}^2$  ao fim de 48 horas. Era importante a escolha de uma cola com uma resistência considerável de modo a que a rotura acontecesse sempre na madeira e não na linha de cola.

### 6.3. Apresentação e discussão de resultados

Nesta secção apresentam-se, discutem-se e correlacionam-se os resultados experimentais obtidos para os ensaios mecânicos realizados. No fim, propõe-se o desenvolvimento de um modelo, com base em

elementos de madeira degradados, que seja representativo do nível de degradação existente no elemento estrutural, podendo inferir-se se a segurança estrutural está ou não garantida.

### 6.3.1. Resistência ao arrancamento perpendicular às fibras

Tal como foi referido anteriormente, realizaram-se 4 ensaios de arrancamento perpendicular às fibras em 4 locais diferentes na peça.

Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados dos ensaios de arrancamento.

Tabela 6.1 – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento perpendicular às fibras.

	<b>F<sub>máx</sub></b>	<b>f</b>
<b>Valor</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>
<b>Médio (<math>\mu</math>)</b>	0,46	6,62
<b>Mínimo</b>	0,28	3,99
<b>Máximo</b>	0,69	9,86
<b>Desvio padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,19	2,76
<b>C.V (%)</b>	41,7	41,7

Os valores médios obtidos para os ensaios de arrancamento são inferiores aos obtidos na campanha experimental do Capítulo 4. No entanto, o nível de degradação encontrado nesta peça era bastante superior ao das vigas analisadas no Capítulo 4. De notar, também, o aumento do valor de C.V, que pode ser explicado pelas diferenças existentes no nível de degradação ao longo da viga. No Capítulo 5 concluiu-se que havia zonas com uma percentagem de material perdido de 4,32%, enquanto que noutras zonas esta percentagem ascendia aos 29,9%. A perda de massa volúmica em zonas com percentagens de material perdido na ordem dos 30% é muito maior do que aquela em zonas com percentagens de material perdido na ordem dos 5%. Isto reforça a importância da existência de classes de degradação, com base na perda de massa volúmica, que possam ser relacionadas com o parâmetro mecânico de avaliação da qualidade da madeira *in situ*, neste caso, a resistência ao arrancamento.

Estabeleceram-se, então, as correlações entre a massa volúmica original e residual (parâmetros obtidos no estudo de micro-CT apresentado no Capítulo 5) e a resistência ao arrancamento. Tal como foi referido anteriormente, os provetes onde se fez os ensaios de arrancamento não foram submetidos a micro-CT, pelo que a massa volúmica utilizada para as correlações será aquela estimada para os provetes próximos de onde foi realizado o ensaio de arrancamento.

Tome-se como exemplo a Figura 6.5, que apenas apresenta uma representação esquemática. Realizaram-se os 4 ensaios (A1, A2, A3 e A4) em 4 locais diferentes da peça. Para correlação de resultados entre as massas volúmicas e os valores de resistências de arrancamento utilizou-se, por exemplo para o ensaio A1, a média aritmética das massas volúmicas estimadas para os provetes 3.1 e 3.2.

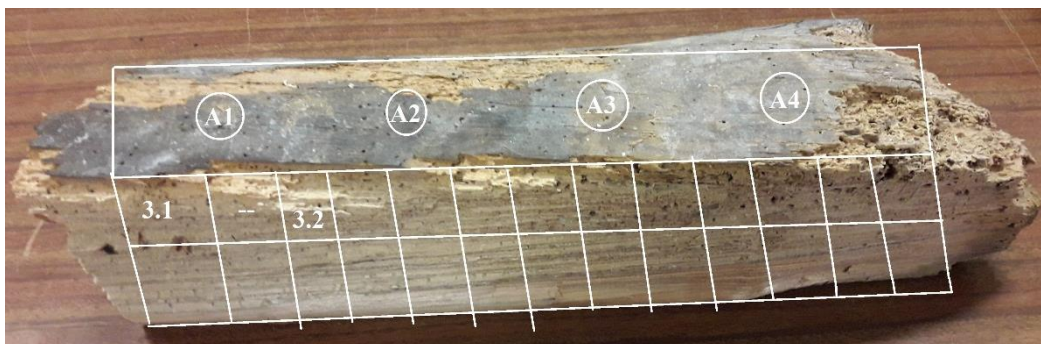


Figura 6.5 – Representação esquemática para os ensaios de arrancamento.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 6.6. A Figura 6.7 apresenta os resultados obtidos inseridos no nível de degradação correspondente, definido anteriormente.

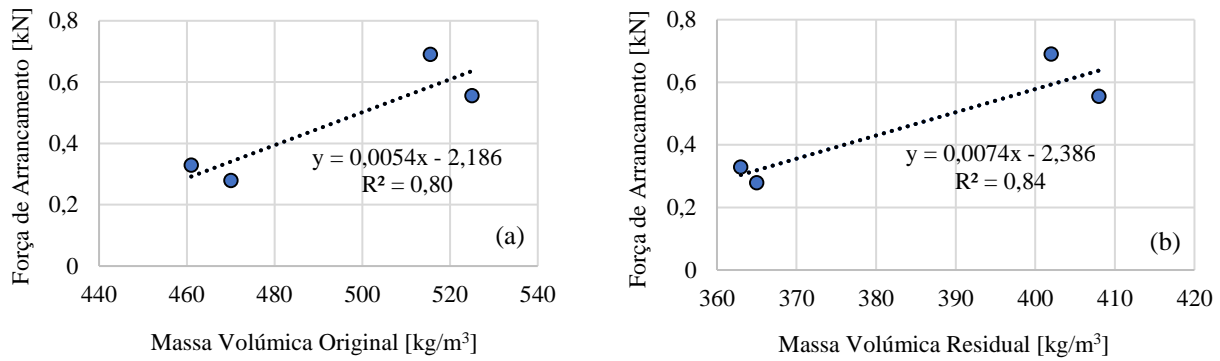


Figura 6.6 – Correlações obtidas entre a força de arrancamento e a massa volúmica original (a) e entre a força de arrancamento e a massa volúmica residual (b).

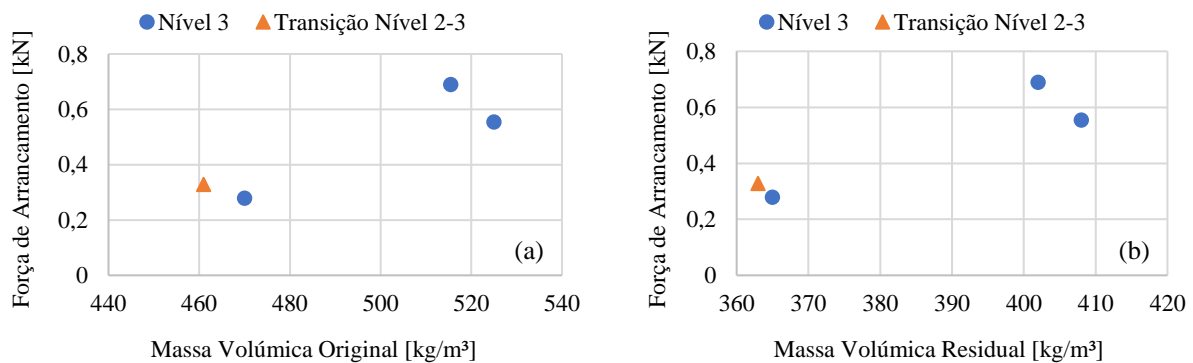


Figura 6.7 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: força de arrancamento em função da massa volúmica original (a) e força de arrancamento em função da massa volúmica residual (b).

Obteve-se uma alta correlação ( $r^2 = 0,80$ ) entre a força de arrancamento e a massa volúmica original, que melhora ( $r^2 = 0,84$ ) quando se correlaciona a força de arrancamento com a massa volúmica residual. Como expectável, valores de massa volúmica maiores conduzem a valores de forças de arrancamento maiores. Íñiguez et al. (2010) obtiveram um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,67$  entre a resistência ao arrancamento e a massa volúmica original para peças sem degradação. Os resultados deste estudo e de estudos anteriores comprovam que uma ferramenta de avaliação da força de arrancamento *in situ* pode ser utilizada para se estimar a massa volúmica original e residual da madeira, concluindo-se sobre a perda de massa volúmica decorrente da degradação.

Na Figura 6.7 apresenta-se a distribuição dos ensaios de arrancamento por níveis de degradação, propostos no Capítulo 5. Não foram efetuados quaisquer ensaios de arrancamentos em locais onde houvesse o nível 1 de degradação. Um dos ensaios foi efetuado num local de transição do nível 2 para o nível 3 de degradação (uma das amostras considerada pertencia ao nível 2, enquanto que a outra pertencia ao nível 3).

Tal como foi referido anteriormente, no Capítulo 5, pode haver nova necessidade de reordenação dos níveis, agora tendo em conta os resultados provenientes dos ensaios mecânicos realizados e relacionando todos os fatores: propriedades mecânicas, massas volúmicas e percentagens de material perdido. No fim, é expectável que se possa concluir sobre a resistência residual dos elementos de madeira degradados. Este assunto será novamente abordado mais à frente neste capítulo.

### 6.3.2. Resistência ao corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623

O ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623 (1973) foi realizado em 6 provetes (1 do 1º nível de degradação, 1 do 2º nível de degradação e 4 do 3º nível de degradação). Antes de se realizar o ensaio, efetuou-se a medição das secções de rotura de cada provete ( $a$ ,  $b$ ) com recurso a uma craveira.

Na Tabela 6.2 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 6.2 – Valores de força máxima e resistência obtidos no ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a NP 623 (1973).

	<b>F<sub>máx</sub></b>	<b>τ</b>
<b>Valor</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>
<b>Médio (μ)</b>	3,3	6,8
<b>Mínimo</b>	1,5	5,5
<b>Máximo</b>	6,5	11,8
<b>Desvio Padrão (σ)</b>	1,79	2,47
<b>C.V (%)</b>	54,3	36,2

A Figura 6.8 apresenta as correlações obtidas entre a resistência ao corte e a massa volúmica original e entre a resistência ao corte e a massa volúmica residual. Obteve-se uma correlação razoável entre a resistência ao corte e a percentagem de material perdido ( $r^2 = 0,55$ ).

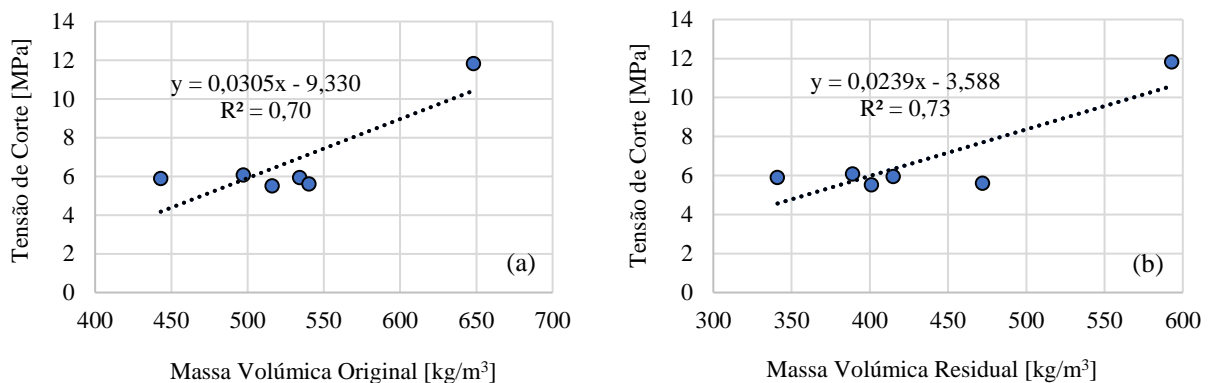


Figura 6.8 – Correlações obtidas entre a tensão de corte e a massa volúmica original (a) e entre a tensão de corte e a massa volúmica residual (b).

Obteve-se uma correlação média entre a tensão de corte e a massa volúmica original ( $r^2 = 0,7$ ), que melhora um pouco quando se relaciona a tensão de corte com a massa volúmica residual ( $r^2 = 0,73$ ). No entanto, é expectável que estas correlações venham a melhorar com a aplicação da metodologia de ensaio da EN 408 (2010). A Figura 6.9 apresenta os resultados obtidos função do nível de degradação correspondente.

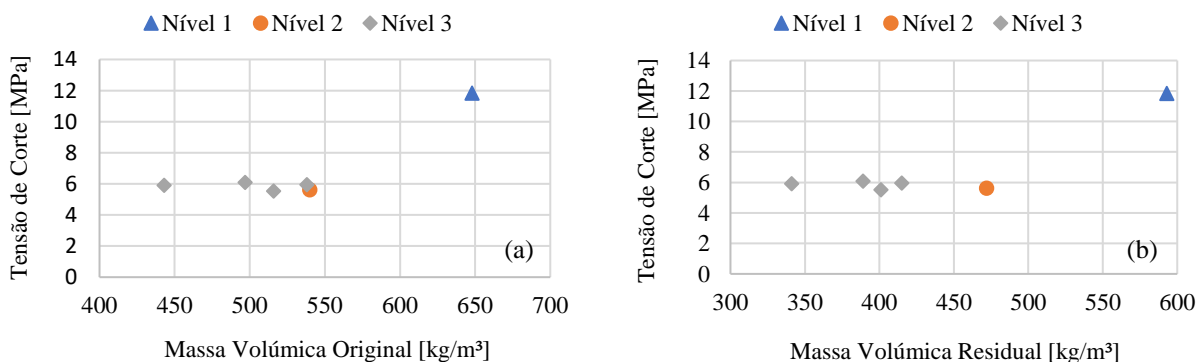


Figura 6.9 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: tensão de corte em função da massa volúmica original (a) e tensão de corte em função da massa volúmica residual (b).

Através da interpretação da Figura 6.9 percebe-se, por exemplo, que a amostra 1.4, anteriormente colocada no nível 2 de degradação por apresentar uma percentagem de material perdido de 12,5%, tem uma

massa volúmica original, para um valor de tensão de corte semelhante, idêntico ao valor de massa volúmica original da amostra 3.2, colocada no nível de degradação 3. Este facto comprova, mais uma vez, que a distribuição das amostras por níveis deve ser repensada tendo em conta a perda de massa volúmica existente.

### 6.3.3. Resistência ao corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408

O ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408 (2010) foi realizado em 9 provetes (3 do 1º nível de degradação, 3 do 2º nível de degradação e 3 do 3º nível de degradação). Antes de se efetuar o ensaio, efetuou-se a medição das secções de rotura de cada provete ( $l, b$ ) com recurso a uma craveira.

Na Tabela 6.3 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 6.3 – Valores de força máxima e resistência obtidos no ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408 (2010).

	<b>F<sub>máx</sub></b>	<b><math>\tau</math></b>
<b>Valor</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>
<b>Médio (<math>\mu</math>)</b>	1,3	2,4
<b>Mínimo</b>	0,5	0,8
<b>Máximo</b>	2,3	4,3
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,54	1,11
<b>C.V (%)</b>	40,9	46,9

A Figura 6.10 apresenta as correlações obtidas entre a resistência ao corte e a massa volúmica original e entre a resistência ao corte e a massa volúmica residual. Obteve-se uma correlação alta entre a força de corte e a percentagem de material perdido ( $r^2 = 0,91$ ). Obteve-se, também, uma correlação alta entre a tensão de corte e a massa volúmica original ( $r^2 = 0,75$ ) que melhora quando se correlaciona a tensão de corte e a massa volúmica residual ( $r^2 = 0,82$ ). De facto, tal como se esperava obtiveram-se melhores coeficientes de determinação no ensaio de corte paralelo de acordo com a EN 408 (2010). Isto deve-se ao facto de as galerias se encontrarem, fundamentalmente, na direção paralela às fibras, sendo que este ensaio provoca uma rotura mais abrangente do provete. No ensaio realizado de acordo com a NP 623 (1973), o corte é induzido por tensões de compressão numa das meias faces do provete, havendo criação de tensões transversais. Este ensaio torna-se mais localizado e, por isso, menos interessante de se utilizar no estudo de madeira degradada por carunchos.

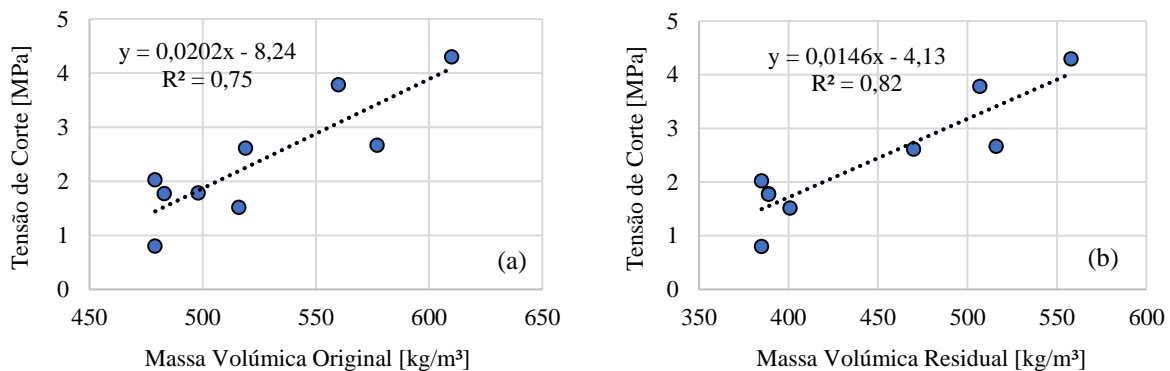


Figura 6.10 – Correlações obtidas entre a tensão de corte e a massa volúmica original (a) e entre a tensão de corte e a massa volúmica residual (b).

A Figura 6.11 apresenta os resultados obtidos inseridos no nível de degradação correspondente. Note-se o caso da amostra 2.3, com uma percentagem de material perdido de 13,3% e, por isso, pertencente ao 2º nível de degradação. Esta amostra, apresenta um valor de massa volúmica (original e residual) maior que a amostra 2.5 (pertencente ao 1º nível de degradação e com 9,5% de material perdido). No entanto, as duas amostras consideradas apresentaram uma tensão de corte semelhante (2.3 – 2,66 MPa; 2.5 – 2,61 MPa).

Estas amostras deveriam, assim, pertencer ao mesmo nível de degradação, o que já aconteceu durante a primeira organização por níveis baseada numa inspeção visual.

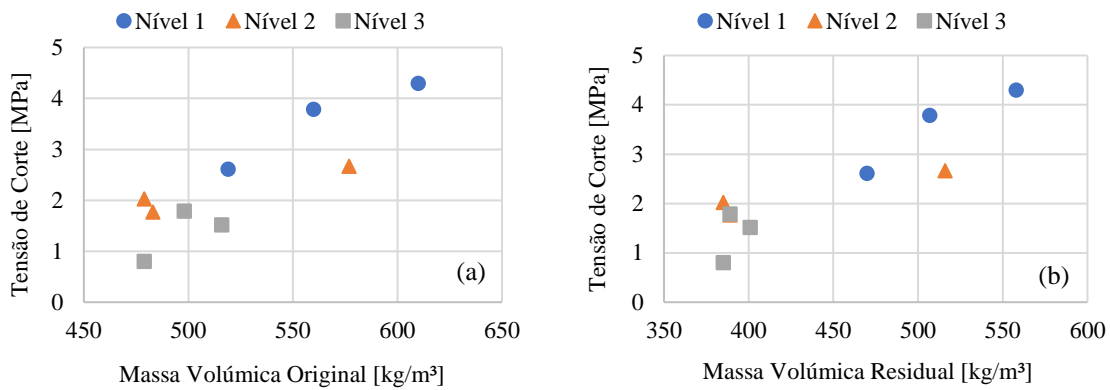


Figura 6.11 – Distribuição de amostras por níveis de degradação: tensão de corte em função da massa volúmica original (a) e tensão de corte em função da massa volúmica residual (b)

#### 6.4. Desenvolvimento de um modelo de avaliação *in situ* de madeira degradada

##### 6.4.1. Background

A técnica de avaliação *in situ* de madeira degradada por caruncho que se propõe neste estudo baseia-se num ensaio de arrancamento do parafuso. O ensaio de arrancamento é uma técnica semidestrutiva que pode ser realizada *in situ* na madeira para avaliação da sua qualidade (Tannert et al., 2014). Através deste ensaio, é possível estimar-se a massa volúmica da madeira, fator que é essencial na avaliação da sua qualidade por ser correlacionável com a maioria das propriedades mecânicas da madeira.

Através da equação 6.3 é possível estimar-se a massa volúmica da madeira ( $D$ ) em função da resistência ao arrancamento ( $f$ ). Os parâmetros  $a$  e  $b$  são os coeficientes da regressão e devem ser obtidos de uma base de dados. Note-se que estes valores devem ser determinados para cada espécie e grupo de madeira estudada.

$$D = a \times f + b \quad (6.3)$$

Para a realização do ensaio *in situ* de arrancamento do parafuso, existem 2 tipos de equipamentos portáteis disponíveis (Figura 6.12). Para mais informações sobre cada um destes equipamentos ou sobre o seu modo de funcionamento, deve ser consultada bibliografia adicional (Winandy et al., 1998; Divos et al., 2011).

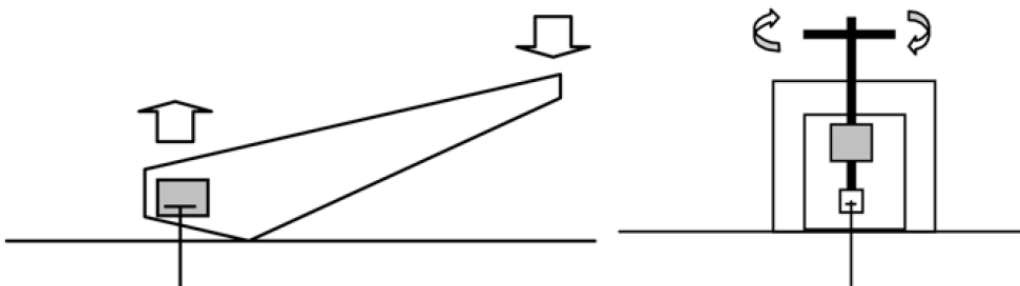


Figura 6.12 – Tipos de equipamento disponíveis para a realização do ensaio de arrancamento *in situ* (Yamagushi, 2010).

Note-se, ainda, que o ensaio de arrancamento providencia parâmetros de análise mecânica locais. Para que se estime as propriedades mecânicas de um elemento, de forma mais fiável, deve realizar-se o ensaio em vários locais e utilizar-se uma média dos resultados obtidos (Tannert et al., 2014).

Quando se trata de estruturas com interesse histórico, o ponto anterior pode ser de difícil aplicação, devendo-se, para este caso, proceder-se a uma inspeção visual prévia por forma a inferir quais as zonas mais degradadas ou mais frágeis da estrutura (por exemplo, as ligações) (Cruz et al., 2015).

Depois de se ter realizado o ensaio *in situ* no elemento de madeira devem tapar-se todos os orifícios resultantes do arrancamento do parafuso, por forma a prevenir uma possível deterioração da madeira ou futuros ataques de insetos (Kloiber et al., 2015).

#### 6.4.2. Aplicação

Através da equação 6.4 é possível estimar-se a perda de massa volúmica da madeira, devido à degradação por caruncho, em função da força de arrancamento do parafuso. Esta equação foi determinada através das correlações obtidas na secção 6.3.1.

$$\Delta\rho = |-35,49F_{m\acute{a}x} - 91,93| \quad (r^2 = 0,64) \quad (6.4)$$

Nesta equação,  $\Delta\rho$  corresponde à perda total de massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $F_{m\acute{a}x}$  à força de arrancamento do parafuso (kN).

Uma vez obtida uma estimativa da perda de massa volúmica, é possível relacionar-se este parâmetro com as tensões de corte obtidas e apresentadas nas secções 6.3.2 e 6.3.3. Importa assim, estabelecer-se uma equação (Equação 6.5) que estime a tensão de corte paralelo às fibras em função da perda de massa volúmica.

$$\tau = -0,0628\Delta\rho + 12,791 \quad (r^2 = 0,48) \quad (6.5)$$

Nesta equação,  $\tau$  corresponde à tensão de corte paralelo à direção das fibras (MPa) e  $\Delta\rho$  à perda de massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ).

Esta equação foi obtida através das correlações obtidas na Figura 6.8. Note-se que os ensaios de corte paralelo que levaram à obtenção destas correlações foram realizados de acordo com o preconizado na NP 623 (1973).

Através da equação 6.6 é possível estimar-se a tensão de corte paralelo às fibras em função da perda de massa volúmica do material. Esta equação foi determinada a partir das correlações obtidas na Figura 6.10.

$$\tau = -0,0341\Delta\rho + 5,098 \quad (r^2 = 0,65) \quad (6.6)$$

Nesta equação,  $\tau$  corresponde à tensão de corte paralelo à direção das fibras (MPa) e  $\Delta\rho$  à perda de massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ). Obteve-se um coeficiente de determinação mais alto do que aquele que se obteve na equação 6.5. Este facto vem comprovar o que foi referido anteriormente e atesta que o ensaio realizado de acordo com a EN 408 (2010) é substancialmente melhor para este estudo. O ensaio de resistência ao corte paralelo para madeira degradada por caruncho torna-se bastante explicativo do comportamento do material em rotura, uma vez que as galerias se distribuem, preferencialmente, na direção paralela às fibras. É nesta direção e nas zonas com maiores concentrações de galerias que se dá a rotura do material (Figura 6.13), sendo o corte paralelo o principal responsável por um grande número de fraturas na madeira.



Figura 6.13 – Provetes depois do ensaio de corte, realizado de acordo com a EN 408 (2010).

A metodologia, baseada em ensaios de laboratório, que se propõe para avaliação da qualidade da madeira *in situ* consiste, assim, nos seguintes passos principais:

1. Inspeção visual a cada elemento de madeira para identificação de zonas de maior degradação e da presença de defeitos (nós, fendas). Uma inspeção visual *in situ* é reconhecida por vários autores como o primeiro passo para a avaliação de uma estrutura de madeira (Cruz et al., 2015; Kasal & Anthony, 2004; Feio & Machado, 2015). A norma italiana UNI 11119 (2004) refere os princípios que devem ser seguidos durante uma inspeção, bem como as condições necessárias para a sua realização. O ensaio de arrancamento não deve ser realizado em locais do elemento onde for detetada a presença de defeitos, pois os resultados obtidos serão afetados (por exemplo, se o ensaio for realizado num nó ou próximo dele, esperam-se resultados maiores de resistência ao arrancamento) (Kloiber et al., 2015).
2. Inserção da estrutura num dos três níveis de degradação propostos anteriormente com base na percentagem de material perdido. Isto irá providenciar uma ideia sobre a percentagem de material perdido e, conseqüentemente, sobre a perda de massa volúmica devido à degradação. A inserção da estrutura num dos três níveis de degradação pode ser feita através da alocação, para todos os elementos, do nível de degradação previsto para o elemento com maior degradação ou, mais demorado, através da alocação para cada elemento do nível de degradação correspondente à sua “real” degradação.
3. Realização *in situ* dos ensaios de arrancamento do parafuso. Antes da realização dos ensaios devem identificar-se os locais do elemento onde estes serão realizados e ter-se em conta o tipo de parafuso a utilizar, o seu diâmetro, a pré-furação e a quantidade de ensaios a realizar. Note-se que uma maior quantidade de ensaios realizados irá levar a uma melhor estimativa do valor da resistência ao arrancamento. No entanto, se se tratar de uma estrutura com interesse histórico esta abordagem pode ser de difícil realização uma vez que os danos causados à estrutura devem ser mínimos.
4. Estimativa, de acordo com a equação 6.4 ( $r^2 = 0.82$ ), da perda total de massa volúmica decorrente da degradação da madeira pelos carunchos.
5. Uma vez que se conheça a perda de massa volúmica resultante da degradação, pode concluir-se sobre a resistência residual da madeira, uma vez que este parâmetro é correlacionável com a maior parte das propriedades mecânicas da madeira. Deve, por isso, utilizar-se as equações 6.5 ou 6.6 do presente estudo ou outras de estudos anteriores (Conde et al., 2014; Yamagushi & Nakao, 2015).

### 6.5. Síntese final

O presente capítulo da dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma técnica de avaliação *in situ* de madeira degradada por caruncho pequeno. Para se responder a este objetivo, utilizou-se o conhecimento adquirido nos capítulos 4 (avaliação das propriedades mecânicas do material) e 5 (análise quantitativa de madeira degradada por caruncho pequeno).

A técnica de avaliação *in situ* baseia-se num ensaio de arrancamento do parafuso. Realizaram-se 4 ensaios de arrancamento perpendicular às fibras de acordo com a BS EN 1382 (1999) e 15 ensaios de corte paralelo às fibras (9 de acordo com a EN 408 (2010) e 6 de acordo com a NP 623 (1973)). Correlacionaram-se os resultados obtidos para os ensaios de arrancamento e de corte com a perda de massa volúmica. No fim, propôs-se um modelo de avaliação de madeira degradada por carunchos pequenos, por forma a concluir-se sobre a resistência residual do elemento.

As principais conclusões que se retiram são:

- É possível a quantificação da perda de massa volúmica com base num ensaio semidestrutivo *in situ*, como é o caso do ensaio de arrancamento.
- O conhecimento da perda de massa volúmica do material é essencial para uma avaliação da qualidade da madeira e da sua resistência residual.
- O ensaio de corte paralelo às fibras de acordo com a EN 408 (2010) é bastante explicativo do comportamento da madeira degradada em rotura. Obtiveram-se boas correlações entre as massas volúmicas (original e residual) e a tensão de corte.
- Propôs-se uma metodologia de avaliação *in situ* de madeira degradada por caruncho pequeno. No entanto, esta técnica só deve ser considerada no estudo de madeira degradada de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por carunchos pequenos (família Anobiidae) e considerando todos os procedimentos de ensaio descritos anteriormente.

## 7. CONCLUSÕES

### 7.1. Considerações finais

A madeira, apesar de ser um material de construção tradicional, continua a possuir um comportamento de certa forma desconhecido para muitos dos intervenientes no processo de construção e de reabilitação, quer devido à grande diversidade de espécies florestais existentes, quer pelo facto de, tratando-se de um material natural, estar sujeito a variações consideráveis nas suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Para além disso, a madeira pode ser sujeita a degradação devido à ação de agentes biológicos, o que faz com que as suas propriedades resistentes diminuam ao longo do tempo e a análise estrutural se torne mais complexa. No que diz respeito à normalização, esta é quase inexistente em relação à regulação de intervenções em estruturas de madeira. Todos estes aspetos tornam a avaliação das propriedades mecânicas dos elementos estruturais de madeira muito difícil. No caso de estruturas antigas de madeira, com interesse histórico, a avaliação da segurança existente torna-se ainda mais complexa, na medida em que, usualmente, não é possível a recolha de amostras *in situ* da estrutura para a realização de ensaios diretos de caracterização mecânica. Nestes casos, normalmente, a abordagem é a de se atribuir valores médios de propriedades mecânicas para esses elementos, com base numa classificação visual, ou recorrer-se a ensaios não destrutivos ou semi destrutivos (se possível) *in situ* de avaliação da qualidade da madeira. No entanto, tais procedimentos de avaliação ainda são limitados. O objetivo principal da presente dissertação foi o de se desenvolver um modelo, com base em elementos de madeira degradados devido à ação de carunchos pequenos, que fosse representativo do nível de degradação existente num determinado elemento estrutural, podendo, no fim, concluir-se sobre a qualidade da madeira existente e, conseqüentemente, sobre a segurança estrutural.

Os capítulos 2 e 3 são, fundamentalmente, capítulos de revisão teórica. O capítulo 2 apresentou a madeira como material de construção, enquanto que o capítulo 3 se referiu à degradação da madeira.

O capítulo 4, primeiro capítulo relativo ao trabalho experimental, teve como objetivo principal a avaliação do impacto de carunchos pequenos nas propriedades mecânicas de estruturas antigas de madeira. A extensa campanha experimental realizada em 216 provetes permitiu avaliar as propriedades mecânicas de provetes com degradação natural e com degradação artificial. O objetivo da degradação artificial foi o de, conhecendo-se a perda de massa volúmica destes provetes, resultante da “degradação”, obter-se valores de resistências nos ensaios mecânicos que fossem semelhantes aos obtidos para os provetes com degradação natural. Se isto fosse possível, uma correlação seria estabelecida entre um qualquer parâmetro de avaliação mecânica e a perda total de massa volúmica, para os provetes com degradação artificial. Esta correlação seria, mais tarde, generalizada para os provetes com degradação natural. Concluiu-se que, os provetes com degradação artificial apresentaram valores médios de resistência significativamente superiores aos provetes com degradação natural. Este facto comprova que a simulação da degradação não foi bem conseguida, mas também que a degradação existente num dado elemento de madeira não deve ser generalizada a partir da degradação superficial que este apresenta, uma vez que a intensidade das galerias no interior da madeira tende a ser muito maior que aquela existente à superfície. No entanto, obtiveram-se boas correlações entre os valores de resistência obtidos e a massa volúmica, para os provetes com degradação artificial, o que sugere que este fator é de extrema importância para a avaliação da segurança estrutural existente.

No capítulo 5, prosseguiu-se com o estudo do capítulo anterior, na tentativa de se conhecer o valor da perda de massa volúmica decorrente do processo de degradação da madeira devido a uma infestação por carunchos pequenos. Para esse efeito, recorreu-se à técnica de micro tomografia computadorizada. Com o recurso a esta técnica não destrutiva, é possível, para uma dada amostra de madeira degradada, conhecer-se a percentagem de material perdido (consumido pelos carunchos). Uma vez que se conheça este parâmetro, é possível a obtenção dos valores de massa volúmica original e residual e, conseqüentemente, a perda de massa volúmica. Realizaram-se 18 tomografias e definiram-se 3 algoritmos de análise de informação. Correlacionaram-se os resultados obtidos (percentagem de material perdido) com a massa volúmica original e residual para cada uma das amostras, tendo-se obtido boas correlações. Concluiu-se que é possível quantificar-se a percentagem de material perdido utilizando a técnica de micro-CT, apesar da existência de erros, impossíveis de serem eliminados por completo, durante toda a metodologia de análise dos resultados. Concluiu-se, também, que as percentagens de material perdido foram superiores ao que era expectável, o que reforça a importância da avaliação do impacto da ação de carunchos pequenos em estruturas de madeira. Para além do objetivo principal deste capítulo, que consistiu na determinação da percentagem de material perdido, procurou-se, ainda, melhorar a eficiência da micro-CT ao estudo da madeira, ao descrever-se e

apresentar-se as várias opções tomadas ao longo do estudo. Os resultados obtidos sugeriram a possibilidade da continuação do estudo.

O capítulo 6, último capítulo experimental, teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma técnica de avaliação *in situ* de madeira degradada por caruncho pequeno. Para se cumprir este objetivo, realizaram-se ensaios de arrancamento “*in situ*” na peça de madeira, antes de esta ser cortada em provetes que viriam a ser analisados em micro-CT, e ensaios de corte paralelo às fibras. Para além disso, utilizaram-se os resultados para a massa volúmica original e residual, determinados no capítulo 5. Correlacionaram-se os resultados obtidos para os ensaios de arrancamento e de corte com a perda de massa volúmica. Propôs-se um modelo de avaliação de madeira degradada por carunchos pequenos com base na realização de um ensaio de arrancamento do parafuso *in situ* para pinho bravo. Com a aplicação deste modelo é possível concluir-se sobre a resistência residual dos elementos da estrutura.

### 7.2. Desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido na presente dissertação de mestrado permitiu obter um método de avaliação *in situ* da resistência residual de elementos de madeira degradados devido à ação de caruncho pequeno. Apesar de se terem obtido bons resultados, este método foi desenvolvido em laboratório, com recurso a uma máquina de ensaios universal, para aplicação *in situ*, pelo que será importante a realização de uma campanha experimental mais abrangente para a validação do modelo proposto. Para isso, deve recorrer-se a um dos equipamentos portáteis disponíveis e referenciados na secção 6.4.1. do Capítulo 6.

Pode, ainda, obter-se novas correlações para a aplicação da técnica a outras espécies de madeira, como por exemplo para o castanho (*Castanea sativa* Mill.) ou até mesmo à degradação por térmitas de madeira seca. Deve, também, estudar-se a possibilidade e vantagens da aplicação da técnica de tomografia computadorizada (CT) a elementos de madeira degradados por insetos de madeira seca.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appleton, J.** (2003) Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e tecnologias de intervenção. Lisboa, Edições ORION.
- Baird, E., Taylor, G.** (2017) X-ray micro-computed tomography. *Current Biology Magazine* 27, 283-293. Doi: 10.1016/j.cub.2017.01.066.
- Bardet, M., Foray, M. F., Maron, S., Gonçalves P., Trãn Q. K.** (2004) Characterization of wood components of Portuguese medieval dugout canoes with high-resolution solid-state NMR. *Carbohydrate Polymers* 57(4), 419-424. Doi: 10.1016/j.carbpol.2004.05.012.
- Berry, R. W.** (1994) Remedial treatment of wood rot and insect attack in buildings. Watford, Building Research Establishment.
- Bignell, D. E., Eggleton, P.** (2000) Termites in ecosystems. In T. Abe, M. Higashi, D. E. Bignell, Termites, Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands.
- Borges, L. M. S., Valente, A. A., Palma, P., Nunes, L.** (2010) Changes in the wood boring community in the Tagus Estuary: a case study. *Marine Biodiversity Records* 3, 1-7. Doi: 10.1017/S1755267210000370.
- Bravery, A. F., Berry, R. W., Carey, J. K., Cooper, D. E.** (1992) Recognising wood rot and insects damage in buildings. Garston, Building Research Establishment.
- Brozovsky, J., Brozovsky, J. J., Zach, J.** (2008) An assessment of the condition of timber structures. 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem, Israel.
- BS EN 1382** (1999) Timber structures – Test methods: Withdrawal capacity of timber fasteners, British Standard, BSI, London.
- Cachim, P.** (2007) Construções em Madeira – A madeira como material de construção. Porto, Publindústria.
- Campbell, G. M., Sophocleous, A.** (2014) Quantitative analyses of bone and soft tissue by micro-computed tomography: applications to *ex vivo* and *in vivo* studies. *BoneKey Reports* 3, 564. Doi: 10.1038/bonekey.2014.59.
- Carvalho, A.** (1996) Madeiras Portuguesas. Direção-Geral das Florestas, Lisboa.
- Charles, F., Coston-Guarini, J., Guarini, J., Lantoine, F.** (2018) It's what's inside that counts: computer-aided tomography for evaluating the rate and extent of wood consumption by shipworms. *Journal of Wood Science*. Doi:10.1007/s10086-018-1716-x.
- Cirillo, M. A., Ferreira, D. F.** (2003) Extensão do teste para normalidade univariado baseado no coeficiente de correlação quantil-quantil para o caso multivariado. *Revista de Matemática e Estatística* 21(3), 67-84.
- Conde, M. J., Liñán, C. R., Rubio de Hita, P. R.** (2014) Use of ultrasound as a non-destructive evaluation technique for sustainable interventions on wooden structures. *Building and Environment* 82, 247-257. Doi: 10.1016/j.buildenv.2014.07.022.
- Cruz, H., Machado, J. S., Nunes, L.** (1994) Problemas de conservação de madeira em edifícios. 2º encontro – Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios. LNEC 301-312, Lisboa.
- Cruz, H.** (2009) Importância das fendas em estruturas de madeira. *Construção Magazine*. Publíndustria 30, 35-36, Lisboa.
- Cruz, H., Nunes, L.** (2012) Madeira, pp. 629-661. In F. Margarido, M. Clara Gonçalves [eds.], Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. IST Press, Lisboa.
- Cruz, H.** (2012) Proteção ao fogo de estruturas de madeira. *Construção Magazine* 51, 48-49.
- Cruz, H., Machado, J. S.** (2013) Effects of beetle attack on bending and compression strength properties of pine wood. *Advanced Materials Research* 778, 145-151. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.145.
- Cruz, H., Jones, D., Nunes, L.** (2015) Wood, pp 557-583. In F. Margarido, M. Clara Gonçalves [eds.], Materials for Construction and Civil Engineering. Springer International Publishing Switzerland.
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., Lourenço, P. B.** (2015) Guidelines for on-site assessment of historic timber structures. *International Journal of Architectural Heritage*. 9:3, 277-289. Doi: 10.1080/15583058.2013.774070.
- Cunha, C.** (2017) Caracterização das propriedades de madeiras africanas, Câmbala e Sapelli. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT NOVA, Monte da Caparica.
- Del Lungo, A., Ball, J., Carle, J.** (2006) Global planted forests thematic study: results and analysis. Report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Divos, F., Sismandy, F., Takats, P.** (2011) Evaluation of historical wooden using non-destructive methods. *Proceedings of the International Conference on Structural Assessment of Timber Structures (SHATIS)*, Lisbon.
- Du Plessis, A., Broeckhoven, C., Guelpa, A., Gerard le Roux, S.** (2017) Laboratory x-ray micro-computed tomography: a user guideline for biological samples. *Gigascience* 6, 1-11. Doi: 10.1093/gigascience/gix027.
- Durán A. F.** (2003) Manual – La Construcción de Vivendas de Madera. CORMA, Corporacion Chilena de la Madera, Chile.
- Eaton, R. A., Hale, M. D. C.** (1993) Wood: Decay, Pests and Protection. Chapman & Hall, London.
- EN 1995-1-1** (2004) – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. CEN, Brussels (e AC:2009).
- EN 1995-1-2** (2004) – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural Fire Design. CEN, Brussels (e AC:2009).
- EN 338** (2009) Structural timber – Strength classes, European Standard. CEN, Brussels.
- EN 408** (2010) Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties, European Standard, CEN, Brussels.
- EN 1912** (2012) Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species, European Standard. CEN, Brussels (e AC: 2013).
- EN 335** (2013) Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products, European Standard. CEN, Brussels.
- EN 350** (2016) Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials, European Standard. CEN, Brussels.
- EN 384** (2016) Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density, European Standard. CEN, Brussels.
- EN 14081** (2005) Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements, European Standard. CEN, Brussels (e AC:2016).
- Ewart, D., Nunes, L., Troya, T., Kutnik, M.** (2017) Termites and changing climate, pp 80-94. In Dhang, P. [ed.], Climate change and impacts on urban pests. CAB International, Preston, UK.
- Feio, A., Machado, J. S.** (2015) *In-situ* assessment of timber structural elements: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods – A review. *Construction and Building Materials* 101, 381-388. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.123.
- Ferreira, M. T., Borges, P. A. V., Nunes, L., Myles, O., Guerreiro, O., Scheffrahn, R. H.** (2013) Termites (Isoptera) in the Azores: an overview of the four invasive species currently present in the archipelago. *Arquipelago – Life and Marine Sciences* 30, 39-55.
- Foliente, G. C., Leicester, R. H., Wang, C., Mackenzie, C., Colin, E., Cole, I. S.** (2002) Durability design for wood construction. *Forest Products Journal* 52(1), 10-19.
- Fuchs, A., Schreyer, A., Feuerbach, S., Korb, J.** (2004) A new technique for termite monitoring using computer tomography and endoscopy. *International Journal of Pest Management* 50, 63-66. Doi: 10.1080/0967087032000159300.
- Freitas, V.** (2012) Manual de apoio ao projeto de reabilitação de edifícios antigos. Ordem dos Engenheiros da Região Norte, Porto.
- Gilfillan, J. R., Gilbert, S. G.** (2001) Development of a technique to measure the residual strength of woodworm infested timber. *Construction and Building Materials* 15, 381-388. Doi: 10.1016/S0950-0618(01)00004-6.
- Glass, S. V., Zelinka, S. L.** (2011) Moisture Relations and Physical Properties of Wood, pp. 4-1;4-19. In R. J. Ross [ed.], Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Forest Products Society, USA.
- Gominho, J., Knapic, S., Pereira, H.** (2004) Cerne e Borne – Fatores de variação da qualidade tecnológica das árvores. Centro de Estudos Florestais, ISA-UL, Lisboa.
- Henriques, M.** (2011) Tratamento e consolidação de madeira de pinho degradada em elementos estruturais de edifícios antigos. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, IST-UL, Lisboa.
- Henriques, D., Brito, J., Duarte, S., Nunes, L.** (2014) Consolidating preservative-treated wood: Combined mechanical performance of boron and polymeric products in wood degraded by *Coniophora puteana*. *Journal of Cultural Heritage* 15(1), 10-17. Doi: 10.1016/j.culher.2012.11.008.

- Himmi, S., Yoshimura, T., Yanase, Y., Mori, T., Torigoe, T., Imazu, S. (2016) Wood anatomical selectivity of drywood termite in the nest-gallery establishment revealed by X-ray tomography. *Wood Science Technology* 50, 631-643. Doi: 10.1007/s00226-016-0800-x.
- Humphries, C. J., Sutton, J. R. (1996) Árvores de Portugal e Europa. Fundo para a Protecção dos Animais Selvagens (FAPAS). Câmara Municipal do Porto, Porto.
- ICNF (2013) IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa.
- INE (2007) Estatísticas da Construção e Habitação 2006. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
- INE (2017) Estatísticas da Construção e Habitação 2016. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
- Íñiguez, G., Arriaga, F., Esteban, M., Bobadilla, I., González, C., Martínez, R. (2010) In-situ non-destructive density estimation for the assessment of existing timber structures. *10th World Conference on Timber Engineering*, Trento, Italy.
- ISO 3129 (2012) Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens, International Organization for Standardization, Genebra, Suíça.
- ISO 13061-1 (2014) Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests, International Organization for Standardization, Genebra, Suíça.
- Kasal, B., Anthony, R. W. (2004) Advances *in situ* evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials* 6(2), 94-103. Doi: 10.1002/pse.170.
- Kigawa, R., Torigoe, T., Imazu, S., Honda, M., Harada, M., Komine, Y., Kawanobe, W. (2009) Detection of insects in wooden objects by X-ray CT scanner. *Science for Conservation* 48, 223-231.
- Kloiber, M., Drdácý, M., Machado, J. S., Piazza, M., Yamagushi, N. (2015) Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods: A review. *Construction and Building Materials* 101, 1215-1234. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.134.
- Kraus, M. (2017) Assessment of carrying capacity of timber element using SBRA method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245. Doi: 10.1088/1757-899X/245/2/022008.
- Kretschmann, D. E. (2011) Commercial Lumber, Round Timbers, and Ties, pp. 6-1;6-25. In R. J. Ross [ed.], *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Forest Products Society, USA.
- Lee, K. E., Wood, T. G. (1971) *Termites and soils*. 251 pp, Academic Press, London.
- Llana, D., Hermoso, E., Bobadilla, I., Íñiguez-Gonzalez, G. (2018) Influence of moisture content on the results of penetration and withdrawal resistance measurements on softwoods. *Holzforschung* 72, 549-555. Doi: 10.1515/hf-2017-0133.
- Leicester, R. H. (2001) Engineered durability for timber construction. *Progress in Structural Engineering Materials* 3, 216-227. Doi: 10.1002/pse.72.
- Leotti, V. B., Birck, A. R., Riboldi, J. (2005) Comparação dos testes de aderência à normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronómica e a 50º Reunião Annual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Anais. Londrina, PR, Brasil.
- LNEC (1995) Terminologia de madeiras. Especificação E31, Lisboa.
- LNEC (1997) Revestimentos por pintura de madeiras para exteriors. Madeira para Construção – Memória M10, LNEC, Lisboa.
- Lopes, M., Branco, V., Soares, J. (2013) Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. *Transportes* 21, 59-66.
- Machado, J. S., Dias, A., Cruz, H., Custódio, J., Palma, P. (2009) Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira. Verlag Dashofer, Lisboa.
- Machado, J. S., Palma, P. (2011) Non-destructive evaluation of the bending behaviour of in-service pine timber structural elements. *Materials and Structures* 44, 901-910. Doi: 10.1617/s11527-010-9674-9.
- Maldonado, I. B., Herrero, M. E., González, G. I., Martitegui, F. A., Montesinos, D. B., Monteagudo, J. P. (2007) Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del modulo de elasticidade. *Informes de la Construcción* 59, 506, 107-116.

- Maurício, A., Figueiredo, C., Alves, C., Pereira, M. F. C., Aires-Barros, L., Neto, J. A. N.** (2010) Microtomography-based pore structure modelling of geologic materials used as building and dimension stones. *Materials Science Forum* 136-137, 1306-1312. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.1306.
- Maurício, A., Pereira, M. F. C., Flores-Colen, I., Silva, L., Fontes, A.** (2012) Microtomografia computadorizada de raios X aplicada ao estudo de argamassas. Congresso APFAC, Coimbra.
- Mateus, T.** (1961) Bases para o dimensionamento de Estruturas de Madeira, Bertrand (Irmãos) Lda., Lisboa.
- Mateus, T.** (1978) M500 – O emprego da madeira de pinho bravo em estruturas, LNEC, Lisboa.
- Mendes, S., Henriques, D., Alves, F.** (2018) Propriedades mecânicas de madeira degradada por caruncho em edifícios antigos: uma análise experimental. *Conservar Património* 28. Doi: 10.1458/cp2017023.
- Negrão, J., Faria, A.** (2009) Projecto de Estruturas de Madeira, Publindústria, Porto.
- NP 180** (1962) Anomalias e defeitos da madeira, Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.
- NP 618** (1973) Ensaio de compressão axial, Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.
- NP 614** (1973) Madeiras. Determinação do teor em água, Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.
- NP 616** (1973) Madeiras. Definição da massa volúmica, Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.
- NP 623** (1973) Madeiras. Ensaio de corte, Norma Portuguesa, IGPAL, Lisboa.
- NP 460** (1995) Durabilidade da madeira e de produtos derivados, Norma Portuguesa, IPQ, Monte da Caparica.
- NP 4305** (1995) Madeira serrada de pinho bravo para estruturas. Classificação Visual, IPQ, Monte da Caparica.
- Nunes, L., Cruz, H., Machado, J. S.** (1990) Patologias e reabilitação de estruturas de madeira – Avaliação da degradação causada por agentes biológicos. 2ª Jornadas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa.
- Nunes, L., Cruz, H., Fragoso, M., Nobre, T., Machado, J. S., Soares, A.** (2005) Impact of drywood termites in the island of Azores. IABSE Symposium, Lisboa.
- Nunes, L.** (2006) Presença de térmitas na madeira aplicada na construção. *Revista Pedra&Cal* 29, 10-12.
- Nunes, L.** (2008) Termite infestation risk in Portuguese historic buildings. Cost Action IE0601 Wood Science for Conservation of Cultural Heritage. Braga, Portugal.
- Nunes, L.** (2013) Bases para a monitorização do risco de degradação na construção de casas de madeira, pp. 29-38. In P. Lourenço, J. Branco, H. Cruz, L. Nunes [eds.], Casas de Madeira, Seminário LNEC, Lisboa.
- Nunes, L., Parracha, J. L., Faria, P., Palma, P., Maurício, A., Pereira, M. F. C.** (2019) Towards an assessment tool of anobiid damage of pine timber structures. IABSE Symposium, Guimarães.
- Otzuna, D., Elhan, A. H., Tuccar, E.** (2006) Investigation of four different normality tests in terms of type I error rate and power under different distributions. *Journal of Medicine Cincinnati* 36(3), 171-176.
- Parkinson, I. H., Badieli, A., Fazzalari, N. L.** (2008) Variation in segmentation of bone from micro-CT imaging: implications for quantitative morphometrics analysis. *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine* 31, 160-164.
- Parracha, J. L., Duarte, S., Faria, P., Nunes, L.** (2018) A importância dos insetos de madeira seca na reabilitação de estruturas de madeira. C2018 – reabilitar e construir de forma sustentável, Porto.
- Pearce, M. J.** (1997) Termites: Biology and pest management. 293 pp. CAB International.
- Pfeil, M., Pfeil, W.** (2003) Estruturas de Madeira. LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.
- Pinheiro, A. C., Oliveira, B. P., Veríssimo, C., Brandão, J. C., Rosado, L., Jurado, V., Macedo, M. F.** (2013) Identification of a fungal community on gilded wood carved heritage. *Journal of Cultural Heritage* 14(1), 76-81. Doi: 10.1016/j.culher.2012.03.008.
- Rajczakowska, M., Stefaniuk, D., Lydzba, D.** (2015) Microstructure characterization by means of x-ray micro-CT and nanoindentation measurements. *Studia Geotechnica et Mechanica* 31(1), 75-83.
- Richardson, D. M.** (1998) Ecology and biogeography of *Pinus*. Department of Conservation. South Island Wilding Conifer Strategy, New Zealand. Doi: 10.1515/sgem-2015-0009.
- Ridout, B.** (2000) Timber decay in buildings – The conservation approach to treatment. English Heritage, Historic Scotland, London.

- Rozenbaum, O., Bergounioux, M., Maurício, A., Figueiredo, C., Alves, C., Barbanson, L.** (2016) Versatile three-dimensional denoising and segmentation method of X-ray tomographic images: applications to geomaterials characterizations. Hal-01255507.
- Santos, J. A.** (2007) Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães.
- Sardinha, A. M.** (1988) Ciência e tecnologia dos materiais – Capítulo III. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Singhal, A., Grande, J. C., Zhou, Z.** (2013) Micro/nano CT for visualization of internal structures. *Microscopy Today* 21(2), 16-22. Doi: 10.1017/S1551929513000035.
- Stock, S. R.** (2009) MicroComputed tomography: methodology and applications, Boca Raton, CRC Press.
- Taanert, T., Anthony, R. W., Kasal, B., Kloiber, M., Piazza, M., Riggio, M., Rinn, F., Widmann, R., Yamagushi, N.** (2014) In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures* 47, 767-785. Doi: 10.1617/s11527-013-0094-5.
- Trusty, W. B., Meil, J. K.** (1999) Building life cycle assessment: residential case study. AIA Conference Proceedings, Chattanooga.
- UNI 11119** (2004) Cultural heritage – Wooden artefacts. Load-bearing structures. On site inspections for the diagnosis of timber members, Italian Standard. UNI, Milan.
- Van de Kuilen, J. W. G.** (2007) Service life modelling of timber structures. *Materials and Structures* 40, 151-161. Doi: 10.1617/s11527-006-9158-0.
- Viitanen, H., Ritschkoff, A., Paajanen, L.** (2002) The durability of different wood products. European Timber Buildings as an Expression of Technological and Technical Cultures.
- Weaver, M.** (1997) Conserving buildings – A Manual of techniques and materials. Preservation Press, USA.
- Wiedenhoeft, A.** (2011) Structure and Function of Wood, pp. 3-1;3-18. In R. J. Ross [ed.], Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Forest Products Society, USA.
- Winandy, J. E., Lebow, P. K., Nelson, W.** (1998) Predicting bending strength of fire-retardant-treated plywood from screw-withdrawal tests, FPL-RP-568. *Forest Products Laboratory*, Madison.
- Yamagushi, N.** (2010) Screw resistance, pp. 81-86. In B. Kasal and T. Tannert [eds.], *In Situ Assessment of Structural Timber*. RILEM, Springer. Doi: 10.1007/978-94-007-0560-9.
- Yamagushi, N., Nakao, M.** (2015) In-situ assessment method for timbers based on shear strengths predicted with screw withdrawals. *Wiadomosci Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 44, 109-115. Doi: 10.17425/WK43ASSESSMENT.
- www1** – <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2007/02madeira-um-material-construtivo.html> (2018-04-17).
- www2** – <http://sostermitas.angra.uac.pt/> (2018-04-16).
- www3** – [http://eol.org/data\\_objects/24980689](http://eol.org/data_objects/24980689) (2018-02-23).
- www4** – <http://www.kaefer-der-welt.de/index.htm> (2018-02-23).
- www5** – [http://www.ces-csiro.au/aicn/system/c\\_517.htm](http://www.ces-csiro.au/aicn/system/c_517.htm) (2018-02-23).



## ANEXOS

## I. Resultados detalhados do capítulo 4

Tabela I.1 – Número de orifícios de saída por peça (PN)

Peça 1	Troço					Total	Peça 2	Troço					Total										
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5											
Face	1	15	16	9	9	6	Face	1	14	13	18	33	31	875									
		11	11	9	6	4		96	9	23	35	29	14		219								
	2	5	14	8	12	15		2	16	18	18	15	11		228								
		14	13	17	7	6		111	21	28	39	29	33		222								
3	12	17	18	16	14	136	3	17	13	14	29	16	222										
		5	15	11	18			10	27	28	29	31		18									
4	17	21	19	14	12	125	4	15	16	22	24	31	206										
		14	9	6	9			4	19	20	21	23		15									
						93	116	97	91	71													
						468							138	159	196	213	169						
						468							875										

Peça 3	Troço					Total										
	1	2	3	4	5											
Face	1	95	50	50	75	50	Face	1	46	47	50	39	31	2195		
		46	47	50	39	31		533	2	39	70	80	38		30	506
	2	39	70	80	38	30		2	60	39	38	52	60		575	
		60	39	38	52	60		3	43	68	45	40	51		575	
3	43	68	45	40	51	575	3	54	64	94	84	32	581			
		54	64	94	84			32	4	51	44	65		52	51	581
4	51	44	65	52	51	581	4	59	74	72	63	50	2195			
		59	74	72	63			50	447	456	494	443		355		
						447	456	494	443	355						
						2195										

Tabela I.2 – Número total de orifícios de saída nas faces exteriores das peças (PN)

Peça	Secção				
	1	2	3	4	5
1	93	116	97	91	71
2	138	159	196	213	169
3	447	456	494	443	355

Tabela I.3 – Dimensões, teores de água, massas e massas volúmicas para os 136 provetes (PA)

Peça	Dimensões			Volume	Massa	Massa Volúmica	Teor em água	Massa (seca)	Massa (12%)	Massa Volúmica (12%)
	L	a	b							
[n.º]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm³]	[g]	[kg/m³]	[%]	[g]	[g]	[kg/m³]
1	10,14	5,00	4,94	250,2	125,0	499,4	11,0	112,6	126,1	503,9
2	10,13	4,99	5,04	254,9	130,8	513,2	10,0	118,9	133,2	522,5
3	10,12	4,98	5,03	253,8	146,3	576,4	13,0	129,5	145,0	571,3
4	10,14	5,02	5,00	254,0	123,2	485,0	10,0	112,0	125,4	493,9
5	10,09	5,02	4,99	252,9	143,7	568,4	13,0	127,2	142,5	563,4
6	10,13	4,98	5,00	252,0	157,5	624,9	14,0	138,1	154,7	614,0
7	10,12	5,00	4,99	252,6	147,0	582,0	12,0	131,3	147,0	582,0
8	10,11	4,99	4,98	251,4	143,1	569,0	12,0	127,7	143,1	569,0
9	10,13	5,05	5,00	255,4	161,3	631,7	13,0	142,8	159,9	626,1
10	10,14	5,02	4,99	253,9	153,5	604,5	12,0	137,0	153,5	604,5
11	10,14	4,93	4,93	246,3	159,4	647,2	14,0	139,8	156,6	635,9
12	10,14	5,00	5,02	254,6	123,6	485,4	9,5	112,9	126,4	496,5

## ANEXOS

Peça	Dimensões			Volume	Massa	Massa Volúmica	Teor em água	Massa (seca)	Massa (12%)	Massa Volúmica (12%)
	L	a	b							
[n.º]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm³]	[g]	[kg/m³]	[%]	[g]	[g]	[kg/m³]
13	10,14	4,94	4,99	250,0	129,3	517,3	10,0	117,6	131,7	526,7
14	10,13	5,08	4,96	255,4	162,3	635,5	13,0	143,7	160,9	629,9
15	10,13	5,02	4,98	253,2	153,2	605,0	13,0	135,6	151,8	599,7
16	10,14	5,02	4,99	253,5	151,8	598,8	13,0	134,4	150,5	593,5
17	10,14	4,96	4,97	249,5	161,6	647,5	14,5	141,1	158,0	633,3
18	10,12	4,96	4,99	250,7	158,9	634,0	14,0	139,4	156,1	622,8
19	10,14	4,99	4,96	250,9	127,9	509,8	11,0	115,2	129,1	514,4
20	10,14	5,00	5,01	254,0	150,4	592,0	12,0	134,3	150,4	592,0
21	10,13	4,96	4,99	251,0	150,4	599,4	14,0	132,0	147,8	588,9
22	10,18	4,99	4,87	247,5	119,6	483,1	10,0	108,7	121,7	491,9
23	10,13	4,99	5,07	256,0	147,3	575,4	12,0	131,5	147,3	575,4
24	10,14	4,96	4,99	250,8	159,7	636,7	14,0	140,1	156,9	625,6
25	10,15	4,92	4,99	249,2	117,2	470,2	10,0	106,5	119,3	478,8
26	10,15	4,94	4,98	249,7	118,3	473,6	10,5	107,0	119,9	480,1
27	10,15	5,05	4,93	252,4	141,0	558,5	12,0	125,9	141,0	558,5
28	10,13	5,00	5,00	253,3	120,6	476,1	10,0	109,6	122,8	484,8
29	10,14	5,02	5,00	254,5	124,7	490,1	10,0	113,4	127,0	499,0
30	10,14	4,98	4,97	251,4	119,9	476,9	10,0	109,0	122,1	485,6
31	10,14	5,05	5,00	256,3	160,4	626,0	12,0	143,3	160,4	626,0
32	10,14	4,94	4,99	250,2	128,3	512,7	11,5	115,0	128,8	515,0
33	10,14	4,99	4,96	250,6	128,8	513,8	11,0	116,0	129,9	518,4
34	10,14	4,99	5,00	253,0	161,0	636,4	14,0	141,2	158,2	625,2
35	10,08	4,98	5,00	250,9	158,8	632,9	13,0	140,5	157,4	627,3
36	10,14	4,93	5,05	252,4	122,4	485,1	10,0	111,3	124,6	493,9
37	10,11	5,00	5,04	254,6	160,7	631,1	13,0	142,2	159,3	625,5
38	10,15	5,00	4,94	250,6	153,1	610,9	13,0	135,5	151,8	605,5
39	10,15	4,98	4,97	250,7	169,4	675,7	14,5	148,0	165,7	661,0
40	10,18	5,01	5,00	255,1	153,2	600,5	13,5	135,0	151,2	592,6
41	10,10	5,07	5,00	256,0	124,5	486,5	11,0	112,2	125,7	490,9
42	10,13	4,99	4,95	250,3	165,4	660,6	14,5	144,4	161,8	646,1
43	10,13	4,97	5,02	252,6	157,4	623,0	13,5	138,7	155,3	614,8
44	10,14	4,99	5,02	253,9	158,4	623,9	13,5	139,5	156,3	615,6
45	10,12	4,99	5,00	252,7	145,7	576,7	12,0	130,1	145,7	576,7
46	10,15	4,96	5,02	252,9	153,3	606,0	13,0	135,7	151,9	600,7
47	10,14	5,05	5,00	256,3	124,9	487,2	16,0	107,7	120,6	470,4
48	10,14	4,99	4,95	250,2	128,8	514,9	11,5	115,5	129,4	517,2
49	10,15	4,96	4,98	250,9	138,8	553,4	11,5	124,5	139,5	555,8
50	10,16	4,96	5,01	252,6	153,4	607,1	13,5	135,1	151,3	599,1
51	10,14	5,00	4,99	252,8	156,5	618,9	13,5	137,9	154,4	610,7
52	10,14	5,00	4,99	253,0	163,5	646,3	14,0	143,4	160,6	634,9
53	10,13	5,02	4,97	252,9	148,6	587,5	13,0	131,5	147,2	582,3
54	10,15	5,00	4,98	252,7	149,4	591,3	13,5	131,6	147,4	583,5
55	10,16	4,96	5,00	251,7	149,1	592,5	13,5	131,4	147,2	584,6
56	10,15	4,99	4,93	249,3	127,0	509,4	11,0	114,4	128,1	513,9
57	10,15	4,99	4,99	253,0	126,9	501,4	11,0	114,3	128,0	505,9
58	10,10	5,00	5,04	254,4	119,5	469,7	10,0	108,7	121,7	478,3
59	10,05	4,94	4,87	241,8	152,3	630,0	13,0	134,8	151,0	624,4
60	10,05	4,96	4,73	235,8	158,5	672,1	14,5	138,4	155,0	657,4
61	10,05	4,93	4,82	238,8	149,6	626,6	13,5	131,8	147,7	618,3

Peça	Dimensões			Volume	Massa	Massa Volúmica	Teor em água	Massa (seca)	Massa (12%)	Massa Volúmica (12%)
	L	A	b							
[n.º]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm³]	[g]	[kg/m³]	[%]	[g]	[g]	[kg/m³]
62	10,03	4,93	4,87	240,8	147,7	613,4	13,5	130,1	145,8	605,3
63	10,05	4,93	4,89	242,3	150,0	619,3	13,0	132,8	148,7	613,8
64	10,05	4,88	4,86	238,4	130,8	548,7	11,5	117,3	131,4	551,2
65	10,05	4,90	4,86	239,3	134,4	561,6	12,0	120,0	134,4	561,6
66	10,07	4,93	4,91	243,8	145,8	598,3	13,0	129,1	144,5	593,0
67	10,03	4,93	4,87	240,8	149,3	620,1	13,0	132,1	148,0	614,6
69	10,04	4,93	4,92	243,5	143,5	589,3	13,0	127,0	142,2	584,1
70	10,06	4,89	4,87	239,6	135,5	565,7	12,5	120,5	134,9	563,2
71	10,05	4,96	4,96	247,2	148,1	598,8	12,5	131,6	147,4	596,1
72	10,06	4,94	4,74	235,6	158,7	673,5	14,5	138,6	155,2	658,8
73	10,05	4,96	4,92	245,3	150,4	613,3	13,5	132,5	148,4	605,2
74	10,05	4,87	4,85	237,4	131,2	552,8	12,0	117,2	131,2	552,8
75	10,05	4,87	4,87	238,4	134,5	564,1	13,0	119,0	133,3	559,1
76	10,05	4,96	4,92	245,3	152,4	621,3	13,5	134,2	150,4	613,1
77	10,05	4,97	4,94	246,7	151,7	614,6	13,0	134,2	150,3	609,2
78	10,05	4,94	4,74	235,3	158,4	673,2	14,5	138,4	155,0	658,5
79	10,05	4,88	4,86	233,4	138,4	592,7	13,0	122,4	137,1	587,4
80	10,05	4,97	4,91	245,2	145,0	591,2	13,5	127,7	143,1	583,4
81	10,03	4,97	4,94	246,3	125,6	510,1	11,0	113,2	126,8	514,7
82	10,05	4,89	4,87	239,3	167,1	698,3	15,0	145,3	162,8	680,1
83	10,03	4,88	4,85	237,4	131,0	551,9	12,0	117,0	131,0	551,9
84	10,05	4,94	4,90	243,3	149,3	613,6	13,5	131,5	147,3	605,4
85	10,05	4,87	4,87	238,4	131,3	550,8	11,5	117,7	131,9	553,3
86	10,04	4,87	4,77	233,2	138,5	593,7	13,0	122,5	137,2	588,4
87	10,05	4,87	4,87	238,4	132,1	554,2	11,5	118,5	132,7	556,7
88	10,07	4,87	4,87	238,8	133,8	560,0	13,0	118,4	132,6	555,1
89	10,05	4,96	4,95	246,7	132,6	537,4	11,0	119,5	133,8	542,3
90	10,05	4,90	4,85	238,8	165,9	694,4	15,0	144,2	161,5	676,3
91	10,05	4,92	4,84	239,3	162,6	679,6	15,5	140,8	157,7	659,0
92	10,03	4,90	4,77	234,4	136,8	583,6	13,0	121,1	135,6	578,5
93	10,06	4,93	4,89	242,5	128,7	530,6	12,0	114,9	128,7	530,6
94	10,06	4,97	4,96	248,0	125,7	506,8	11,0	113,2	126,8	511,3
95	10,02	4,89	4,78	234,2	137,0	585,0	13,0	121,3	135,8	579,9
96	10,05	4,90	4,88	240,3	128,9	536,3	12,0	115,1	128,9	536,3
97	10,02	4,89	4,77	233,7	136,9	585,8	12,5	121,7	136,3	583,2
98	10,05	4,88	4,88	239,3	134,4	561,5	12,5	119,4	133,8	559,0
99	10,05	4,99	4,95	248,2	123,5	497,7	10,5	111,8	125,2	504,4
100	10,02	4,96	4,95	246,0	147,0	597,5	12,0	131,3	147,0	597,5
101	10,04	4,90	4,85	238,6	132,5	555,3	11,5	118,8	133,1	557,8
102	10,05	4,93	4,85	240,3	153,4	638,2	13,0	135,7	152,0	632,6
103	10,07	4,92	4,80	237,8	137,1	576,5	11,5	123,0	137,7	579,0
104	10,04	4,91	4,77	235,1	136,6	581,0	12,0	122,0	136,6	581,0
105	10,05	4,88	4,88	239,3	135,6	566,7	12,0	121,1	135,6	566,7
106	10,03	4,92	4,92	242,8	133,9	551,7	11,5	120,1	134,5	554,1
107	10,04	4,96	4,94	246,0	123,0	500,0	10,0	111,8	125,2	509,1
108	10,05	4,96	4,95	246,7	124,8	505,7	10,0	113,4	127,0	514,9
109	10,05	4,91	4,88	240,8	131,7	547,0	11,0	118,7	132,9	551,9
110	10,03	4,97	4,96	247,3	127,1	513,9	10,0	115,5	129,4	523,2
111	10,05	4,93	4,89	242,3	128,5	530,2	10,5	116,3	130,2	537,4
112	10,04	4,97	4,93	246,0	128,7	523,0	10,5	116,4	130,4	530,1

Peça	Dimensões			Volume	Massa	Massa Volúmica	Teor em água	Massa (seca)	Massa (12%)	Massa Volúmica (12%)
	L	a	b							
[n.º]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm³]	[g]	[kg/m³]	[%]	[g]	[g]	[kg/m³]
113	10,04	4,97	4,93	246,0	128,7	523,0	10,5	116,4	130,4	530,1
114	10,04	4,96	4,94	246,0	143,6	583,8	11,5	128,8	144,3	586,4
115	10,04	4,90	4,88	240,1	156,0	649,8	13,0	138,1	154,6	644,0
116	10,05	4,88	4,84	237,4	157,1	661,6	13,0	139,0	155,7	655,8
117	10,04	4,87	4,82	235,7	155,1	658,1	13,5	136,6	153,0	649,4
118	10,05	4,92	4,85	239,8	163,3	681,1	14,5	142,6	159,8	666,2
119	10,05	4,94	4,85	240,8	163,5	678,9	14,0	143,4	160,6	667,0
120	10,04	4,94	4,94	245,0	141,1	576,0	11,5	126,6	141,8	578,6
121	10,03	4,94	4,89	242,3	168,0	693,5	14,0	147,4	165,1	681,3
122	10,04	4,94	4,86	241,0	163,6	678,7	13,5	144,1	161,4	669,7
123	10,04	4,86	4,86	237,1	151,7	639,7	13,5	133,7	149,7	631,3
124	10,03	4,87	4,84	236,4	131,2	555,0	11,0	118,2	132,4	560,0
125	10,03	4,87	4,85	236,9	132,2	557,9	11,5	118,5	132,8	560,4
126	10,04	4,94	4,93	244,5	142,2	581,6	11,5	127,6	142,9	584,2
127	10,02	4,87	4,86	237,2	130,1	548,5	10,5	117,7	131,8	555,9
128	10,04	4,87	4,83	236,2	128,0	542,1	10,5	115,9	129,8	549,4
129	10,03	4,89	4,84	237,4	125,8	530,0	10,0	114,4	128,1	539,7
130	10,02	4,87	4,87	237,6	130,9	551,0	11,5	117,4	131,5	553,4
131	10,03	4,88	4,88	238,9	131,0	548,3	11,0	118,0	132,1	553,3
132	10,04	4,87	4,86	237,6	153,1	644,4	13,0	135,5	151,8	638,7
133	10,04	4,87	4,85	237,1	152,3	642,3	13,0	134,8	151,0	636,6
134	10,06	4,94	4,93	245,0	147,5	602,2	13,0	130,6	146,2	596,9
135	10,05	4,93	4,92	243,8	147,1	603,3	12,5	130,7	146,4	600,6
136	10,05	4,93	4,92	243,8	132,8	544,9	12,0	118,6	132,8	544,9

**Tabela I.4** – Dados para histogramas de massa volúmica (com e sem correção para H = 12%) (PA)

Histograma da massa volúmica (MC = 12%)				Histograma da massa volúmica (sem correção)			
Bin	Frequência	%	% Cumulativa	Bin	Frequência	%	% Cumulativa
<470	0	0,0%	0,0%	<470	1	0,7%	0,7%
[470; 480]	3	2,2%	2,2%	[470; 480]	4	2,9%	3,7%
[480; 490]	3	2,2%	4,4%	[480; 490]	6	4,4%	8,1%
[490; 500]	6	4,4%	8,8%	[490; 500]	3	2,2%	10,3%
[500; 510]	4	2,9%	11,8%	[500; 510]	6	4,4%	14,7%
[510; 520]	8	5,9%	17,6%	[510; 520]	7	5,1%	19,9%
[520; 530]	3	2,2%	19,9%	[520; 530]	1	0,7%	20,6%
[530; 540]	5	3,7%	23,5%	[530; 540]	5	3,7%	24,3%
[540; 550]	4	2,9%	26,5%	[540; 550]	7	5,1%	29,4%
[550; 560]	17	12,5%	39,0%	[550; 560]	12	8,8%	38,2%
[560; 570]	7	5,1%	44,1%	[560; 570]	8	5,9%	44,1%
[570; 580]	7	5,1%	49,3%	[570; 580]	5	3,7%	47,8%
[580; 590]	13	9,6%	58,8%	[580; 590]	9	6,6%	54,4%
[590; 600]	9	6,6%	65,4%	[590; 600]	11	8,1%	62,5%
[600; 610]	8	5,9%	71,3%	[600; 610]	7	5,1%	67,6%
[610; 620]	8	5,9%	77,2%	[610; 620]	7	5,1%	72,8%
[620; 630]	9	6,6%	83,8%	[620; 630]	8	5,9%	78,7%
[630; 640]	7	5,1%	89,0%	[630; 640]	9	6,6%	85,3%
[640; 650]	3	2,2%	91,2%	[640; 650]	6	4,4%	89,7%
[650; 660]	5	3,7%	94,9%	[650; 660]	1	0,7%	90,4%
[660; 670]	4	2,9%	97,8%	[660; 670]	2	1,5%	91,9%
>670	3	2,2%	100,0%	>670	11	8,1%	100,0%

**Tabela I.5** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de compressão paralela às fibras (PN)

Provete	Dimensões		Área (cm <sup>2</sup> )	F <sub>máx</sub> (kN)	f <sub>c,0</sub> (MPa)
	a (mm)	b (mm)			
B1,1	23,69	50,58	11,98	35,2	29,4
B1,2	23,95	50,94	12,20	37,4	30,7
B2,1	23,70	50,74	12,03	37,7	31,3
C1,1	23,65	50,66	11,98	46,0	38,4
D1,1	24,05	50,76	12,21	35,7	29,2
D1,2	23,73	50,58	12,00	29,8	24,8
E1,1	23,94	50,68	12,13	37,1	30,6
E1,2	23,71	50,78	12,04	38,8	32,2
E2,1	23,91	50,82	12,15	30,0	24,7
F1,1	23,91	50,99	12,19	33,3	27,3
F1,2	23,77	50,84	12,08	37,8	31,3
G1,1	23,61	50,54	11,93	37,7	31,6
G2,1	23,71	50,90	12,07	35,1	29,1
H1,1	23,05	50,86	11,72	35,2	30,0
H1,2	23,67	50,65	11,99	32,7	27,3
H2,1	23,68	50,90	12,05	26,3	21,8
H2,2	24,13	50,84	12,27	26,8	21,8
I1,1	24,11	50,92	12,28	32,7	26,6
I2,1	23,65	50,95	12,05	31,4	26,1
I2,2	24,15	50,85	12,28	41,7	34,0
I3,1	24,09	50,90	12,26	33,4	27,2
I3,2	23,73	51,14	12,14	37,4	30,8
I4,1	23,85	50,60	12,07	29,2	24,2
I4,2	23,72	50,64	12,01	36,5	30,4
J1,1	23,85	50,86	12,13	37,1	30,6
J1,2	23,72	50,71	12,03	30,9	25,7
J2,1	24,16	51,06	12,34	34,3	27,8
J2,2	23,73	50,40	11,96	34,6	28,9
J3,1	24,15	50,66	12,23	32,2	26,3
J3,2	23,69	50,84	12,04	31,9	26,5
J4,1	23,82	50,68	12,07	27,1	22,5
J4,2	23,85	50,91	12,14	26,5	21,8
K.1.1	23,68	50,78	12,02	19,5	16,2
K.2.1	23,69	50,10	11,87	34,0	28,7
K.2.2	24,14	50,34	12,15	32,4	26,7
K.3.1	23,85	50,80	12,12	28,8	23,8
K.3.2	23,73	50,68	12,03	30,8	25,6
K.4.1	24,13	50,90	12,28	28,0	22,8
K.4.2	23,83	50,68	12,08	33,3	27,6
K.5.1	23,72	50,90	12,07	26,5	22,0
K.6.1	23,66	50,87	12,04	27,5	22,9

**Tabela I.6** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de compressão paralela às fibras (PS)

Provete	Dimensões		Área (cm <sup>2</sup> )	F <sub>máx</sub> (kN)	f <sub>c,0</sub> (MPa)
	a (mm)	b (mm)			
1.2.1-A	23,63	50,50	11,93	42,7	35,8
1.2.1-B	23,26	50,51	11,75	48,1	41,0
1.2.2-A	23,70	47,56	11,27	57,3	50,8
1.2.2-B	23,70	47,55	11,27	60,0	53,2
<b>1.2.3-A</b>	<b>22,02</b>	<b>48,68</b>	<b>10,72</b>	<b>70,0</b>	<b>65,3</b>
1.2.3-B	23,63	48,96	11,57	66,1	57,1

**Tabela I.7** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de compressão paralela às fibras (PA)

Provete	Dimensões		Área (cm <sup>2</sup> )	F <sub>máx</sub> (kN)	f <sub>c,0</sub> (MPa)
	a (mm)	b (mm)			
2.2.1-A	23,06	49,90	11,51	38,4	33,3
2.2.1-B	23,48	49,84	11,70	37,8	32,3
2.2.2-A	22,59	49,28	11,13	51,7	46,5
2.2.2-B	23,60	49,14	11,60	50,5	43,5
<b>2.2.3-A</b>	<b>21,65</b>	<b>49,26</b>	<b>10,66</b>	<b>53,8</b>	<b>50,4</b>
2.2.3-B	23,68	49,42	11,70	55,4	47,4
<b>6.2.1-A</b>	<b>22,58</b>	<b>49,42</b>	<b>11,16</b>	<b>35,0</b>	<b>31,4</b>
6.2.1-B	23,66	49,36	11,68	37,4	32,0
6.2.2-A	23,58	47,49	11,20	51,4	45,9
6.2.2-B	22,12	47,53	10,51	47,5	45,2
6.2.3-A	21,68	48,60	10,54	52,1	49,5
6.2.3-B	23,64	48,43	11,45	52,5	45,9
10.2.1-A	22,08	48,63	10,74	38,5	35,9
10.2.1-B	22,51	48,46	10,91	44,7	41,0
10.2.2-A	22,70	49,71	11,28	43,2	38,3
10.2.2-B	22,43	49,98	11,21	41,0	36,6
10.2.3-A	22,35	49,75	11,12	59,3	53,3
10.2.3-B	22,43	49,80	11,17	58,9	52,7
4.2.1-A	23,61	49,79	11,76	42,8	36,4
4.2.1-B	22,82	49,85	11,38	40,1	35,3
<b>4.2.2-A</b>	<b>23,20</b>	<b>50,06</b>	<b>11,61</b>	<b>60,6</b>	<b>52,2</b>
4.2.2-B	23,30	50,06	11,66	55,7	47,7
4.2.3-A	23,56	49,23	11,60	65,6	56,6
4.2.3-B	20,62	49,16	10,14	60,4	59,6
8.2.1-A	22,16	49,02	10,86	47,8	44,0
8.2.1-B	23,69	49,25	11,67	48,4	41,5
8.2.2-A	23,60	49,51	11,68	43,4	37,1
8.2.2-B	22,74	49,71	11,30	41,0	36,2

Provete	Dimensões		Área (cm <sup>2</sup> )	F <sub>máx</sub> (kN)	f <sub>c,0</sub> (MPa)
	a (mm)	b (mm)			
8.2.3-A	23,02	49,64	11,43	57,6	50,4
8.2.3-B	23,66	49,67	11,75	60,8	51,7
12.2.1-A	23,54	48,75	11,48	43,7	38,1
12.2.1-B	22,22	48,74	10,83	42,4	39,1
12.2.2-A	23,34	49,29	11,50	43,5	37,8
12.2.2-B	23,66	49,30	11,66	47,2	40,5
12.2.3-A	22,22	49,01	10,89	56,9	52,3
12.2.3-B	23,54	49,23	11,59	60,0	51,8
3.2.1.-A	23,48	49,90	11,72	35,0	29,9
3.2.1.-B	22,89	49,77	11,39	35,4	31,0
3.2.2-A	23,62	49,85	11,77	48,8	41,5
3.2.2-B	23,58	49,97	11,78	46,3	39,3
3.2.3-A	23,56	49,01	11,55	52,4	45,4
3.2.3-B	23,67	49,09	11,62	51,9	44,6
7.2.1-A	19,18	49,11	9,42	42,4	45,1
7.2.1-B	20,34	49,23	10,01	40,9	40,9
7.2.2-A	18,76	47,48	8,91	44,1	49,5
7.2.2-B	22,45	47,47	10,66	45,1	42,3
7.2.3-A	23,19	49,51	11,48	51,5	44,8
7.2.3-B	22,28	49,45	11,02	49,8	45,2
11.2.1-A	22,00	49,19	10,82	48,8	45,1
11.2.1-B	23,58	49,01	11,56	54,2	46,9
11.2.2-A	23,38	49,00	11,46	36,4	31,8
11.2.2-B	23,62	49,90	11,79	40,8	34,6
11.2.3-A	22,37	49,12	10,99	-	-
11.2.3-B	22,51	49,37	11,11	40,3	36,2
5.2.1-A	23,60	49,78	11,75	44,9	38,2
5.2.1-B	23,82	49,75	11,85	41,9	35,3
5.2.2-A	23,10	49,94	11,54	57,4	49,7
5.2.2-B	23,17	49,82	11,54	52,2	45,2
5.3.3-A	23,54	49,68	11,69	58,6	50,1
5.3.3-B	23,70	49,90	11,83	55,8	47,2
9.2.1-A	28,87	48,70	14,06	46,0	32,7
9.2.1-B	23,65	48,20	11,40	41,5	36,4
9.2.2-A	22,68	48,98	11,11	52,3	47,1
9.2.2-B	23,59	48,91	11,54	52,5	45,5
9.2.3-A	23,61	49,98	11,80	54,8	46,5
9.2.3-B	23,68	50,10	11,86	53,4	45,0
13.2.1-A	23,37	48,42	11,32	40,4	35,7
13.2.1-B	22,28	48,46	10,80	41,6	38,6
13.2.2-A	24,60	50,05	12,31	64,5	52,4
13.2.2-B	20,75	50,10	10,40	50,9	48,9

Provete	Dimensões		Área (cm <sup>2</sup> )	F <sub>máx</sub> (kN)	f <sub>c,0</sub> (MPa)
	a (mm)	b (mm)			
13.2.3-A	22,28	49,41	11,01	45,0	40,9
13.2.3-B	23,66	48,68	11,52	45,1	39,1

**Tabela I.8** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento (PN)

Provete	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f [MPa]	h [mm]	b [mm]	L [mm]	Massa [g]	EC5 (2004) [MPa]	Maldonado et al. (2007) [MPa]
1	524,0	2,7	30,4	51	50	100	133,63	19,4	26,7
2	553,6	1,5	17,6	51	50	100	141,17	20,5	30,0
3	454,6	1,9	22,1	51	50	100	115,93	16,8	18,7
4	515,6	1,9	21,9	51	50	100	131,49	19,1	25,7
5	539,1	2,9	32,6	51	50	100	137,47	19,9	28,4
6	509,6	1,9	22,1	51	50	100	129,95	18,9	25,0
7	439,2	2,0	23,1	51	50	100	111,93	16,3	17,0
8	477,6	2,6	29,3	51	51	100	124,14	17,7	21,4
9	474,8	2,4	27,5	51	50	100	121,01	17,6	21,0
10	468,5	2,5	28,9	51	51	100	121,79	17,3	20,3

**Tabela I.9** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento (PS)

Provete	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f [MPa]	EC5 (2004) [MPa]	Maldonado et al. (2007) [MPa]
1.1.1	493,9	-	-	-	-
1.1.2	496,5	-	-	-	-
1.1.3	586,4	3,5	40,0	21,7	33,76
1.1.4	588,4	3,9	44,6	21,8	33,99
1.1.5	676,3	4,4	49,7	25,0	44,00
1.1.6	681,3	5,3	60,1	25,2	44,57
1.1.7	678,7	3,0	34,5	25,1	44,27
1.1.8	547,0	2,7	31,4	20,2	29,27
1.1.9	561,5	3,0	34,1	20,8	30,92
1.1.10	555,0	3,1	35,7	20,5	30,19
1.1.11	639,7	3,8	43,6	23,7	39,83
1.1.12	470,4	2,6	29,5	17,4	20,54
1.1.13	478,3	2,3	26,8	17,7	21,44
1.1.14	485,6	2,4	27,4	18,0	22,27
1.1.15	490,9	2,3	26,7	18,2	22,87

**Tabela I.10** – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento (PA)

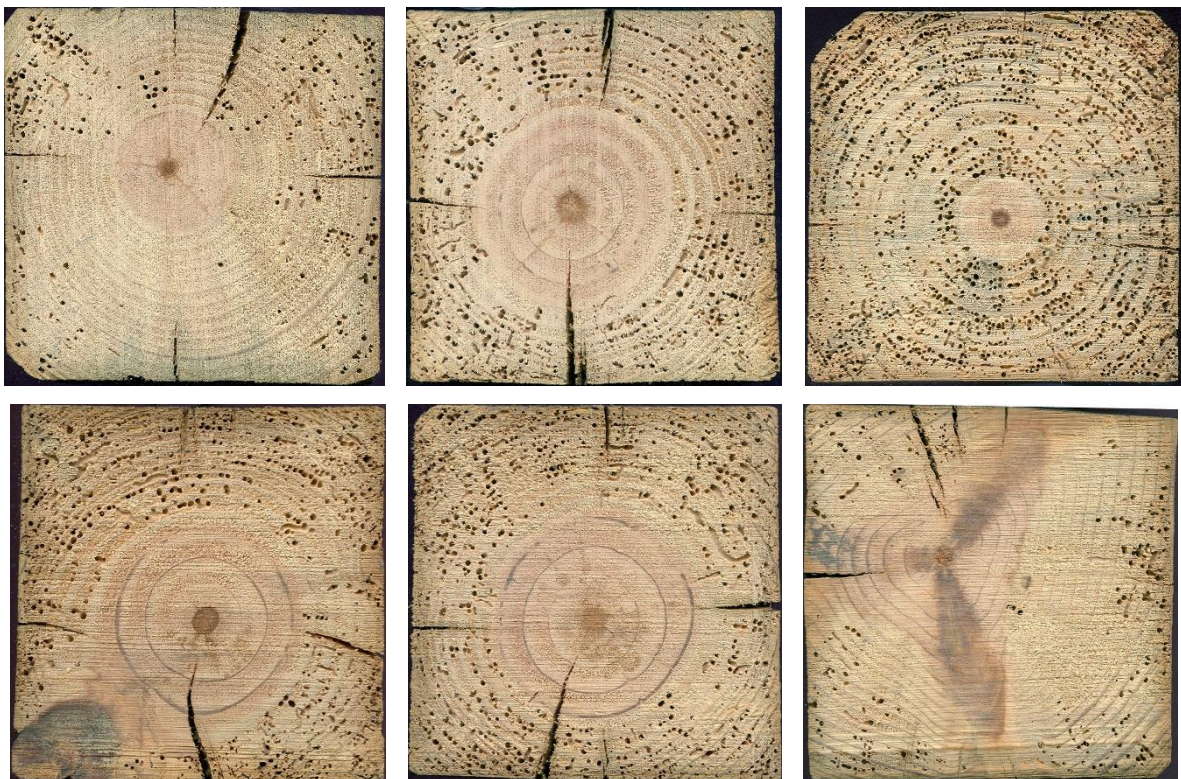
Provete	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f[MPa]	EC5 (2004) [MPa]	Maldonado et al. (2007) [MPa]
2.1.1	495,5	2,7	30,9	18,7	24,4
2.1.2	500,0	3,2	36,6	18,8	25,0
2.1.3	573,1	3,1	35,4	21,6	33,4
2.1.4	574,3	3,9	44,6	21,6	33,6
2.1.5	654,2	4,1	46,3	24,6	42,8
2.1.6	657,6	4,4	50,4	24,8	43,2
6.1.1	517,3	2,9	33,1	19,5	27,0
6.1.2	521,1	2,7	30,9	19,6	27,4
6.1.3	568,5	3,0	34,3	21,4	32,9
6.1.4	570,4	3,1	35,4	21,5	33,1
6.1.5	624,5	3,7	41,9	23,5	39,4
6.1.6	627,1	3,7	42,7	23,6	39,7
10.1.1	542,7	3,5	40,0	20,5	29,9
10.1.2	544,2	3,3	37,7	20,5	30,1
10.1.3	558,9	3,7	42,3	21,1	31,8
10.1.4	565,3	2,3	26,3	21,3	32,5
10.1.5	613,2	3,5	39,8	23,1	38,1
10.1.6	614,5	3,5	39,7	23,1	38,2
4.1.1	508,1	3,1	35,9	19,1	25,6
4.1.2	510,4	2,8	31,8	19,1	25,9
4.1.3	574,4	4,3	49,3	21,5	33,3
4.1.4	575,2	3,3	37,8	21,6	33,4
4.1.5	646,9	4,7	53,3	24,3	41,7
4.1.6	649,5	3,9	44,1	24,4	42,0
8.1.1	529,1	2,9	33,1	19,8	28,1
8.1.2	532,3	3,3	37,4	20,0	28,4
8.1.3	588,9	3,7	42,5	22,1	35,0
8.1.4	591,3	3,4	39,1	22,2	35,2
8.1.5	624,0	3,7	42,0	23,4	39,0
8.1.6	626,6	4,2	48,2	23,5	39,3
12.1.1	547,5	3,1	35,7	20,5	30,2
12.1.2	549,2	3,2	36,6	20,6	30,4
12.1.3	596,6	3,4	39,4	22,4	35,8
12.1.4	597,2	3,6	41,0	22,4	35,9
12.1.5	607,6	3,5	40,5	22,8	37,1
12.1.6	614,6	-	-	-	-
3.1.1	493,5	2,9	33,1	18,9	25,2
3.1.2	496,5	2,4	27,4	19,0	25,6
3.1.3	568,4	3,3	37,7	21,8	34,0
3.1.4	572,1	3,4	38,9	21,9	34,5

Provete	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	<i>f</i> [MPa]	EC5 (2004) [MPa]	Maldonado et al. (2007) [MPa]
3.1.5	635,3	3,5	40,1	24,4	42,0
3.1.6	637,9	3,5	40,5	24,5	42,3
7.1.1	523,3	2,9	33,1	20,1	28,7
7.1.2	526,8	3,1	35,4	20,2	29,2
7.1.3	556,7	2,9	33,1	21,3	32,7
7.1.4	558,3	3,8	42,9	21,4	32,9
7.1.5	605,5	3,3	37,3	23,2	38,4
7.1.6	608,8	4,0	45,2	23,4	38,9
11.1.1	542,7	3,3	37,7	20,6	30,5
11.1.2	544,2	3,1	35,4	20,7	30,7
11.1.3	558,9	3,2	36,6	20,8	31,1
11.1.4	565,3	3,0	34,3	21,0	31,5
11.1.5	613,2	3,6	41,6	22,7	36,9
11.1.6	614,5	4,5	51,3	22,7	37,0
5.1.1	504,5	2,3	26,8	19,2	26,0
5.1.2	509,2	2,6	29,9	19,4	26,6
5.1.3	576,9	3,8	43,2	21,9	34,5
5.1.4	580,2	3,5	39,9	22,1	34,9
5.1.5	626,5	4,2	47,5	23,8	40,3
5.1.6	631,4	4,5	51,8	24,0	40,9
9.1.1	534,3	2,6	29,4	20,3	29,5
9.1.2	536,7	2,9	32,9	20,4	29,8
9.1.3	583,8	3,5	39,9	22,2	35,3
9.1.4	584,7	3,5	39,7	22,2	35,4
9.1.5	-	2,5	28,4	-	-
9.1.6	609,6	3,7	42,2	23,2	38,3
13.1.1	544,6	-	-	-	-
13.1.2	546,3	3,5	40,1	20,8	30,9
13.1.3	589,0	3,4	39,1	22,4	35,9
13.1.4	592,8	3,5	40,4	22,5	36,4
13.1.5	594,5	3,1	35,9	22,6	36,5
13.1.6	597,1	3,4	38,7	22,7	36,9

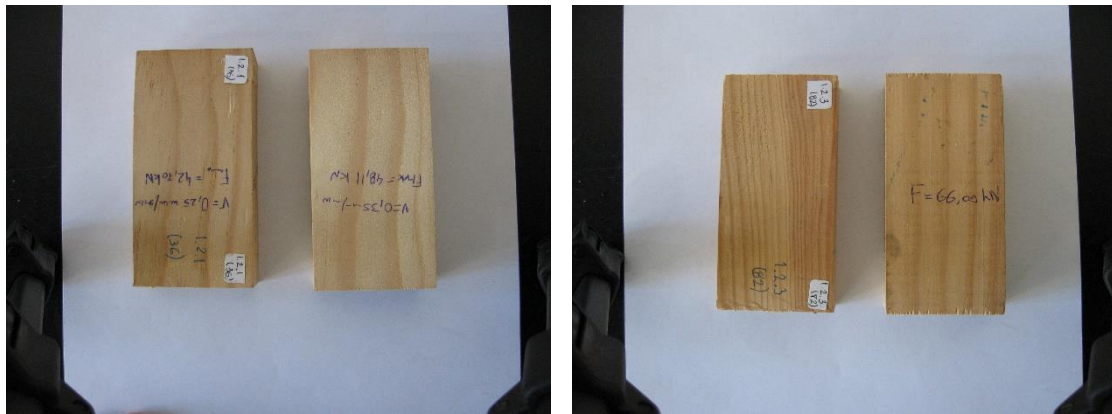
Nota: Valores a **vermelho** nas tabelas anteriores não foram considerados no decorrer do estudo devido a erros ocorridos durante os ensaios.



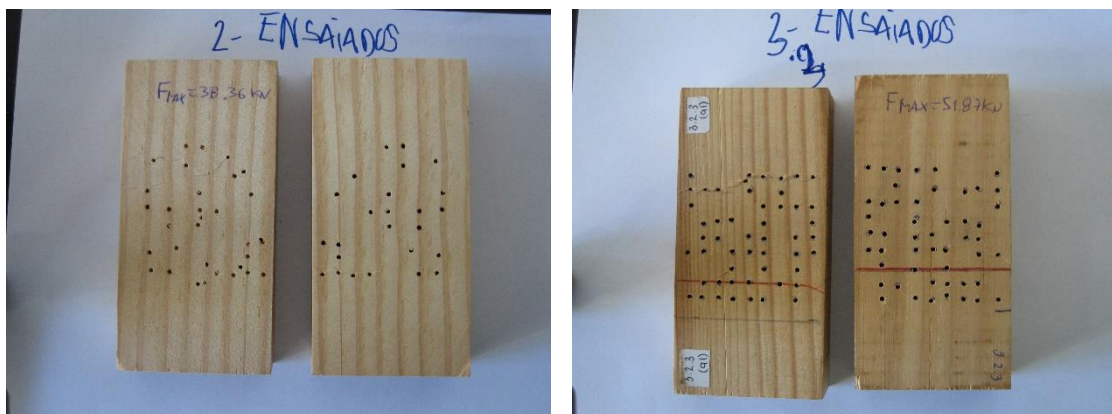
**Figura I.1** – Peças originais



**Figura I.2** – Secções transversais das peças originais



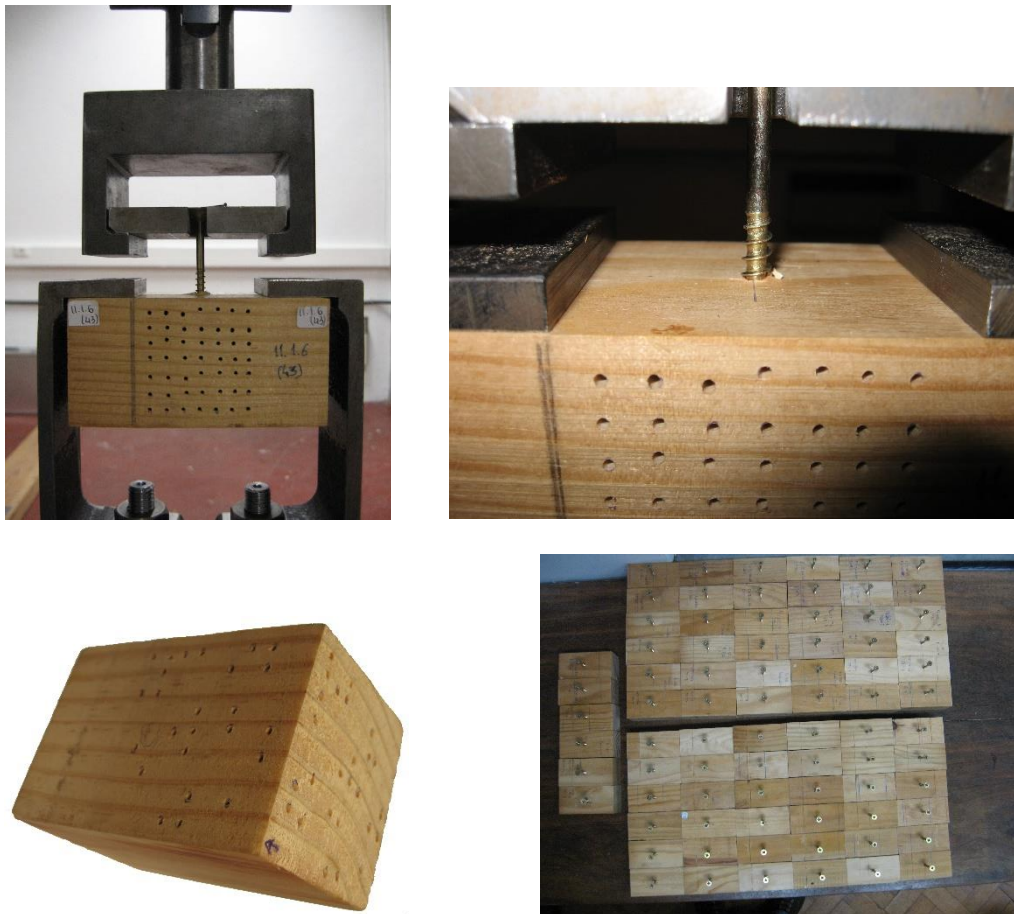
**Figura I.3** – Ensaio de compressão paralela às fibras (PS)



**Figura I.4** – Ensaio de compressão paralela às fibras (PA)



**Figura I.5** – Ensaio de compressão paralela às fibras (PN)



**Figura I.6** – Ensaio de arrancamento (PA)



**Figura I.7** – Ensaio de arrancamento (PN)

## II. Resultados detalhados do capítulo 5

**Relatório II.1** – Relatório produzido pelo sistema para os processos de aquisição e de reconstrução (exemplo para a amostra 1.1)

[System]

Scanner = Skyscan1172  
Instrument S/N = 0.35  
Hardware version = C  
Software = version 1.5 (build 21)  
Home directory = C:\Skyscan1172  
Source Type = Hamamatsu 100/250  
Camera = VDS 1.3Mp camera  
Camera Pixel Size ( $\mu\text{m}$ ) = 24.53  
Camera XY Ratio = 1.000  
Incl.in lifting ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ ) = 0.000

[Disk Errors]

Read = 0  
Write = 0  
Recover from empty = 0

[Acquisition]

Data directory = D:\RESULTS\MADEIRA 1.1  
Filename Prefix = MADEIRA 1.1  
Configuration = std  
Number of Files = 288  
Source Voltage (kV) = 60  
Source Current ( $\mu\text{A}$ ) = 165  
Number of Rows = 1024  
Number of Columns = 2496  
Image crop origin X = 0  
Image crop origin Y = 0  
Camera binning = 1x1  
Image Rotation = -0.4300  
Gantry direction = CC  
Compensation of difference in offset images = ON  
Number of connected scans = 3  
Number of lines to be reconstructed = 753  
Image Pixel Size ( $\mu\text{m}$ ) = 18.09  
Object to Source (mm) = 257.800  
Camera to Source (mm) = 349.522  
Vertical Object Position (mm) = 15.153  
Optical Axis (line) = 900  
Filter = Al 0.5 mm  
Image Format=TIFF  
Depth (bits)=16  
Screen LUT=0  
Exposure (ms) = 1800  
Rotation Step (deg) = 0.700  
Frame Averaging = ON (3)  
Random Movement = OFF (2)  
Use 360 Rotation = NO  
Geometrical Correction = ON  
Camera Offset = ON  
Median Filtering = ON  
Flat Field Correction = ON  
Rotation Direction = CC  
Scanning Trajectory = ROUND  
Type Of Motion = STEP AND SHOOT  
Study Date and Time = Mar 28, 2018 15:51:47

Scan duration = 01:25:19

[Reconstruction]

Reconstruction Program = NRecon

Program Version = Version: 1.6.10.4

Program Home Directory = C:\Users\Tomo\Desktop\skyscan 64-1172\Skyscan1172

Reconstruction engine = GPUReconServer

Engine version = Version: 1.6.10

Reconstruction from batch = No

Postalignment = -1.50

Connected Reconstruction (parts) = 3

Sub-scan post alignment [0] = -10.500000

Sub-scan post alignment [1] = 6.000000

Sub-scan post alignment [2] = -1.500000

Sub-scan scan length [0] = 699

Sub-scan scan length [1] = 749

Sub-scan scan length [2] = 753

Used extra rotation per scan(deg) = 0.000 0.000 0.000

Used extra shift in X per scan(micron) = 0.000 -298.637 -126.194

Used extra shift in Y per scan(micron) = 0.000 80.578 144.264

Reconstruction servers = DESKTOP-RCAUOK6

Dataset Origin = Skyscan1172

Dataset Prefix = MADEIRA 1.1~02

Dataset Directory = C:\Users\Tomo\Desktop\MADEIRA 1.1

Output Directory = C:\Users\Tomo\Desktop\MADEIRA 1.1

Time and Date = Mar 28, 2018 19:18:32

First Section = 154

Last Section = 2308

Reconstruction duration per slice (seconds) = 0.189096

Total reconstruction time (1449 slices) in seconds = 274.000000

Section to Section Step = 1

Sections Count = 2155

Result File Type = BMP

Result File Header Length (bytes) = 1134

Result Image Width (pixels) = 1572

Result Image Height (pixels) = 960

Pixel Size (um) = 18.10413

Reconstruction Angular Range (deg)=200.90

Use 180+ = OFF

Angular Step (deg) = 0.7000

Smoothing = 3

Smoothing kernel = 0 (Asymmetrical boxcar)

Ring Artifact Correction = 20

Draw Scales = OFF

Reconstruction from ROI = ON

ROI Top (pixels) = 1693

ROI Bottom (pixels) = 730

ROI Left (pixels) = 447

ROI Right (pixels) = 2020

ROI reference length = 2496

Filter cutoff relative to Nyquist frequency = 100

Filter type = 0

Filter type description = Hamming (Alpha=0.54)

Undersampling factor = 1

Threshold for defect pixel mask (%) = 0

Beam Hardening Correction (%) = 48

CS Static Rotation (deg) = 0.00

Minimum for CS to Image Conversion = 0.002109

Maximum for CS to Image Conversion = 0.013544

HU Calibration = OFF

BMP LUT = 0

Cone-beam Angle Horiz.(deg) = 10.017372  
Cone-beam Angle Vert.(deg) = 4.118418

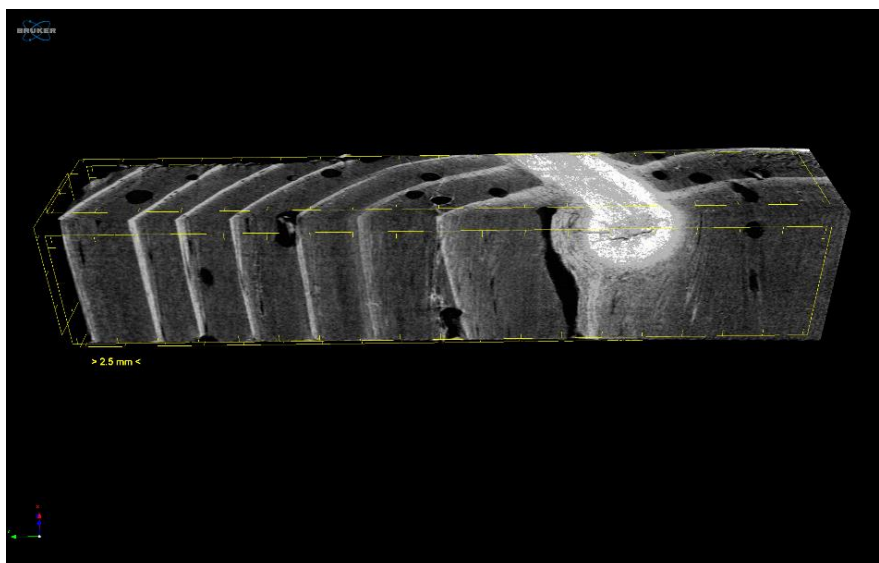
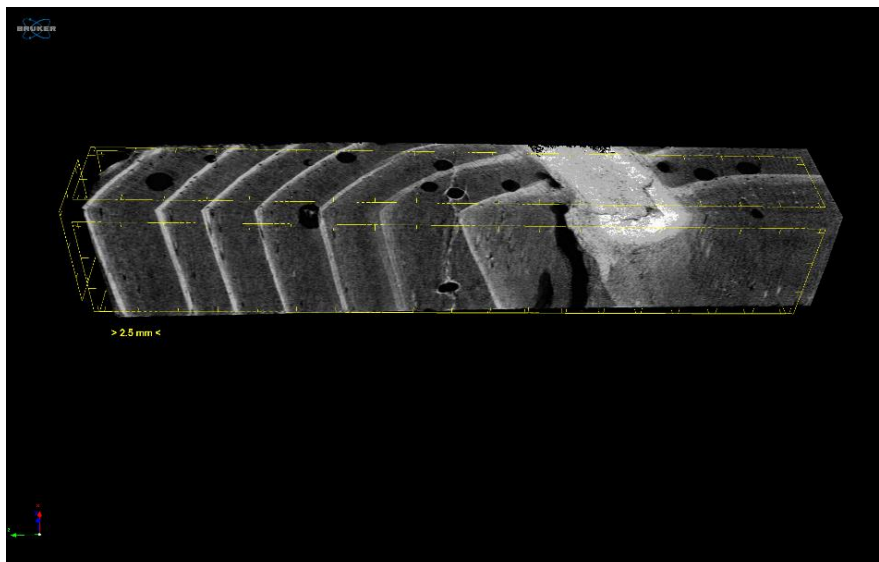
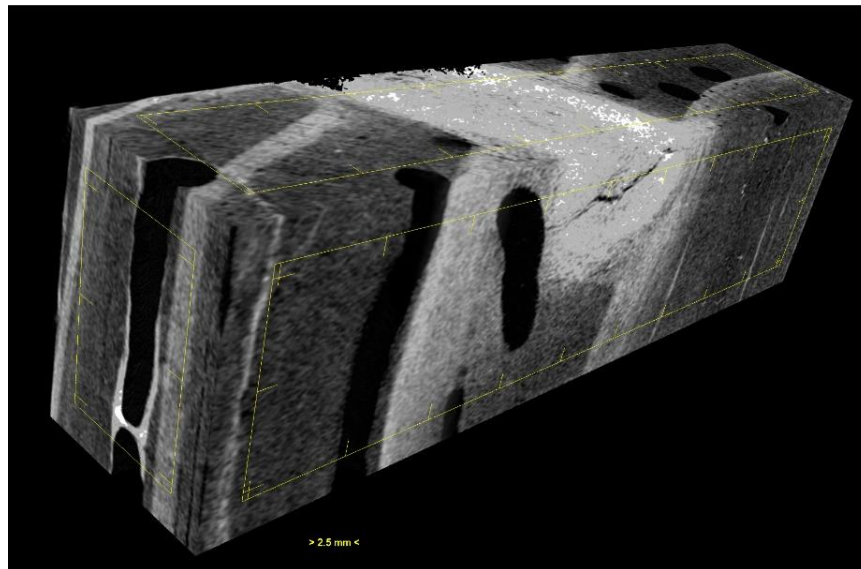
**Relatório II.2** – Relatório produzido pelo sistema com os resultados dos parâmetros de interesse (exemplo para a amostra 1.2)

[ 07/05/18 11:57:12 ]      3D analysis

Date and time,05.07.2018 11:57  
Operator identity,João Parracha  
Computer name,JOÃO PARRACHA  
Computation time,00:02:39  
Dataset,madeira 1.2\_rec\_cor  
Location,C:\Users\João Parracha\Desktop\Madeira\Madeira 1.2\madeira 1.2\_rec\_cor\VOI\

Description,Abbreviation,Value,Unit

Number of layers,,451  
Lower vertical position,,8.68998,mm  
Upper vertical position,,24.98371,mm  
Pixel size,,36.20827,um  
Lower grey threshold,,17  
Upper grey threshold,,255  
  
Tissue volume,TV,85298.07069,mm<sup>3</sup>  
Bone volume,BV,78114.40490,mm<sup>3</sup>  
Percent bone volume,BV/TV,91.57816,%  
Tissue surface,TS,12254.96446,mm<sup>2</sup>  
Bone surface,BS,52758.49314,mm<sup>2</sup>  
Intersection surface,i.S,8549.65935,mm<sup>2</sup>  
Bone surface / volume ratio,BS/BV,0.90784,1/mm  
Bone surface density,BS/TV,0.80796,1/mm  
Trabecular pattern factor,Tb.Pf,-0.64917,1/mm  
Centroid (x),Crd.X,-23.07764,mm  
Centroid (y),Crd.Y,-18.45935,mm  
Centroid (z),Crd.Z,17.00421,mm



**Figura II.1** – Algumas imagens do objeto 3D reconstruído. Visualização através do programa CTVox (exemplo para a amostra 1.1)

## III. Resultados detalhados do capítulo 6

Tabela III.1 – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de arrancamento

Provete	Massa Volúmica Original [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Volúmica Residual [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f [MPa]
3,1-3,2	525	408	0,555	7,93
3,2-3,3	516	402	0,690	9,86
3,3-3,4	470	365	0,279	3,99
3,4-3,5	461	363	0,329	4,70

Tabela III.2 – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de corte paralelo às fibras, realizado de acordo com a NP 623 (1973)

Provete	Massa Volúmica Original [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Volúmica Residual [kg/m <sup>3</sup> ]	Área [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f [MPa]
3,1	516	401	359,91	1,98	5,52
3,2	538	415	453,69	2,69	5,95
3,4	443	341	573,02	3,38	5,90
3,3	497	389	607,27	3,69	6,08
1,4	540	472	593,32	1,48	5,61
2,2	648	593	598,04	6,53	11,83

Tabela III.3 – Valores de força máxima e resistência obtidos para os ensaios de corte paralelo às fibras, realizado de acordo com a EN 408 (2010)

Provete	Massa Volúmica Original [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Volúmica Residual [kg/m <sup>3</sup> ]	Área [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>máx</sub> [kN]	f [MPa]
1,3	479	385	597,68	0,497	0,807
3,1A	516	401	588,23	0,921	1,519
3,3	498	389	570,68	1,052	1,788
1,5	483	389	587,44	1,074	1,773
3,5	479	385	515,96	1,078	2,027
2,5	519	470	585,46	1,578	2,614
2,3	577	516	593,22	1,632	2,669
2,4	560	507	475,99	1,858	3,786
1,2	610	558	510,29	2,262	4,300