



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Área Departamental de Engenharia Civil

Degradação da Madeira por Caruncho em Edifícios Antigos. Uma Análise Experimental.

Sandra Cristina Silva Mendes

(Licenciada em Engenharia Civil)

Orientadoras:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

Mestre Maria do Carmo Carvalho Alves da Silva

Presidente do Júri: Mestre Manuel Brazão Farinha

Arguente: Doutora Maria Idália Gomes

Dezembro 2013

Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo laboratorial que teve como finalidade o reconhecimento de perda de propriedades da madeira de edifícios antigos quando degradada por carunchos. Foi estudada madeira antiga de pinho e de choupo, com idades compreendidas entre 100 e 200 anos.

Como abordagem inicial são apresentadas as características da madeira e dos edifícios pombalinos e gaioleiros onde esta era bastante usada, não só como elemento de acabamento, mas principalmente como elemento estrutural. São apresentados os vários fatores que levam à degradação da madeira assim como alguns métodos de avaliação e diagnóstico dos estados de conservação dos elementos de madeira que se encontram nos edifícios.

É também desenvolvido um estudo sobre o caruncho grande e caruncho pequeno, seu ciclo de vida e forma como degrada a madeira, servindo de base ao estudo laboratorial.

No desenvolvimento foi avaliado o estado de degradação de provetes de madeira antiga com 30 x 30 x 90 mm e de seguida correlacionado com a sua resistência à compressão, o seu módulo de elasticidade e a extensão em fase plástica. Desta forma pretende-se estudar o modo como os diferentes estados de degradação por caruncho influenciam as características mecânicas das peças de madeira.

Palavras- chave: Edifícios antigos
Degradação por caruncho
Madeira
Estados de conservação
Massa volúmica
Resistência mecânica
Módulo de elasticidade
Percentagem de saturação

Abstract

This paper presents a laboratory study aimed at the recognition of loss properties of wood from old buildings when degraded by woodworm. Antique pine and poplar were studied, with ages between 100 and 200 years.

As an initial approach it is shown the characteristics of the timber and “pombalinos” buildings and “gaioleiros” where it was widely used buildings, not only as an element of finish but mainly as a structural element. It is also exposed lists the various factors that lead to degradation of the wood, as well as some methods of assessment and diagnosis of the state of conservation of wooden elements that are found in buildings.

It is also developed a study on large and small woodworm life cycle and how the wood degrades, serving as the basis for laboratory study.

Through the development, it was evaluated the degradation of 30 x 30 x 90 mm samples of old wood and then correlated with the compression strength , the modulus of elasticity and its extension in the plastic phase. Thus it is intend to study how the different states of degradation by woodworms influence the mechanical properties of the wood.

Keywords: Old buildings

Degradation by woodworm

Wood

State conservation

Percent saturation

Mechanical resistance

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer às minhas orientadoras, a Professora Dulce Franco Henriques e Professora Maria do Carmo Silva por todo o apoio, disponibilidade e ensinamentos que me transmitiram ao longo deste trabalho.

Agradeço também ao Laboratório de Monitorização Microssísmica da Área Departamental de Física do ISEL e ao Professor Mário Moreira pela disponibilidade e apoio na execução dos ensaios de compressão.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Área Departamental de Engenharia Civil do ISEL queria também agradecer pela atenção e apoio na execução dos ensaios laboratoriais.

À minha família, namorado, amigos e colegas que me apoiaram e ajudaram ao longo deste percurso que nem sempre foi fácil.

Índice de texto

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos e metodologias.....	2
1.3 Organização do trabalho	3
2. Madeira na construção	5
2.1 Madeira como elemento de construção.....	5
2.2 Constituição da madeira.....	5
2.3 Composição química da madeira	8
2.4 Propriedades da madeira	10
2.4.1 Propriedades mecânicas	10
2.4.1.1 Deformação do provete durante o ensaio de compressão.....	11
2.4.1.2 Módulo de elasticidade.....	13
2.4.2 Propriedades físicas.....	14
2.4.2.1 Higroscopicidade e teor de água.....	14
2.4.2.2 Densidade ou massa volúmica aparente	16
2.4.2.3 Retractilidade.....	17
2.4.2.4 Resistência ao fogo	18
2.5 Construção Pombalina e Gaioleira	20
2.5.1 Caracterização dos edifícios de alvenaria Pombalinos e Similares (1755 – 1870).....	20
2.5.2 Caracterização dos edifícios de alvenaria do Tipo Gaioleiro (1870 – 1930) .	21
2.6 Coberturas	22
2.7 Pavimentos.....	23
2.8 Paredes	24
2.8.1 Paredes de alvenaria.....	24
2.8.2 Frontais.....	25

2.8.3	Tabiques	25
2.9	Fundações	26
2.10	Fatores de degradação – Patologias	27
2.10.1	Introdução.....	27
2.10.2	Degradação por agentes biológicos.....	28
2.10.2.1	Degradação por térmitas.....	28
2.10.2.1.1	Ciclo de vida.....	29
2.10.2.2	Degradação por fungos de podridão.....	30
2.10.2.2.1	Ciclo de vida.....	32
2.10.3	Durabilidade Natural face ao ataque por térmitas e fungos	32
2.10.4	Classes de Risco face ao ataque por térmitas e fungos	34
2.10.5	Degradação por agentes atmosféricos	35
2.11	Avaliação de madeira nos edifícios	35
2.11.1	Introdução.....	35
2.11.2	Métodos de inspeção	36
2.11.2.1	Inspeção visual	36
2.11.2.2	Resistograph	37
2.11.2.3	Ensaio do Pilodyn.....	37
2.11.2.4	Método das vibrações induzidas.....	38
2.11.2.5	Raios X e raios gama	39
2.11.2.6	Deteção acústica de insetos xilófagos	39
2.11.3	Ensaio laboratoriais	40
3.	Estado da Arte – Degradação por Caruncho	41
3.1	Introdução	41
3.2	<i>Hylotrupes bajulus</i> L. (Caruncho Grande).....	41
3.3	<i>Anobium punctatum</i> (Caruncho Pequeno)	44

3.4 Durabilidade natural face ao ataque por <i>Hylotrupes bajulus</i> e <i>Anobium punctatum</i>	46
3.5 Classes de Risco face ao ataque por <i>Hylotrupes bajulus</i> e <i>Anobium punctatum</i>	47
4. Desenvolvimento Laboratorial	48
4.1 Introdução	48
4.2 Preparação e seleção dos provetes	48
4.3 Determinação do teor de água dos provetes	50
4.4 Determinação da percentagem de saturação	51
4.5 Ensaio de compressão	54
4.5.1 Módulo de elasticidade	56
4.5.2 Extensão em fase plástica	56
5. Apresentação e discussão dos resultados experimentais	59
5.1 Introdução	59
5.2 Determinação do teor de água	59
5.3 Ensaio de saturação	60
5.4 Relação entre a massa volúmica e o grau de degradação	66
5.5 Ensaio de Compressão	69
5.5.1 Resistência mecânica	72
5.5.1.1 Apresentação de resultados	72
5.5.1.2 Discussão dos resultados	77
5.5.2 Tipo de rotura	80
5.5.3 Deformação em fase plástica	81
5.5.3.1 Apresentação de resultados	81
5.5.3.2 Discussão de resultados	90
5.5.4 Módulo de elasticidade	92
5.5.4.1 Apresentação de resultados	92
5.5.4.2 Discussão de resultados	97

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros	99
Bibliografia.....	101
Anexos.....	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Corte transversal do tronco de uma árvore (Adaptado de Júnior, 2006)	6
Figura 2.2 - Pormenor das pontuações areoladas dos traquídeos do lenho de uma resinosa (ampliação cerca de 100×) (Henriques citando Carvalho, 1996)	8
Figura 2.3 - Composição química da madeira (Klock, 2013)	9
Figura 2.4 - Gráfico do comportamento tensão-extensão para provetes de madeira limpa carregados na direção do fio (Adaptado de Negrão e Amorim, 2009).....	12
Figura 2.5 - Gráfico do comportamento tensão-extensão para um provete de madeira degradado e um são obtido por ensaio laboratorial.	13
Figura 2.6 - Curvas de equilíbrio higrotérmico (Machado, 2009).....	16
Figura 2.7 - Direções preferenciais da madeira (Henriques citando Machado, 2005) ...	18
Figura 2.8 - Asnas triangulares.....	22
Figura 2.9 - Pavimento, visto por baixo	Figura 2.10 - Entrega de viga do pavimento.....
.....	24
Figura 2.11 - Parede de frontal	25
Figura 2.12 - Paredes de Tabiques	26
Figura 2.13 - Térmitas subterrâneas	29
Figura 2.14 - Madeira degradada por térmitas subterrâneas (Cruz, 2010).....	29
Figura 2.15 - Ciclo de vida das térmitas subterrâneas (Universidade dos Açores, 2007)	30
.....	30
Figura 2.16 - Filamentos de fungos de podridão	31
Figura 2.17 - Ciclo de vida dos fungos (Henriques citando Berry, 2011).....	32
Figura 2.18 - Resistograph	37
Figura 2.19 - Pilodyn	38
Figura 2.20 - Unidade central e martelo de impacto (Bastos, 2011).....	39
Figura 2.21 - Detetor acústico de insetos xilófagos.....	40
Figura 3.1 - <i>Hylotrupes bajulus</i> na fase de larva (LNEC, 1967).....	42

Figura 3.2 - <i>Hylotrupes bajulus</i> L. adulto (LNEC, 1967)	43
Figura 3.3 - <i>Anobium punctatum</i> na fase larva (LNEC, 1967)	44
Figura 3.4 - Ciclo de vida de um caruncho (Henriques citando Berry, 1994).....	45
Figura 4.1 - Provette 2L-23	49
Figura 4.2 - Provetes de madeira utilizados nos vários ensaios	50
Figura 4.3 - Exsicador e Estufa	51
Figura 4.4 - Ensaio de saturação.....	52
Figura 4.5 - Balança.....	52
Figura 4.6 - Prensa Tecno Test C025/C	54
Figura 4.7 - Gráfico Força-deslocamento obtido do ensaio de compressão.....	56
Figura 5.1- Gráfico dos resultados do ensaio de saturação do provete 2L-24 (Degradado).....	61
Figura 5.2 - Gráfico com os resultados do ensaio de saturação do provete 2L-3 (São) .	62
Figura 5.3 - Correlação entre $\Delta M_{\text{degradação}}$ e a Massa volúmica	68
Figura 5.5 - Correlação entre tensão de rotura e a massa volúmica da viga L.....	72
Figura 5.4 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga L	72
Figura 5.6 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga R.....	73
Figura 5.7 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga R.....	73
Figura 5.8 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga J	74
Figura 5.9 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga J	74
Figura 5.10 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga H+B3+U .	76
Figura 5.11 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga H+B3+U	76
Figura 5.12 - Correlação entre a tensão de rotura e a % saturação da viga Q.....	77
Figura 5.13 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga Q.....	77
Figura 5.14 - Gráfico de correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica de provetes degradados por caruncho (Cruz & Machado, 2013).....	78

Figura 5.15 - Gráfico com correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica (Ramos, 2009)	79
Figura 5.16 - Tipos de fraturas em peças de madeira sujeitas a compressão axial (ASTM D-143, 1994).....	80
Figura 5.17 - Rotura por esmagamento da base	81
Figura 5.18 - Rotura por cisalhamento	81
Figura 5.19 - Correlação entre a extensão e a% degradação da viga L.....	82
Figura 5.20 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga L.....	82
Figura 5.21 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga L	83
Figura 5.22 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga R.....	84
Figura 5.24 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga R	84
Figura 5.23 - Correlação entre extensão e a massa volúmica da viga R	84
Figura 5.25 - Correlação entre a extensão e a% degradação da viga J.....	85
Figura 5.26 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga J.....	85
Figura 5.27 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga J	86
Figura 5.28 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga H+B3+U	88
Figura 5.30 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga H+B3+U.....	88
Figura 5.29 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga H+B3+U	88
Figura 5.31 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga Q	89
Figura 5.32 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga Q	89
Figura 5.33 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga Q.....	90
Figura 5.34 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga L..	92
Figura 5.35 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga L92	
Figura 5.36 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga R..	93
Figura 5.37 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga R93	
Figura 5.38 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga J...	94
Figura 5.39 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga J94	

Figura 5.40 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação viga H+B3+U	96
Figura 5.41 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga H+B3+U.....	96
Figura 5.42 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga Q .	97
Figura 5.43 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga Q.....	97
Figura 5.44 - Gráfico com correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica (Ramos, 2009)	98

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Classes de resistência (EN 338)	11
Quadro 2.2 - Principais espécies de madeira encontradas nos edifícios pombalinos (Cóias citando Santos, 2007)	21
Quadro 2.3 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por térmitas (NP EN 350-2, 2001)	33
Quadro 2.4 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por fungos (NP EN 350-2, 2001)	33
Quadro 2.5 - Durabilidade natural de acordo com a espécie (Adaptado EN NP 350-2, 2001).....	34
Quadro 2.6 - Classes de risco (Adaptado do LNEC, 1997).....	34
Quadro 3.1 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por <i>Hylotrupes bajulus</i> e <i>Anobium punctatum</i> (NP EN 350-2, 2001)	46
Quadro 3.2 - Durabilidade natural de acordo com espécie (Adaptado EN NP 350-2, 2001).....	46
Quadro 3.3 - Situações gerais de serviço e classes de risco de ataque por agentes biológicos (Adaptado de M1, 1997)	47
Quadro 4.1- Nomenclatura das Vigas.....	49
Quadro 4.2 - Caracterização do provete 2L-24 e respetivos valores iniciais	52
Quadro 4.3 - Valores obtidos no ensaio de saturação do provete 2L-24 e respetivo tratamento de dados	53
Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de compressão fornecidos pela prensa	55
Quadro 4.5 - Determinação do patamar de deformação	58
Quadro 5.1 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2U-1359	
Quadro 5.2 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2U-2359	
Quadro 5.3 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 4J-12	60
Quadro 5.4 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2H-1 .	60
Quadro 5.5 - Resultados do provete 2L-24 (degradado por caruncho)	61

Quadro 5.6 – Resultados do provete 2L-3 (são).....	62
Quadro 5.7 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga J.....	63
Quadro 5.8 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga L.....	64
Quadro 5.9 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga R.....	64
Quadro 5.10 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga B/3.....	64
Quadro 5.11 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga H.....	65
Quadro 5.12 - Valores do $\Delta M_{\text{saturação}}$ da viga Q.....	65
Quadro 5.13 - Valores da variação de massa devido à degradação e massa volúmica de todos os provetes que foram submetidos a ensaios mecânicos.....	67
Quadro 5.14 - Resumo dos resultados para os provetes da viga L.....	69
Quadro 5.15 - Resumo dos resultados para os provetes da viga R.....	70
Quadro 5.16 - Resumo dos resultados para os provetes da viga J.....	70
Quadro 5.17 - Resumo dos resultados para os provetes da viga Q.....	70
Quadro 5.18 - Resumo dos resultados para os provetes da viga U.....	71
Quadro 5.19 - Resumo dos resultados para os provetes da viga H.....	71
Quadro 5.20 - Resumo dos resultados para os provetes da viga B/3.....	71
Quadro 5.21 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga L.....	72
Quadro 5.22 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga R.....	73
Quadro 5.23 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga J.....	74
Quadro 5.24 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para as vigas H+B3+U.....	75
Quadro 5.25 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com tensão de rotura para a viga Q.....	76
Quadro 5.26 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga L.....	82

Quadro 5.27 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga R	83
Quadro 5.28 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga J	85
Quadro 5.29 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga H+B3+U	87
Quadro 5.30 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com extensão para a viga Q	89
Quadro 5.31 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga L	92
Quadro 5.32 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga R	93
Quadro 5.33 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga J	94
Quadro 5.34 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga H+B3+U	95
Quadro 5.35 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com módulo de elasticidade para a viga Q	96

Índice de Anexos

Anexo 1 – Ensaio de Saturação

Provete 4J-33 e 4J-34	A 1
Provete 4J-41 e 4J-52.....	A 2
Provete 4J-53 e 4J-54.....	A 3
Provete 4J-61 e 4J-62.....	A 4
Provete 4J-73.....	A 5
Provete 2L-12 e 2L-13.....	A 6
Provete 2L-23 e 2L-24.....	A 7
Provete 2L-3.....	A 8
Provete 2R-11 e 2R-22.....	A 9
Provete 2R-31 e 2R-53.....	A 10
Provete 2R-54 e 2R-62.....	A 11
Provete 2R-63.....	A 12
Provete 2B/3-11 e 2B/3-12.....	A 13
Provete 2B/3-13.....	A 14
Provete 2H-11 e 2H-23.....	A 15
Provete 2H-32.....	A 16
Provete 2U-11 e 2U-12.....	A 17
Provete 2U-14.....	A 18
Provete 2Q-32 e 2Q24.....	A 19
Provete 2Q-71 e 2Q-82.....	A 20
Provete 2Q-42 e 2Q-53.....	A 21
Provete 2Q-72.....	A 22
Cálculo da variação de massa devido à degradação.....	A 23

Anexo 2 – Ensaio de compressão

Provete 4J-33.....	A 24
Provete 4J-34.....	A 25
Provete 4J-41.....	A 26
Provete 4J-52.....	A 27
Provete 4J-53.....	A 28
Provete 4J-54.....	A 29
Provete 4J-61.....	A 30
Provete 4J-62.....	A 31
Provete 4J-73.....	A 32
Provete 2L-13.....	A 33
Provete 2L-12.....	A 34
Provete 2L-23.....	A 35
Provete 2L-24.....	A 36
Provete 2L-3.....	A 37
Provete 2R-11.....	A 38
Provete 2R-22.....	A 39
Provete 2R-31.....	A 40
Provete 2R-53.....	A 41
Provete 2R-54.....	A 42
Provete 2R-62.....	A 43
Provete 2R-63.....	A 44
Provete 2B/3-11.....	A 45
Provete 2B/3-12.....	A 46
Provete 2B/3-13.....	A 47
Provete 2H-11.....	A 48

Provete 2H-23.....	A 49
Provete 2H-32.....	A 50
Provete 2U-11.....	A 51
Provete 2U-12.....	A 52
Provete 2U-14.....	A 53
Provete 2Q-24.....	A 54
Provete 2Q-32.....	A 55
Provete 2Q-42.....	A 56
Provete 2Q-53.....	A 57
Provete 2Q-71.....	A 58
Provete 2Q-72.....	A 59
Provete 2Q-82.....	A 60

Símbolos e Siglas

b e h - dimensões da secção do provete, em mm;

ρ - massa volúmica;

E - módulo de elasticidade;

ε - deformação/extensão do provete, em %;

f_c - tensão de rotura por ensaio de compressão paralelo às fibras, em MPa;

$F_{m\acute{a}x}$ - força máxima de rotura, em kN;

H% - teor em água na madeira;

I - distância entre apoios do provete em flexão;

L - comprimento total do provete, em m;

P_H - peso da madeira húmida;

P_S - peso da madeira seca;

P' - carga ao limite proporcional;

R_t - retração na direção tangencial às camadas de crescimento;

R_r - retração na direção perpendicular às camadas de crescimento;

R_a - retração na direção do eixo da árvore;

V_h - volume do provete de madeira para teor de água h;

y - flecha produzida pela carga;

ΔM (%) - variação de massa devido à absorção de água do provete em cada intervalo de tempo de medição;

$\Delta M_{saturação}$ (%) - variação de massa total devido à absorção de água do provete;

$\Delta M_{degradação}$ (%) - variação de massa devido à degradação;

$\Delta M_{s\grave{a}}$ (%) - variação de massa devido à absorção de água pela madeira sã;

ΔL - deslocamento do provete, em m.

1.

Introdução

1.1 Considerações gerais

Após o terramoto de 1755, a reconstrução da cidade de Lisboa ficou como uma das maiores obras de Marquês de Pombal. Nesta reconstrução foram elaborados alguns planos de construção que incluíam a forma e traçados das ruas, bem como a arquitetura dos edifícios dando especial atenção à construção antissísmica para prevenir novas catástrofes como aquela que tinha levado à reconstrução da cidade.

Para além da construção que seria mais resistente a este tipo de fenómenos, foi tido em atenção outro tipo de fatores como o facto de os prédios serem mais altos, de forma a rentabilizar o espaço, construção de uma rede de esgotos que até à altura não existia, melhoria de muitos aspetos relativos aos edifícios como a ventilação e salubridade (Lopes, 2010).

Os edifícios pombalinos são caracterizados por terem todos praticamente a mesma altura e serem muito semelhantes em termos de fachadas, principalmente no que se refere a edifícios que se encontram nas mesmas ruas. Numa análise mais profunda, identificam-se facilmente através da estrutura em “gaiola”.

A estrutura em “gaiola” é um sistema antissísmico em que a estrutura tridimensional de madeira fica envolvida em alvenaria, permitindo às construções uma maior resistência aos incêndios. Esta estrutura encontra-se na face interior das paredes exteriores e nas paredes interiores acima do 1º andar. As construções pombalinas caracterizam-se por, para além da estrutura em “gaiola”, serem fundadas por estacas de madeira sobre as quais eram construídos arcos de alvenaria de pedra (Ramos, 2000). As fachadas e as empenas são de alvenaria de pedra e os pavimentos acima do 1º andar são constituídos por vigamento e soalho. As coberturas são constituídas por asnas triangulares também em madeira.

A madeira mais utilizada na construção pombalina era o Pinho Bravo, o Castanho e o Carvalho. A Casquinha e o Pitespaine eram utilizados sobretudo em obras de maior importância (Henriques, 2011).

Nestes edifícios antigos podem-se encontrar vários tipos de anomalias. A madeira, quer pelas suas características, quer por ser um dos materiais mais presentes nestes edifícios pombalinos, é um dos materiais que necessita de maior cuidado na reabilitação e manutenção dessas construções.

A degradação em madeiras pode ser causada pela ação de agentes biológicos, ação de agentes atmosféricos, ação da água e podem ocorrer, também, anomalias estruturais na madeira devidas a erros de conceção e construção. A água é o principal fator de degradação, podendo causar variações dimensionais significativas (dilatações e retrações) e fissuras, alterações físicas, químicas e mecânicas, deixando a madeira mais suscetível a ataques de agentes biológicos (Appleton, 2011).

A degradação da madeira causada por caruncho (agente biológico) poderá ter como consequência, uma perda de massa significativa e o aparecimento de uma rede de galerias que se cruzam entre si. Como consequência, propriedades tais como a durabilidade, massa volúmica, resistência à compressão, à flexão e à tração serão afetadas.

1.2 Objetivos e metodologias

Com a elaboração desta dissertação pretende-se:

- Adquirir conhecimento sobre madeira em geral, sua função nos edifícios antigos e avaliar as condições em que se encontram os elementos de madeira nos edifícios antigos;
- Apresentar algumas formas de avaliação das estruturas de madeira, equipamentos necessários para efetuar as inspeções aos edifícios e os ensaios que se podem realizar para melhor avaliar o estado de degradação dos elementos de madeira;

- Avaliar experimentalmente como a degradação por caruncho em vigas de madeira antigas afeta a resistência mecânica à compressão, através da determinação da percentagem de água absorvida, da massa volúmica aparente e da resistência à compressão de provetes degradados e sãos, obtidos a partir de vigas pombalinas.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação encontra-se organizada nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Breve introdução à temática da dissertação, os objetivos a cumprir com o desenvolvimento deste trabalho e a sua organização.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica sobre a constituição da madeira e as suas características físicas e mecânicas. Caracterização dos edifícios pombalinos e gaioleiros, com a descrição dos locais onde a madeira era utilizada e sua respetiva função neste tipo de construção. Referência aos vários tipos de patologias das madeiras e as suas causas, assim como, alguns métodos de avaliação e de diagnóstico dos estados de conservação dos elementos de madeira que se podem encontrar nos edifícios.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica sobre o estado da arte da degradação por caruncho.

Capítulo 4 – Apresentação do procedimento experimental e descrição dos métodos usados para a determinação da percentagem de humidade de equilíbrio, percentagem de saturação e resistência à compressão.

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados obtidos.

Capítulo 6 – Conclusões sobre o trabalho desenvolvido, identificação das principais dificuldades e limitações encontradas e referências aos aspetos que poderão ser objeto de futuros desenvolvimentos.

2.

Madeira na construção

2.1 Madeira como elemento de construção

A madeira foi um dos materiais mais usados nas construções antigas. No início do século XX começa a ser substituída na construção a nível estrutural pelo aço e pelo betão armado. Continua, no entanto, a ser bastante usada em outros elementos da construção, essencialmente não estruturais, devido às suas características, como por exemplo, sua eficiência energética.

Apesar de a madeira ser dos materiais mais antigos usados na construção a nível estrutural, até há poucos anos não existiam normas e regulamentos sobre o cálculo de estruturas de madeira o que levou à insegurança na sua utilização.

2.2 Constituição da madeira

A madeira é um composto orgânico de origem natural, o que lhe confere uma grande variabilidade de características. É o material que constitui o tronco das árvores, cuja secção é constituída pelo lenho e pela casca. Entre estes existe uma camada fina de células designada por *câmbio*. Estas células têm a capacidade de se dividirem, permitindo que se desenvolva o lenho (Henriques, 2005). O tronco das árvores aumenta de espessura consoante a estação do ano, ou seja, esse aumento de espessura não é uniforme. Vão-se formando anéis anuais, sendo cada um deles constituídos por uma camada de madeira que se desenvolve mais rapidamente durante a Primavera e outra que se desenvolve mais lentamente no Outono e por isso é mais densa. O crescimento da árvore em altura deve-se à divisão das células situadas nas extremidades (Henriques, 2005).

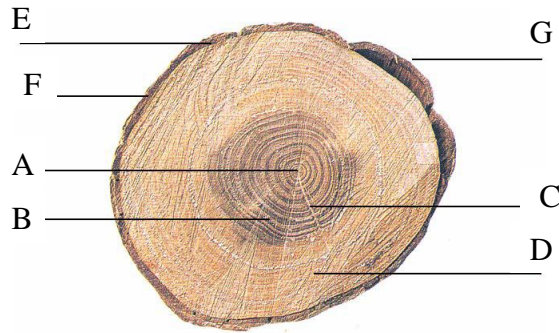


Figura 2.1 - Corte transversal do tronco de uma árvore (Adaptado de Júnior, 2006)

Legenda:

- A – Medula
- B – Cerne
- C – Raio medular
- D – Borne
- E – Câmbio
- F – Líber
- G – Casca

A **casca** é a camada mais externa e mais irregular do tronco das árvores e é constituída por duas camadas: a epidérmica e o líber. A primeira é constituída por células mortas que têm como principal função a proteção do tronco e a segunda é constituída por células vivas que são responsáveis pela condução da seiva.

O **câmbio** é constituído por um tecido designado merismático que gera novas células e que leva ao desenvolvimento do tronco da árvore. Uma parte transforma-se em líber (crescimento para o exterior) e outra transforma-se em borne (crescimento para o interior).

O **lenho** é constituído pelo borne e cerne e é a parte do tronco da árvore que é utilizada para a construção.

O **borne** é a camada mais externa do lenho e é constituído por células vivas que têm como função a condução da seiva bruta através da ascensão capilar, por isso apresenta grande quantidade de água e de substâncias nutritivas. Esta camada corresponde à madeira mais jovem da árvore e apresenta uma cor clara e é menos resistente que o cerne.

O **cerne** é a camada interior do lenho, sendo constituído por células mortas e o seu desenvolvimento deve-se às transformações celulares que ocorrem no borne. O cerne é mais denso, pelo que tem maior resistência e a sua coloração é mais escura que a do borne. Como não existe condução de água, o cerne é mais resistente aos problemas relacionados com humidade e agentes biológicos.

A **medula** é a parte central do tronco da árvore e de pequena secção que não apresenta resistência mecânica nem durabilidade.

A durabilidade da madeira varia com a massa volúmica, a existência de nutrientes (açúcar e amido) e substâncias tóxicas como a resina.

A melhor madeira para a construção é a madeira densa mas tem o inconveniente de dificultar a penetração de produtos de tratamento e de prevenção contra ataques de agentes biológicos.

A madeira tem propriedades anisotrópicas, ou seja, as suas propriedades químicas e mecânicas variam consoante a direção que se considere: perpendicular ou tangencial às fibras. É um material higroscópico, perde e ganha humidade de acordo com a temperatura e humidade do meio onde está inserido. Estas variações do teor de água levam a que a madeira altere as suas dimensões embora não ocorram de igual modo em todas as direções (LNEC, 1997).

As árvores são classificadas em dois grandes grupos de acordo com estrutura anatómica do seu lenho: Resinosas (gimnospérmicas), onde se incluem os pinhos e as Folhosas (angiospérmicas) como o castanho e o carvalho.

A madeira de Resinosas apresenta uma estrutura anatómica simples formada por traqueídeos que são células alongadas que servem de suporte à árvore e transportam a seiva bruta (Machado, 2009). A madeira de Folhosas já apresenta uma estrutura mais complexa que resulta da maior especialização das células nas respetivas atividades (de suporte ou de condução da seiva). As árvores resinosas apresentam folhas em forma de agulha e que são geralmente folha persistente. Permitem obter madeiras macias e predominam nos países de clima temperado. As Folhosas são árvores com folhas normalmente largas e caducas de onde se obtêm madeiras macias a muito duras que predominam nos climas tropicais e florestas mistas, nas zonas intermédias.

A passagem da água de célula para célula deve-se à existência de pontuações areoladas nas paredes dos traqueídeos, ou seja, são estas pontuações que limitam a capacidade de impregnação de líquidos na madeira (Henriques, 2011).

Estas pontuações também variam em função do lenho, sendo que no lenho inicial (anéis de primavera) existem numerosas pontuações areoladas e no lenho final (anéis de Outono) este número é bastante mais reduzido exercendo este apenas a função de suporte (Henriques citando Fonseca & Lousada, 2011).

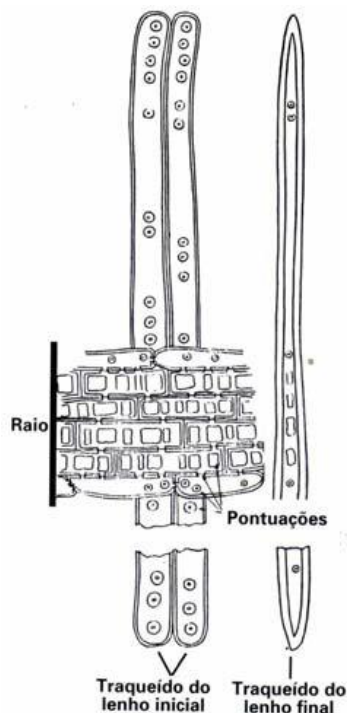


Figura 2.2 - Pormenor das pontuações areoladas dos traqueídeos do lenho de uma resinosa (ampliação cerca de 100×) (Henriques citando Carvalho, 1996)

2.3 Composição química da madeira

A madeira é um material natural cuja composição não pode ser definida com exatidão (Silva, 2010) pois pode variar mesmo dentro da mesma árvore. De um modo genérico podemos considerar a composição química da madeira a seguinte (Ramos, 2010):

Celulose – 40% a 50%

Hemiceluloses – 20% a 30%

Lenhina – 20% a 30%

Outras substâncias (extrativos e substâncias minerais) – 5% a 7%

Os três primeiros compostos são os constituintes estruturais da madeira, sendo a celulose o principal componente da parede celular.

A celulose é um polímero linear, constituído por moléculas de β -D- glucose. Estes monómeros ligam-se covalentemente, constituindo longas cadeias lineares.

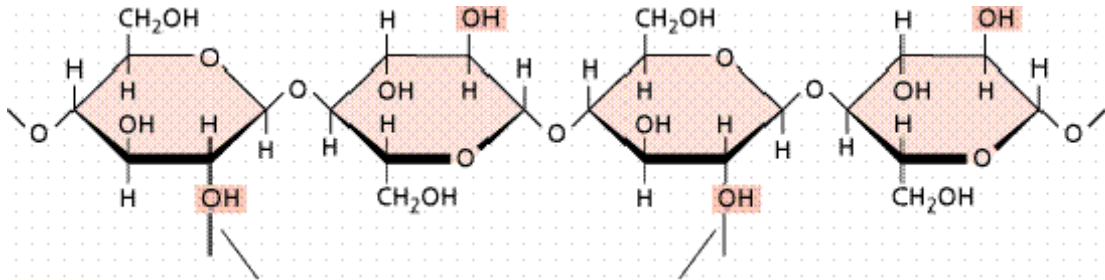


Figura 2.3 - Composição química da madeira (Klock, 2013)

As cadeias ligam-se entre si através de ligações intermoleculares do tipo *pontes de hidrogénio* e de *Van der Waals*. Estas cadeias, ligadas entre si, formam as fibrilas, que se agrupam em microfibrilas, constituindo a parede celular.

As hemiceluloses são polímeros constituídos por cinco tipos de açúcares, apresentando uma estrutura linear ramificada. Têm menor peso molecular que a celulose, mas com o mesmo tipo de ligações entre as cadeias. Na parede celular constituem a matriz de suporte das microfibras de celulose.

A lenhina, é um polímero cuja cadeia inclui anéis aromáticos de vários tipos de álcoois. Apresenta um arranjo estrutural tridimensional, um arranjo mais complexo que a celulose e as hemiceluloses. Como resultado da sua estrutura química e fortes ligações covalentes entre as cadeias, a lenhina é um polímero rígido, que confere coesão à parede celular.

A celulose é o principal responsável pela higroscopicidade da madeira: é através dos grupos hidroxilo – OH –, presentes nas cadeias, que as moléculas de água se ligam à madeira. A hemicelulose também contribui para a higroscopicidade da madeira, ao contrário da lenhite (Silva, 2010).

A estrutura da celulose e tipo de ligações (dentro e entre as cadeias) que apresenta são responsáveis pela rigidez, grande resistência axial da madeira à tração, capacidade de deformação plástica. A hemicelulose e a lenhina, sendo agregadores das moléculas de celulose, dando consistência à parede celular, conferem à madeira elasticidade e resistência à compressão (Silva, 2010).

2.4 Propriedades da madeira

2.4.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira variam muito de espécie para espécie e de acordo com vários fatores tais como: a percentagem de borne e de cerne, a existência de defeitos (nós, inclinação do fio), o teor de água e a temperatura.

As propriedades mecânicas da madeira a empregar em estruturas devem respeitar a classe de qualidade ou classes de resistência. As classes de qualidade limitam os valores de variação das propriedades mecânicas para cada espécie de madeira de maneira a definir o comportamento para cada tipo de madeira (LNEC, 1997).

As classes de resistência permitem definir as propriedades mecânicas de um material sem que seja necessário o conhecimento das características e propriedades das madeiras que existem no mercado (LNEC, 1997).

A norma EN-338 estabelece dois conjuntos de classes de resistência para a madeira, dividindo-as num grupo para as resinosas e outro para as folhosas, sendo que cada classe de resistência é definida por um conjunto de valores característicos de resistência, módulo de elasticidade e massa volúmica (Cruz, 2000).

Os ensaios mais comuns que se podem realizar e que melhor caracterizam mecanicamente a madeira encontram-se definidos pelas normas EN 408:2003, ASTM D143-94:2007e diversas NP. Os ensaios são os seguintes:

- Compressão axial ou paralela às fibras (NP 618:1973)
- Tração axial ou paralela às fibras;
- Flexão estática (NP 619:1973);

- Flexão dinâmica (NP 620:1973);
- Corte (NP 623:1973);
- Dureza (NP 617:1973);
- Tração transversal ou perpendicular às fibras (NP 621:1973)
- Compressão transversal ou perpendicular às fibras.

Quadro 2.1 - Classes de resistência (EN 338)

Propriedades	Classes de resistência					
	Resinosas				Folhosas	
Valores característicos	C16	C18	C24	C30	D40	D60
	N/mm^2					
Flexão estática	16	18	24	30	40	60
Tração paralela às fibras	10	11	14	18	24	36
Tração perpendicular às fibras	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7
Compressão paralela às fibras	17	18	21	23	26	32
Compressão perpendicular às fibras	4,6	4,8	5,3	5,7	8,8	10,5
Corte	1,8	2	2,5	3	3,8	5,3
	kN/mm^2					
Módulo de elasticidade						
Paralelo às fibras						
Valor médio	8	9	11	12	11	17
Valor característico	5,4	6	7,4	8	9,4	14,3
Perpendicular às fibras (valor médio)	0,27	0,3	0,37	0,4	0,75	1,13
Módulo de distorção (valor característico)	0,5	0,56	0,69	0,75	0,7	1,06
	kg/m^3					
Massa volúmica						
Valor médio	370	380	420	460	700	840
Valor característico	310	320	350	380	590	700

2.4.1.1 Deformação do provete durante o ensaio de compressão

A madeira está normalmente sujeita a tensões de compressão na direção paralela às fibras devido ao próprio peso da árvore, o que leva a que esta em condições de serviço tenha um bom comportamento e desempenho.

Os valores de resistência à compressão paralela às fibras para madeira sãs de resinosas são 40 a 50 N/mm² (Negrão e Amorim, 2009).

Como mostra a gráfico seguinte, o comportamento da madeira numa primeira fase é bastante linear (deformação elástica) até se atingir o valor máximo de tensão de compressão. Depois de atingido esse valor máximo forma-se um patamar com inclinação ligeiramente descendente, ou seja, depois de atingido o valor máximo de força que o provete consegue suportar este deforma-se bastante para níveis de tensão inferiores até atingir a rotura. Esta deformação plástica corresponde ao escorregamento das cadeias poliméricas entre si e representa a deformação que a madeira admite sofrer sem que se dê a rotura, ou seja, a tensão que consegue absorver. Este escorregamento é dificultado pela presença de defeitos tais como vazios e imperfeições, na madeira. O gráfico seguinte mostra o comportamento tensão-extensão para os provetes de madeira sã quando submetidos a compressão na direção paralela às fibras.

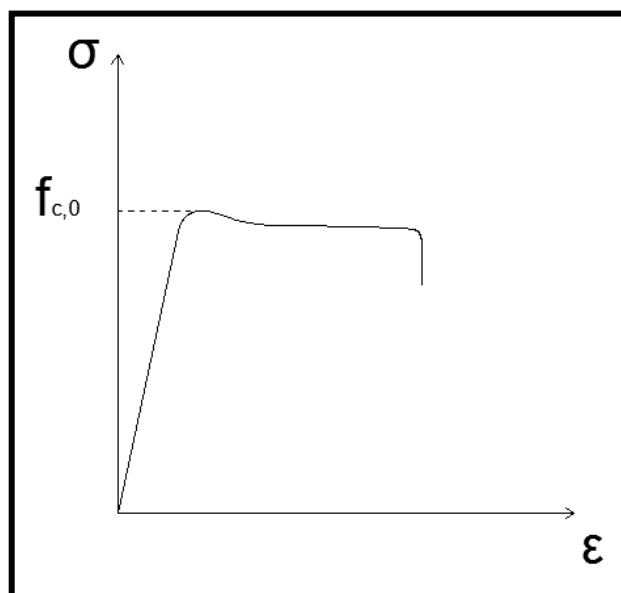


Figura 2.4 - Gráfico do comportamento tensão-extensão para provetes de madeira limpa carregados na direção do fio (Adaptado de Negrão e Amorim, 2009)

O gráfico apresentado na Fig. 2.5 foi obtido com os resultados dos ensaios laboratoriais desenvolvidos ao longo deste trabalho e demonstra que o provete sã tem o mesmo comportamento que o verificado no gráfico teórico anterior. O provete degradado tem um patamar de deformação bastante inferior porque, depois de atingido o valor de tensão de rotura máxima, não consegue absorver as tensões durante muito tempo e por isso atinge a rotura mais rapidamente.

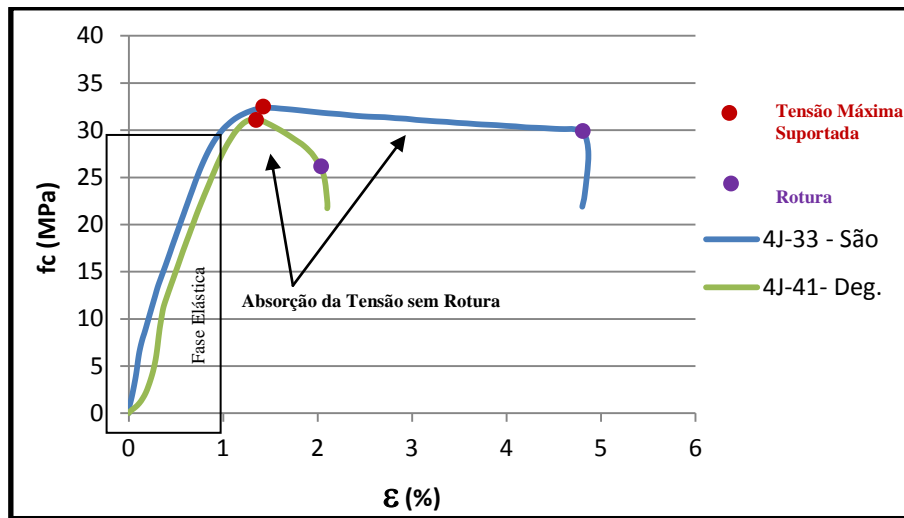


Figura 2.5 - Gráfico do comportamento tensão-extensão para um provete de madeira degradado e um são obtido por ensaio laboratorial.

2.4.1.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que permite determinar a rigidez ou flexibilidade de um material (Carvalho, 1996). A diminuição do módulo de elasticidade é uma forma de avaliar o nível de degradação das madeiras.

O conhecimento do módulo de elasticidade dos elementos de madeira no cálculo de estruturas é cada vez mais importante pois este permite relacionar a densidade e a resistência mecânica dos elementos às solicitações que lhes são impostas. Este permite também perceber a presença de defeitos e o comportamento resistente (Carvalho, 1996).

O módulo de elasticidade, E, é calculado segundo a equação [1]:

$$E = \frac{P' \times I^3}{4 \times b \times h^3 \times y} \quad [1]$$

Em que:

P' – carga no limite proporcional

I – distância entre os apoios do provete em flexão (vão)

b x h – dimensão da secção transversal da peça

y – flecha produzida pela carga

2.4.2 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas da madeira irão ser consideradas em seguida.

2.4.2.1 Higroscopicidade e teor de água

Higroscopicidade é a capacidade que a madeira apresenta de absorver humidade do meio ambiente e de a perder por evaporação. O grau de Higroscopicidade da madeira está diretamente relacionado com o teor em celulose e hemiceluloses que a madeira apresenta (Silva, 2010).

Um dos maiores inimigos da madeira é a água, uma vez que a sua presença pode levar ao aparecimento de agentes biológicos, empenamentos, fendas, retração e alteração do seu aspeto.

A presença de água na madeira pode dever-se a vários fatores como a higroscopicidade da madeira, humidade existente no ambiente, infiltrações e condensações que em ciclos de secagem e humedificação pode levar à sua alteração e perda de resistência mecânica (Bastos, 2011).

A água pode-se encontrar na madeira de três formas distintas, como água de constituição, água de impregnação e água livre.

A água de constituição faz parte da constituição química da madeira. Esta água não é contabilizada como humidade da madeira (Silva, 2010).

A água de impregnação é a água que se encontra adsorvida na madeira, está retida nas paredes celulares. O aparecimento dessas moléculas entre cadeias de celulose leva ao afastamento destas, com a conseqüente alteração de dimensões (Carvalho citando Silva, 1996). É mais difícil de ser retirada que a água livre, e a sua remoção leva à retração da madeira devido às alterações na forma e coesão dos tecidos (Henriques, 2005).

A água livre é a que se remove com mais facilidade pois esta não se encontra ligada ao material lenhoso, encontrando-se retida na madeira por forças capilares. A sua remoção não provoca alterações dimensionais nas peças de madeira (Henriques, 2005).

Após o abate da árvore, a madeira começa a perder a água que se encontra no interior das cavidades celulares (água livre) até valores de teor de água entre 25% e 35% dependendo da espécie. Este teor de água é designado por ponto de saturação das fibras. Se o processo de secagem levar a teores de água abaixo do ponto de saturação das fibras levará à remoção de moléculas de água do interior das paredes das fibras da madeira com conseqüente alteração geométrica (retrações e empenos), perda de resistência e rigidez dos elementos de madeira (Machado, 2009).

A humidade da madeira (H) [%] é definida, em percentagem, como o quociente entre o peso da água contida numa determinada peça de madeira e o peso dessa madeira anidra, ou seja, completamente seca (NP - 614, 1973).

$$H (\%) = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100 \quad [2]$$

Sendo:

P_H – Peso da madeira húmida

P_S – Peso da madeira seca

O teor em água na madeira varia consoante a humidade relativa e a temperatura do ar ambiente, ocorrendo fenómenos de absorção e de dessorção de água até se atingir o equilíbrio higroscópico.

É neste ponto, equilíbrio higroscópico, que o teor de água da madeira está em equilíbrio com o meio ambiente, igualando as perdas e os ganhos de água (Cruz, 2000). A humidade relativa do meio ambiente é o fator que mais influencia a humidade de equilíbrio (Carvalho citando Galvão *et al.*, 1985; Skaar, 1988). No entanto, nas mesmas condições de exposição ambiental, a humidade crítica varia com as percentagens dos constituintes químicos da parede celular e da localização no tronco (cerne ou borne) (Carvalho, 2009).

A utilização na construção dos elementos de madeira com teores de água desadequados leva ao aparecimento de anomalias como empenos, abertura de fendas e rotação dos apoios. Por isso, é de grande importância que a madeira seja aplicada nas condições ambiente de serviço a que os elementos ficarão expostos e também em caso de modificação dessas condições em estruturas antigas de forma a evitar anomalias e mudanças de comportamento das estruturas. Uma das formas de caracterizar as condições ambiente dos edifícios é através das curvas de equilíbrio higrotérmico da madeira que em função da temperatura e humidade relativa do ar permite definir o teor de água de equilíbrio (Machado, 2009).

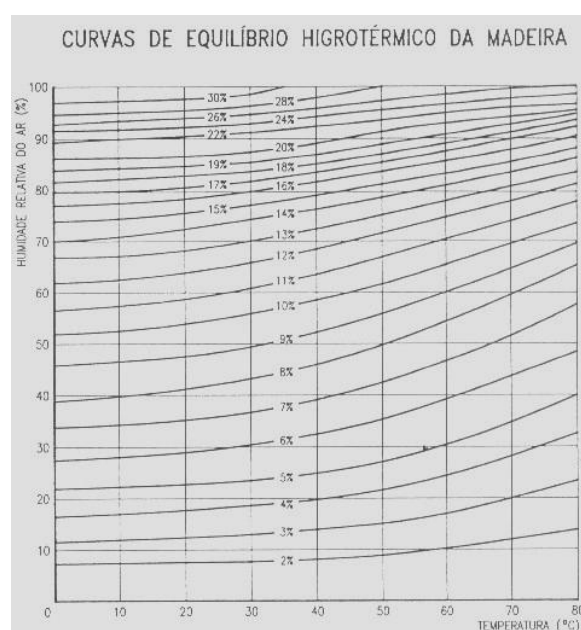


Figura 2.6 - Curvas de equilíbrio higrotérmico (Machado, 2009)

2.4.2.2 Densidade ou massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente, ou apenas massa volúmica é, por definição, a massa por unidade de volume que uma peça ocupa. Devido às características higroscópicas da madeira e à sua porosidade, existem vários modos de expressar a massa volúmica da madeira.

A massa volúmica é uma das propriedades mais importantes da madeira, pois tem influencia direta sobre outras propriedades. Por exemplo, as madeiras mais densas são mais resistentes, elásticas e duras que as mais leves. A massa volúmica é um bom parâmetro para avaliar a qualidade da madeira.

A massa volúmica aparente (ρ) da madeira é definido considerando como volume, o volume total: o volume ocupado pela massa de madeira e o volume correspondente aos poros. Deste modo, é também contabilizado o teor de água retida nos poros da madeira (Júnior, 2006).

$$\rho = \frac{Ph}{Vh} \quad [3]$$

Em que:

Ph – Peso do provete de madeira para o teor em água h

Vh – volume do provete de madeira para o teor em água h

Na determinação da massa volúmica de determinada amostra, terá que ser referido sempre o teor de humidade do meio ambiente. Usualmente, considera-se a massa volúmica normal a que corresponde a um teor de água 12% (Henriques, 2011) (aproximadamente 65% humidade e 20°C).

2.4.2.3 Retractilidade

A retractsilidade é uma consequência da presença de água na madeira e da sua perda. A alternância entre o estado saturado e o estado seco conduz a alterações nas dimensões das peças de madeira. Muitos dos defeitos encontrados em peças de madeira devem-se ao mau processo de secagem que muitas vezes resulta no aparecimento de defeitos como fendas e empenamentos, os quais influenciam a resistência mecânica da madeira (Júnior, 2006).

A retração linear é o quociente, em percentagem, da variação do comprimento de um segmento tomado sobre o provete e podem considerar-se três direções fundamentais, a axial, a radial e a tangencial.

A retração volumétrica de um provete é o quociente, em percentagem, da variação do seu volume devido a perda de humidade. A retração volumétrica total corresponde à diminuição da humidade desde o teor de saturação das fibras até 0% (Carvalho, 1996).

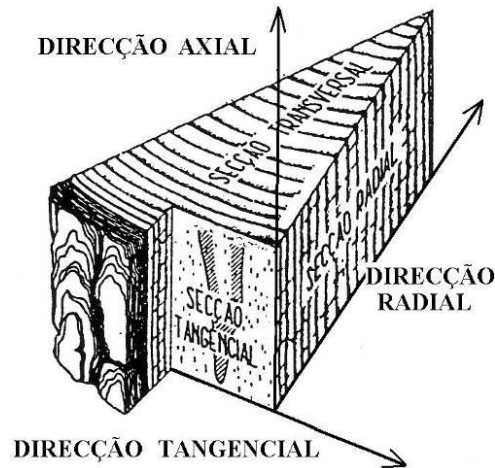


Figura 2.7 - Direções preferenciais da madeira (Henriques citando Machado, 2005)

A retração na madeira dá-se de forma diferente consoante a direção (tangencial, radial ou axial). Para o cálculo da retração volumétrica (R_v) é usada a seguinte expressão:

$$R_v = R_t + R_r + R_a \quad [4]$$

Em que:

R_t – retração na direção tangencial às camadas de crescimento

R_r – retração na direção perpendicular às camadas de crescimento

R_a – retração na direção do eixo da árvore

2.4.2.4 Resistência ao fogo

A madeira é um material combustível pois contém elementos na sua constituição como o carbono, o oxigénio e o hidrogénio. No entanto, é tida como um material com reação ao fogo não muito boa, apresentando alguma resistência perante este (Júnior, 2006).

A madeira é um mau condutor térmico e por isso com baixa condutibilidade térmica o que é uma vantagem relativamente a outros materiais de construção.

Isto porque a celulose que compõe as células da madeira e a estrutura dos tecidos que a constituem permitem aprisionar massas de ar no seu interior o que contribui para as características isolantes da madeira. A condutibilidade térmica depende do peso específico e da humidade dos elementos de madeira, assim quanto maior for o peso específico e a humidade maior a condutibilidade térmica.

A resistência ao fogo de um dado material é expresso pela capacidade desse material suportar, durante um certo intervalo de tempo, a sua função (resistência, estanqueidade e isolamento).

Em caso de incêndio forma-se uma camada calcinada isolante que se deve à rápida combustão do material da superfície dos elementos de madeira. Essa camada carbonizada isolante dificulta a transmissão de calor e impede o avanço do fogo pois esta tem uma condutibilidade térmica de cerca de 1/6 da madeira maciça. Como consequência, as camadas interiores mantêm-se resistentes durante muito mais tempo.

Sob a camada carbonizada encontra-se uma camada designada por camada de pirólise com cerca de 5 mm de espessura que não está completamente decomposta e que permite que a restante secção se encontre a uma temperatura baixa, mantendo a capacidade e resistência mecânica. No interior dos elementos de madeira mantem-se uma secção útil que se mantém fria mesmo quando exposta a altas temperaturas durante algum tempo, conservando assim as propriedades físicas inalteradas (Anastácio, 2010).

A madeira apresenta, portanto, e ao contrário do que se possa pensar, melhor comportamento em caso de fogo do que outros materiais como o aço. A perda de resistência da madeira, em geral, é devida à perda de secção das peças e não à diminuição das propriedades mecânicas devido ao fogo (Júnior, 2006).

2.5 Construção Pombalina e Gaioleira

2.5.1 Caracterização dos edifícios de alvenaria Pombalinos e Similares (1755 – 1870)

Com o terramoto de 1755 houve a necessidade de rápida reconstrução da cidade para suprimir a falta de habitação, a qual foi feita com base numa estrutura antissísmica com o objetivo evitar um novo desastre e tamanho cenário de destruição.

Na base deste sistema sismo-resistente encontram-se treliças tridimensionais contraventadas de madeira, unidas perpendicularmente entre si, sistema conhecido como Gaiola Pombalina que permitia resistir as forças em qualquer direção (Miranda, 2011).

De um modo geral os edifícios pombalinos estão inseridos numa lógica de quarteirão, tendo sido o seu comportamento estrutural pensado em termos de conjunto e não de edifícios individualmente. A construção Pombalina tinha originalmente a altura limitada a quatro pisos ($r/c + 3$ pisos).

Os alicerces dos edifícios são em alvenaria de pedra com arcos apoiados em estacas de madeira de pinho com diâmetro entre os 15 a 18 cm e comprimento de cerca de 1.5 m. O piso térreo é alto com arcaria de pedra ou abóbadas de tijolo (Henriques, 2011) e as paredes-mestras, em alvenaria de pedra, de razoável qualidade. Acima do piso térreo surge a gaiola cuja ligação é garantida através de ferrolhos chumbados nas pedras e paredes meãs que servem de paredes corta-fogo.

As madeiras mais utilizadas nesta fase eram o castanho proveniente do norte do país, dando-se um aumento crescente da utilização de Casquinha com proveniência sobretudo do centro e norte da Europa e de Pitespaine em edifícios de grande porte ou nobreza proveniente da América do Norte. (Machado, 2009).

No quadro 2.2 apresentam-se os principais elementos na construção pombalina e a respetiva madeira mais utilizada para cada um.

Quadro 2.2 - Principais espécies de madeira encontradas nos edifícios pombalinos
(Cóias citando Santos, 2007)

Elemento	Designação corrente	Designação científica
Asnas da cobertura		
Gaiola das paredes frontais	Carvalho	Quercus spp
	Castanho	Castanea sativa
	Sobro	Quercus suber
	Azinhão	Quercus rotundifolia
Pisos	Pitespaine	Pinus palustris, Pinus oocapa, Pinus caribaea
Grades para arranques de fundações	Pinho bravo	Pinus pinaster
Estacas	Pinho bravo	Pinus pinaster

2.5.2 Caracterização dos edifícios de alvenaria do Tipo Gaioleiro (1870 – 1930)

Algumas décadas depois do terramoto começam-se a esquecer as exigências construtivas tidas em conta na construção pombalina, tendo surgido uma época de grande crescimento e menor qualidade na construção. Começam-se a construir edifícios mais altos com cinco a seis pisos e utiliza-se cada vez menos a gaiola de madeira.

Nestes edifícios as paredes-mestras eram em pedra rija e argamassas de cal com grande espessura (0,90 m no r/c e 0,5 m no quinto andar), paredes resistentes de tijolo maciço com espessura de cerca de 0,30 m e as paredes divisórias de tijolo furado na ordem dos 0,15 m. A estrutura dos pavimentos em barrotes de madeira descarrega diretamente sobre as paredes, através de alguns centímetros de entrega. (Henriques, 2011).

Com o tempo começa-se a utilizar vigas em ferro no r/c, em pilares interiores de edifícios, nas zonas dos elevadores e nas zonas húmidas como a cozinha e o WC começa-se a substituir o pavimento de madeira por betão, aparecem marquises em estruturas metálicas e uma rede de esgotos nos edifícios (Appleton, 2011).

O tipo de madeira mais utilizado nesta fase é o pinho bravo devido à sua abundância no nosso país, tornando-se a principal fonte de abastecimento das estruturas de madeira. (Henriques citando Appleton, 2011).

2.6 Coberturas

As coberturas podem ter várias formas, variando estas ao longo do tempo no que respeita à qualidade da construção ao do tipo de edifício onde são implantadas (Henriques, 2011). Uma das formas mais utilizada era a asna triangular (Figura 2.8) que permitem ser adaptadas e utilizadas desde coberturas com duas águas até coberturas com várias águas. Neste tipo de coberturas era utilizada telha de canudo que assenta sobre um guarda-pó ou forro (Cóias, 2007)

Nestes elementos estruturais as principais causas que podem levar à degradação da madeira são, por exemplo, a existência de telhas partidas que permitem a entrada de água. O teor de água na madeira aumentará para valores superiores a 20%, permitindo o ataque por parte de agentes biológicos e o seu apodrecimento, com conseqüente perda de massa e da resistência mecânica da madeira (Machado, 2009).



Figura 2.8 - Asnas triangulares

2.7 Pavimentos

Os pavimentos dos edifícios pombalinos e gaioleiros são constituídos, na sua maioria, por vigas e soalho, sendo as vigas ortogonais às paredes onde se encontram apoiadas ou encastradas. Esta era uma solução frequentemente usada até aos anos 30 do século XX mas que foi progressivamente substituída por lajes de betão, inicialmente nas zonas húmidas e passando depois a todo o pavimento.

Inicialmente as vigas eram constituídas por paus rolados e falqueados à face que recebia o soalho variando o diâmetro entre 0,10 e os 0,30 m e com comprimentos de 4 a 7 m. Mais recentemente os vigamentos são constituídos por elementos de madeira esquadriada, tendo as vigas uma largura de entre 0,07 e 0,14 m e altura entre 0,16 e 0,25 m e afastamentos entre vigas entre 0,4 e 0,5 m (Machado, 2009).

Para vencer maiores vãos surgem os pavimentos onde são utilizados os tarugos. Estes são pequenos troços de madeira com secção geralmente igual à das vigas e que se encontram intercaladas com estas de forma a impedir o bambeamento através da diminuição das vibrações.

Na construção pombalina a madeira mais frequentemente utilizada para a execução de pavimentos era a Casquinha e o Pitespaine, que ao longo do tempo foram sendo substituídas pelo pinho bravo que é predominante no nosso país.

As anomalias mais correntes devem-se ao aumento do teor de água na madeira devido à existência de humidade ambiente elevada que, em casos extremos, pode levar ao aparecimento de agentes biológicos, ocorrência de fendas e deterioração dos apoios.



Figura 2.9 - Pavimento, visto por baixo



Figura 2.10 - Entrega de viga do pavimento

2.8 Paredes

Na construção pombalina e gaioleira era utilizada madeira em paredes, quer em paredes de tabiques (não estruturais), quer em paredes de frontal (estruturais), quer em paredes exteriores de alvenaria. Nos frontais, as madeiras são envolvidas em alvenaria podendo, assim, considerar-se alvenaria armada. Os pavimentos e as paredes estão ligados entre si por meio de elementos metálicos e de madeira que permitem uma grande flexibilidade e um bom desempenho em caso de sismo (Machado, 2009).

A degradação destes elementos de madeira pode dever-se à humidade de construção, humidades devidas às águas da chuva, humidade de condensação e humidade do terreno. Outros fatores de degradação devem-se à existência de fendas nas paredes que permitem a penetração de água, ao rebentamento de canalizações, entre outros.

2.8.1 Paredes de alvenaria

A partir do rés-do-chão as paredes exteriores são constituídas por alvenaria de pedra rebocada, sendo esta argamassa constituída por cal aérea, pedras arrumadas e calçadas e com fragmentos cerâmicos, tendo de espessura entre os 0,9 e 1,1m de espessura no rés-do-chão e diminuindo em altura (Cóias, 2007). Nestas paredes estão embebidas estruturas trianguladas de madeira que se ligam à alvenaria, conferindo-lhes travamento, através de peças de madeira denominadas *mãos* (Henriques, 2011).

As paredes de separação entre edifícios, designadas por paredes meeiras, são em alvenaria de pedra rebocada sem qualquer abertura e com uma espessura média de 0,5m e constante ao longo de toda a altura do edifício, constituindo assim um elemento cortafogo.

2.8.2 Frontais

As paredes frontais são paredes interiores que desempenham funções estruturais mesmo apresentando uma estrutura muito simples. Esta gaiola é constituída por elementos de madeira verticais (prumos), horizontais (travessas), e diagonais (escoras) que depois são preenchidas por alvenaria de tijolo maciço, fragmentos cerâmicos ou de pedra irregulares argamassa de cal. As paredes frontais encontram-se acima do primeiro piso, nas duas direções e as suas características anti-sismicas conferidas pela gaiola devem-se ao travamento da estrutura, ou seja pelas boas ligações das paredes com os restantes elementos (Cóias, 2007).



Figura 2.11 - Parede de frontal

2.8.3 Tabiques

As paredes de tabique são paredes interiores secundárias ou de compartimentação que dividem espaços e estão limitadas pelas paredes-mestras, tendo geralmente espessuras que não excedem os 0,10 m (Henriques, 2011).

Este tipo de paredes desempenha um importante papel estrutural devido à sua organização pois são estas que servem de travamento das estruturas através da interligação entre paredes, pavimentos e coberturas permitindo, assim, a dissipação de energia em caso de sismo e aumento da capacidade resistente dos edifícios (Costa, 2008).

As paredes de tabique são constituídas pela pregagem de um fasquiado sobre as tábuas colocadas na vertical, sendo depois revestidas com reboco de argamassa de cal que aumentam a resistência à tração e ao corte (Henriques, 2011). Inicialmente a madeira utilizada neste elemento era o castanho passando mais tarde a ser utilizado o pinho e a casquinha por serem mais vantajoso devido à sua regularidade.



Figura 2.12 - Paredes de Tabiques

2.9 Fundações

A baixa Pombalina situa-se num antigo braço do Tejo, sendo os seus terrenos de natureza aluvionar tendo sido por isso uma das zonas mais afetadas pelo terramoto. As fundações em alvenaria de pedra e os arcos permitem uma melhor transmissão de cargas ao terreno que são feitas por um sistema de estacas de madeira que permite sustentar os edifícios situados nos terrenos do antigo estuário do Tejo. Estas estacas medem em média 1,5 m de comprimento e 0,15 m de diâmetro estando afastadas entre si de 0,40 m e dispostas segundo as paredes-mestras. A madeira utilizada preferencialmente em estacaria era o pinho verde uma vez que este se mantém bem conservado quando enterrando num solo muito húmido.

A degradação das fundações em estacaria de madeira ocorre devido aos fenómenos de alternância de teor de humidade provocada pelas variações do nível de água subterrânea, o que leva ao apodrecimento da madeira. A parte da estaca mais afetada é o troço superior, onde se aplicam e transmite as cargas, o que pode por em perigo a segurança do edifício através do esmagamento da cabeça da estaca e consequentes assentamentos das estruturas (Appleton, 2012).

2.10 Fatores de degradação – Patologias

2.10.1 Introdução

Os fatores que mais frequentemente levam à degradação da madeira nos edifícios são a ação de agentes biológicos, agentes atmosféricos, existência de anomalias estruturais na madeira e anomalias devidas a erros de conceção e construção. Para que estes tipos de degradação não aconteçam é necessário que se cumpram regras simples relativamente à fase de conceção e a escolha correta da espécie em função da classe de risco (NP EN 335-1,2:2006 e NP 460:1995 – *Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco*). Existem cinco classes de risco, sendo que a classe de risco 1 é quando se está perante um ambiente seco com um teor de água na madeira no máximo até 20%, o que leva a que esta esteja protegida contra ataques de agentes biológicos. O teor de água na madeira vai aumentando assim como o risco de ataque de agentes biológicos até que se chega à classe de risco 4 e 5. A classe de risco 4 caracteriza-se pelo facto do teor de água na madeira estar permanentemente acima dos 20%. A classe de risco 5 define-se de igual modo mas para água salgada.

Na madeira aplicada devem-se ter cuidados ao longo do tempo garantindo o seu bom estado de conservação através da sua manutenção e aplicação de um tratamento preservador, reduzindo, assim, o risco de degradação dos elementos de madeira (Henriques, 2011)

2.10.2 Degradação por agentes biológicos

A ação dos agentes biológicos é verificada em situações em que existam as condições favoráveis ao seu aparecimento, como o aumento do teor de água na madeira e a temperatura ambiente. Dos agentes biológicos que levam à degradação da madeira os mais vulgares são as térmitas, os fungos e os carunchos. A degradação por caruncho será abordada no capítulo 3.

2.10.2.1 Degradação por térmitas

As térmitas são insetos que vivem em colónias separados por várias castas e podem ser divididas em dois principais grupos de acordo com os seus hábitos, as térmitas subterrâneas e as térmitas de madeira seca (Berry, 1994).

Estes insetos vivem em sociedade organizada num sistema de castas, onde cada casta desempenha determinadas funções como: as obreiras, que são responsáveis por grande parte da madeira que é consumida; os soldados, que tem como função defenderem a colónia; e os reprodutores alados, que surgem preferencialmente na Primavera para a dispersão das colónias (Nunes *et al.*, 2000).

As térmitas subterrâneas têm origem em colónias existentes no solo onde constroem os seus ninhos. Estas percorrem grandes distâncias debaixo de terra à procura de alimento chegando muitas vezes às fundações dos edifícios e começando a alimentar-se da madeira em contacto com o solo. Podem alastrar-se para os restantes elementos de madeira existentes no edifício, não podendo estas viver sem manterem o contacto com o solo (Berry, 1994). As térmitas apenas atacam a madeira com um teor de água superior a 20% mas não saturada, ou seja, para que se dê este tipo de ataque é necessário que existam anomalias na construção como a ausência de ventilação, mau isolamento, existência de fendas e de mau uso da construção que permitem que os teores de humidade aumentem proporcionando assim as condições necessárias para o aparecimento de térmitas (Machado, 2009). A identificação deste tipo de ataque é feita através da deteção de galerias e nestas a existência de terra, podendo a madeira parecer sã, uma vez que deixam uma fina camada de madeira intacta no exterior (Cruz, 2001).

É conhecida a presença de térmitas subterrâneas em quase todas as regiões habitadas de Portugal, sendo portanto um tipo de degradação bastante comum no nosso país (Machado, 2009).

As térmitas da madeira seca vivem completamente independentes do solo, tem tendência para se confinarem às regiões costeiras e ilhas e são colónias mais pequenas (Berry, 1994).

Este tipo de térmitas atacam tipicamente a madeira das construções escavando galerias na madeira, sendo a identificação deste ataque feita através dos excrementos que as térmitas ejetam para o exterior, uma vez que estas, tal como as térmitas subterrâneas, deixam uma fina camada de madeira exterior intacta (Berry, 1994).

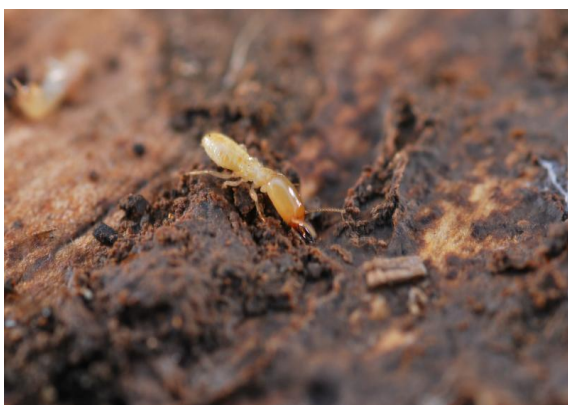


Figura 2.13 - Térmitas subterrâneas



Figura 2.14 - Madeira degradada por térmitas subterrâneas (Cruz, 2010)

2.10.2.1.1 Ciclo de vida

O início do ciclo de vida de uma colónia de térmitas dá-se com o voo dos indivíduos sexuais em busca de um novo local para o seu ninho. Os machos da colónia morrem logo a seguir ao acasalamento enquanto as térmitas rainhas podem depositar milhares de ovos num só dia e continuar a acasalar ao longo da sua vida.

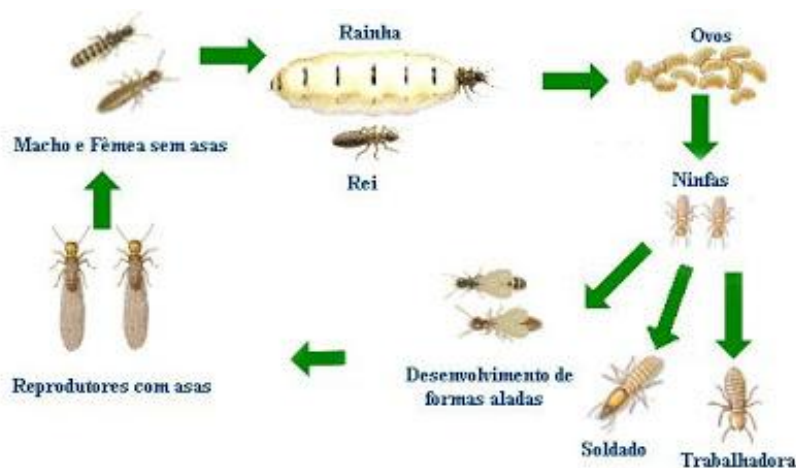


Figura 2.15 - Ciclo de vida das térmitas subterrâneas (Universidade dos Açores, 2007)

2.10.2.2 Degradação por fungos de podridão

Os fungos de podridão desenvolvem-se em madeira com teores em água superiores a 20%, mas não saturada uma vez que os fungos necessitam da presença de oxigénio (Machado, 2009).

Estes ataques no interior dos edifícios devem-se ao facto de existirem deficiências na construção, o que permite que o teor de água aumente, proporcionando assim o aparecimento de fungos. Estes alimentam-se da parede celular da madeira, destruindo-a, sendo este tipo de ataque identificado a partir da perda de resistência e alteração do seu aspeto e coloração (Cruz, 2001).

O borne de todas as espécies florestais é considerado não durável, a durabilidade do cerne é variável dependendo da espécie florestal, podendo ser muito durável e não durável (Machado, 2009).

Os fungos podem dividir-se em fungos cromogénios e fungos de podridão. Os *fungos cromogénios* atacam madeira com teores de água superiores a 25-30%, não provocando alteração significativa da resistência mecânica da madeira uma vez que alimentam-se apenas das substâncias contidas no interior de células lenhosas. Este tipo de ataque pode ser identificado pela alteração da cor, provocando uma coloração “azulada” e outras colorações mais ou menos exuberantes (Henriques, 2005).

Os fungos que provocam podridão são agrupados de acordo com o aspeto da madeira atacada como a podridão castanha, podridão mole, podridão branca, podridão húmida e a podridão seca.

A *podridão castanha* é provocada por fungos que se alimentam predominantemente de celulose que é facilmente assimilada e digerida. A madeira atacada ganha uma tonalidade castanha uma vez que a lenhina fica intacta e possui uma coloração castanha escura dando o aspeto de esta se encontrar queimada. Outro dos aspetos comuns da podridão castanha são as fendas transversais em forma de cubos sendo, por isso, a podridão castanha também conhecida por podridão cúbica. A podridão castanha também pode ser causada pelos fungos de podridão seca ou húmida. A grande diferença entre estes dois fungos é a humidade necessária para que se dê o ataque (Henriques, 2011). Em consequência destes ataques a madeira perde massa e também resistência mecânica.

A *podridão mole*, assim como a podridão castanha, ataca a celulose da célula, podendo esta escurecer um pouco mas geralmente não altera muito a sua cor. Este ataque inicia-se no exterior da peça, ficando a parte de fora mole e a interior resistente, podendo este ataque desenvolver-se, posteriormente, para o interior. Quando a madeira está seca fica mais frágil desenvolvendo fendas e quando testada esta fragmenta-se em pedaços semelhantes.

Na *podridão branca* os fungos não consomem apenas a celulose mas também a lenhina e daí a madeira apresentar-se com uma coloração esbranquiçada (Henriques, 2011). Nestes casos ocorre também a perda de massa e alteração das propriedades físicas e mecânicas da madeira, sendo que este ataque é mais comum nas folhosas.



Figura 2.16 - Filamentos de fungos de podridão

2.10.2.2.1 Ciclo de vida

A propagação dos fungos dá-se porque existem milhares de esporos no ar e na água. Ao cair na madeira húmida, o esporo do fungo germina originando um filamento que penetra na madeira e ramifica-se. Este produz enzimas capazes de degradar as substâncias madeira de modo a que estas possam ser digeridas pelo fungo, proporcionando, assim, o seu desenvolvimento e contínua degradação dos elementos de madeira. No final do ciclo de vida do fungo, este cria corpos furtivos à superfície, designados por cogumelos ou esporóforos, e que libertam os esporos para o ar, iniciando-se um novo ciclo (Henriques, 2011).

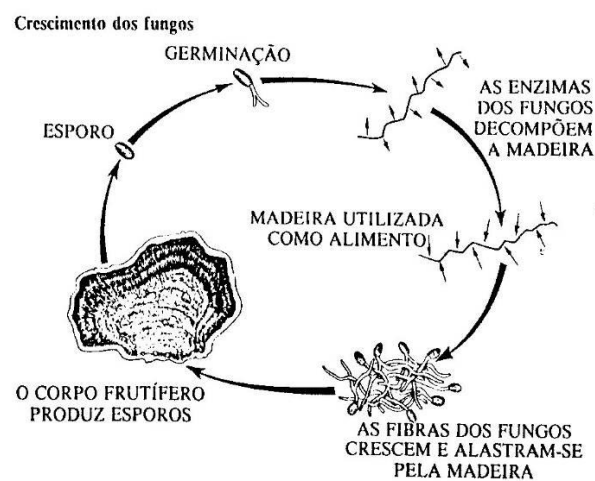


Figura 2.17 - Ciclo de vida dos fungos (Henriques citando Berry, 2011)

2.10.3 Durabilidade Natural face ao ataque por térmitas e fungos

A durabilidade natural refere-se à resistência intrínseca da madeira aos ataques por organismos destruidores (NP EN 350-2, 2001). A durabilidade refere-se apenas ao cerne, uma vez que o borne de todas as espécies é considerado não durável relativamente ao ataque por térmitas e por fungos.

Quadro 2.3 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por térmitas (NP EN 350-2, 2001)

Classes de durabilidade	Descrição
D	Durável
M	Mediamente durável
S	Suscetível

Quadro 2.4 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por fungos (NP EN 350-2, 2001)

Classes de durabilidade	Descrição
1	Muito durável
2	Durável
3	Medianamente durável
4	Pouco durável
5	Não durável

De acordo com a classificação de durabilidade natural apresentada nos quadros anteriores, no Quadro 2.5 são apresentadas as classes de durabilidade de acordo com a espécie de madeira. Deste quadro apenas constarão as madeiras utilizadas no âmbito deste estudo e que são o pitespaine, casquinha, pinho bravo e o choupo.

Quadro 2.5 - Durabilidade natural de acordo com a espécie (Adaptado EN NP 350-2, 2001)

Nome científico	Nome comum	Origem	Durabilidade natural	
			Fungos	Térmitas
<i>P. occara</i> Shiede	Pitespaine	América Central	3	M - S
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Pinho Bravo	Sul e Sudoeste da Europa	3 - 4	S
<i>Pinus Sylvestris</i> L.	Casquinha	Europa	3 - 4	S
<i>Populus canescens</i> Sm	Choupo	Europa	5	S

2.10.4 Classes de Risco face ao ataque por térmitas e fungos

As classes de risco referem-se às situações de serviço em que a madeira está exposta a ataques por agentes biológicos e a partir da qual devem ser definidas as características de durabilidade da madeira a empregar nas diversas situações (LNEC, 1997).

Quadro 2.6 - Classes de risco (Adaptado do LNEC, 1997)

Classes de risco	Teor de água da madeira (%)	Situações gerais de serviço	Risco de ataque por agentes Xilófagos	
			Fungos	Térmitas
1	≤20	Sem contacto com o solo, sob coberto Exemplos: Divisórias; lambris; pavimentos; aros de vãos	Nulo	Baixo
2	Ocasional >20	Sem contacto com o solo, sob coberto (risco de humedificação) Exemplos: Estruturas de cobertura, estruturas de pisos intermédios	Médio	Baixo
3	Frequentemente > 20	Sem contacto do solo, não coberto Exemplos: Caixilharia de janelas e portas; portadas; persianas; pavimentos exteriores	Elevado	Médio
4	Permanentemente > 20	Em contacto com o solo ou água doce Exemplos: Estacas de fundação; pontes; postes	Elevado	Elevado
5	Permanentemente > 20	Na água Salgada Exemplos: Obras de hidráulica, pontões	Médio	Baixo

2.10.5 Degradação por agentes atmosféricos

Os agentes atmosféricos que podem causar a degradação dos elementos de madeira são: a radiação ultravioleta, humidade relativa, precipitação e vento.

A degradação por estes agentes não é muito grave uma vez que não produzem grandes alterações a nível estrutural mas permitem que se criem as condições necessárias para o desenvolvimento de outros agentes de degradação da madeira como as agentes biológicos.

Em elementos de madeira que se encontram nos interiores a degradação por agentes atmosféricos deve-se aos ciclos de humedificação e secagem devidas a alteração de temperatura e humidades relativas do ar devidas a anomalias que podem ocorrer nos edifícios como fendas e má ventilação. Nos exteriores e nos casos em que as estruturas não são abrigadas a ação dos agentes atmosféricos é de forma direta e leva à alteração da cor da madeira podendo mesmo esta atingir tons acinzentados. Esta mudança de cor deve-se à fotodegradação dos constituintes da parede celular das fibras. A degradação através da água da chuva é devida à lixiviação e de remoção e o vento provoca a erosão dos elementos (Machado, 2009).

2.11 Avaliação de madeira nos edifícios

2.11.1 Introdução

A avaliação dos estados de conservação dos elementos de madeira nos edifícios é muito importante pois com estas avaliações podemos evitar situações em que seja colocado em risco bens e pessoas e também por em causa a estabilidade das estruturas. Na avaliação deve-se identificar os fatores de risco, como o ataque por agentes biológicos e também erros humanos na fase de construção ou ainda quando seja prevista a alteração do uso e alterações realizadas na estrutura inicial.

Para a correta identificação das causas da degradação, e a devida manutenção dos elementos de madeira nos edifícios, deverá começar-se por fazer uma inspeção no exterior dos edifícios para eventual deteção de anomalias nas fachadas que permitem a entrada de água e outros elementos que levam ao aparecimento de patologias, como fissuras e fendas nos rebocos.

No interior do edifício também se deve estar atento aos sinais que podem evidenciar a existência de patologias nos elementos de madeira como manchas nas paredes e tetos.

2.11.2 Métodos de inspeção

Para efetuar inspeções nos edifícios de forma a avaliar o seu estado de conservação podem ser usados desde aparelhos e ferramentas simples até aparelhos mais complexos que permitem a correta avaliação dos elementos de madeira mesmo em locais de difícil acesso. Estas inspeções devem ser feitas periodicamente, evitando assim que a madeira chegue a elevados estados de degradação e onde a sua reparação será mais difícil e mais dispendiosa.

Em primeiro lugar devem identificar-se as origens das anomalias detetadas e avaliar a resistência dos elementos de madeira para identificar os pontos que precisam de reforço ou de substituição.

2.11.2.1 Inspeção visual

Uma das formas de fazer a avaliação dos estados de conservação dos elementos de madeira é através da inspeção visual. É um processo não destrutivo e que pode ser feito apenas com o auxílio de material cortante simples como uma faca ou um formão que nos permite saber a resistência que a madeira apresenta à superfície, uma vez que, por exemplo, na presença de agentes biológicos esta tem menor resistência (Henriques, 2011).

A inspeção visual permite estabelecer uma classificação de qualidade da madeira, sendo identificados os defeitos visíveis e as degradações provocadas pelos agentes exteriores como os empenos, fendas e ataques por agentes biológicos.

Este tipo de inspeção permite ainda avaliar os locais mais apropriados para a realização dos ensaios não destrutivos e quais os mais apropriados para cada situação (Bastos, 2011).

2.11.2.2 Resistograph

O Resistograph é um equipamento que permite fazer uma avaliação dos estados de conservação da madeira de forma não destrutiva. Este aparelho permite medir a resistência através da perfuração das peças de madeira, em função da energia despendida. A perfuração é feita com uma agulha de diâmetro de 1.5 mm, sendo na extremidade mais larga com 3 mm, e é realizada a velocidade constante. Os resultados deste ensaio permitem identificar zonas de menor resistência e assim detetar eventual degradação interna. Pode-se também estimar a massa volúmica, o módulo de elasticidade na direção do fio e o módulo de rotura na direção do fio, que depois devem ser tratados de acordo com a espécie de madeira em que é feita esta avaliação. Para além de ser um método de inspeção não destrutivo, este ensaio é bastante útil em edifícios em serviço permitindo assim verificar se as peças de madeira no seu interior apresentam-se degradadas ou com algum defeito (Júnior, 2006).



Figura 2.18 - Resistograph

2.11.2.3 Ensaio do Pilodyn

O ensaio do Pilodyn permite-nos determinar o estado de conservação superficial em elementos de madeira. Este ensaio consiste na penetração de um pino metálico através da libertação de uma mola verificando assim a profundidade de penetração da ponteira.

A desvantagem da utilização deste ensaio deve-se ao facto de os resultados obtidos serem referentes apenas à superfície da madeira não podendo ser detetados defeitos ou vazios no seu interior e por isso, com este ensaio é difícil chegar as verdadeiras condições e propriedades mecânicas da madeira (Bastos citando Feio e Lourenço, 2011).



Figura 2.19 - Pilodyn

2.11.2.4 Método das vibrações induzidas

O método das vibrações induzidas consiste na medição da velocidade das ondas que se produzem devido ao choque ao longo das fibras de madeira e pode ser utilizado em árvores em serviço, postes de telecomunicações, estruturas de madeira e estacas. Na madeira sã as ondas, devidas ao choque, propagam-se a velocidades mais elevadas que em madeiras degradadas. Através do conhecimento das propriedades mecânicas da madeira da mesma espécie, através de ensaios laboratoriais, pode ser feita a correlação desses valores com os obtidos neste ensaio, permitindo, assim, definir as condições de conservação da madeira. Este ensaio permite saber se os elementos de madeira ensaiados possuem defeitos como nós, vazios e podridões.

As ondas de choque em elementos de madeira sã propagam-se com maior velocidade sendo por isso possível determinar os locais onde a madeira se encontra degradada ou com defeitos no seu interior devido a redução de velocidade das ondas de choque (Bastos, 2011).



Figura 2.20 - Unidade central e martelo de impacto (Bastos, 2011)

2.11.2.5 Raios X e raios gama

Este método utiliza energia radiográfica em forma de raios-X e é um método que fornece resultados de elevada precisão e informação visual, que atravessa os elementos de madeira a inspecionar e permite obter uma imagem da sua constituição. Esta imagem é constituída por um esquema bidimensional devido as variações de densidade do material atravessado uma vez que a quantidade de radiação varia com a densidade do material.

2.11.2.6 Detecção acústica de insetos xilófagos

O método da deteção acústica de insetos xilófagos baseia-se na ampliação das ondas sonoras que os insetos, como as térmitas e os carunchos, produzem no interior das peças de madeira. Esta técnica permite também estimar a intensidade dos ataques e distinguir o tipo de inseto presente na madeira, sendo por isso muito útil e complemento da inspeção visual, a qual não permite a deteção dos insetos no interior da madeira nem o seu grau de degradação. Após esta avaliação é possível também determinar os pontos e a melhor forma de tratamento para os elementos de madeira afetados.

Este método tem o inconveniente de só detetar estados de degradação ativa.



Figura 2.21 - Detetor acústico de insetos xilófagos

2.11.3 Ensaios laboratoriais

Como se mostra nos capítulos 4 e 5, a avaliação dos estados de conservação da madeira podem ser feitos também através de ensaios de laboratório como o ensaio de saturação. Através da água absorvida pelos provetes de madeira podemos chegar aos estados de conservação, uma vez que quanto mais degradada estiver a madeira maior a quantidade de água absorvida pela madeira.

Outro ensaio que se pode realizar para avaliar os estados de conservação da madeira é o ensaio de compressão. A madeira que se encontra degradada tem menor resistência e menor rigidez.

3.

Estado da Arte – Degradação por Caruncho

3.1 Introdução

No presente trabalho pretende-se determinar a influência do estado de degradação por caruncho na resistência mecânica de uma peça de madeira. Neste capítulo é abordado o estado da arte sobre o caruncho e a degradação que provocam na madeira de forma a melhor contextualizar o foi realizado no trabalho laboratorial.

De entre as várias espécies de carunchos, distingue-se duas espécies de caruncho, o *Hylotrupes bajulus* L. também conhecido por caruncho grande e o *Anobium punctatum* vulgarmente conhecido por caruncho pequeno. Estas duas espécies de caruncho diferenciam-se através da sua forma e também da forma como degradam a madeira podendo ser por isso facilmente identificados. A infestação por caruncho encontra-se quase sempre em todo o edifício e depende do estado de degradação, do tipo de caruncho, o tempo em que a madeira esteve exposta ao ataque e à maior ou menor percentagem de borne que constitui os elementos de madeira (Cruz, 2009). O caruncho habita árvores vivas, árvores mortas recentemente e também em madeira do mobiliário e madeiras estruturais (Höll *et al.*,2002).

3.2 *Hylotrupes bajulus* L. (Caruncho Grande)

O caruncho grande é assim conhecido devido às suas longas antenas e foi conhecido durante anos como a maior peste na Escandinávia, Africa do Sul e Zonas da América do Norte. Este inseto apresenta-se principalmente em altitudes de aproximadamente 2000 m mas também, com menor importância, no Norte e Oeste da Europa (EN 335-1, 2006).

O *Hylotrupes bajulus* L. é um membro da família *Cerambycidae* da ordem *Coleoptera* e este pode facilmente ser encontrado em Portugal. A degradação por caruncho ocorre enquanto larva e esta é de cor branca ou branco-marfim e têm comprimento variável podendo chegar aos 36 mm (LNEC, 1967).

Em estudos anteriores realizados por autores como Seifert (1962), Becker (1963), Chararas (1981), Mishras e Singh (1978), como referiu HÖll (2002), estes demonstram que as larvas *Hylotrupes bajulus* têm a capacidade de digerir hidratos de carbono complexos como a celulose e a hemicelulose a partir das substâncias encontradas nas suas fezes. Essas substâncias encontradas nas fezes demonstram que estes organismos têm uma boa absorção da madeira no trato digestivo, permitindo assim retirar desta os compostos necessários à sua sobrevivência tais como vitaminas e azoto.

Quando a larva está perto de atingir o término da sua fase larvar aproxima-se da superfície e imobiliza-se, transformando-se em pulpa. Esta transformação ocorre em princípios de Junho e fins de Agosto ou Setembro. Os orifícios de saída são ovais com bordos irregulares podendo ter entre 5 a 10 mm de diâmetro. Enquanto insetos adultos, ocorre o acasalamento e recomeço do ciclo, com as fêmeas a depositarem os seus ovos (entre 200 a 400 ovos) em fendas ou juntas que se encontram na madeira. Ao fim de dez dias nascem as larvas que penetram logo de seguida na madeira abrindo galerias.

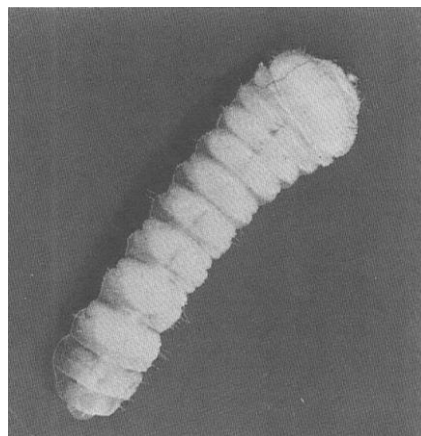


Figura 3.1 - *Hylotrupes bajulus* na fase de larva (LNEC, 1967)

Os insetos adultos são providos de longas antenas e têm 1 a 3 cm de comprimento. Por norma estes insetos são de cor negra ou castanho-escuro e sobre os élitros têm pelos cinzentos esbranquiçados.

As fêmeas são facilmente identificadas pois estas possuem um tubo extensível na extremidade do abdómen que permite a postura dos ovos (LNEC, 1967).

O ciclo de vida do caruncho grande é normalmente 3 a 6 anos mas pode variar de 2 e em alguns casos chegando mesmo aos 10 anos, dependendo do alimento, da temperatura e do teor de humidade da madeira (Höll citando Grosser, 2002). Em Portugal o ciclo de vida do caruncho tem normalmente entre 2 a 3 anos (EN 335-1, 2006).

De forma a chegar aos valores de temperatura ideal para o desenvolvimento do caruncho grande, Becker (1949) criou microclimas e encontrou a temperatura ideal para a crescimento larvar de 28 a 31° C. Por esta razão, este ipo de caruncho encontra-se predominantemente em madeiramentos de coberturas.

O *hylotrupes bajulus* L. só ataca o borne de resinosas sendo o cerne resistente ao ataque por caruncho. A identificação do ataque por caruncho grande é feita pela observação dos orifícios de saída dos insetos, pelo serrim compactado no interior das galerias e também pela fina pelicula da madeira na superfície, estando o interior degradado.

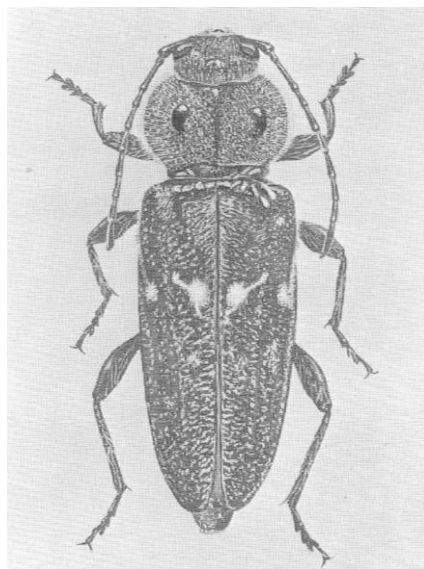


Figura 3.2 - *Hylotrupes bajulus* L. adulto (LNEC, 1967)

3.3 *Anobium punctatum* (Caruncho Pequeno)

O caruncho pequeno pertence à família *Anobiidae* da ordem *coleoptera* e é particularmente notado em zonas costeiras e onde se encontram condições húmidas (EN 335-1, 2006). Esta espécie de caruncho também pode ser facilmente identificada em Portugal e o seu ataque é caracterizado pela presença de orifícios de saída circulares na superfície das peças de madeira e dos acumulados de serrim, formando grânulos elipsoidais, junto dos orifícios.

Enquanto larvas, estas são brancas-marfim e o abdómen encontra-se curvado na extremidade e podem atingir os 5 mm de comprimento. À semelhança do que acontece com outras espécies, estas quando nascem penetram logo de seguida na madeira degradando-a através da abertura de galerias e quando estão perto do término da sua fase larvar aproximam-se da superfície para se transformarem em insetos e começar então a sua fase reprodutora.

O *Anobium punctatum* ataca indiferentemente o borne de folhosas e resinosas tanto de madeira antigas como madeira que tenha sido recentemente cortada e atacam tanto madeira com teor de humidade superior ao normal como madeira seca (LNEC, 1967). Este digere a celulose de forma a obter as proteínas e os açúcares que necessitam para o seu desenvolvimento e por isso a sua preferência pelo borne, uma vez que este contém mais açúcares residuais e proteínas, enquanto o cerne contém mais produtos químicos potencialmente tóxicos que se depositam durante o crescimento da árvore.

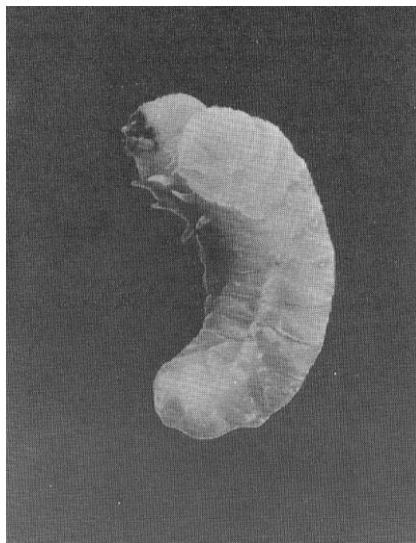


Figura 3.3 - *Anobium punctatum* na fase larva (LNEC, 1967)

Os insetos adultos emergem no início de Junho até julho e as fêmeas põem em média 50 ovos, sendo que estes eclodem geralmente num período de 6 a 10 dias. Estes têm comprimentos compreendidos entre 2 a 4 mm e são castanho-escuros. Depois do acasalamento os carunchos adultos morrem não provocando mais danos na madeira (Hutton, 2008).

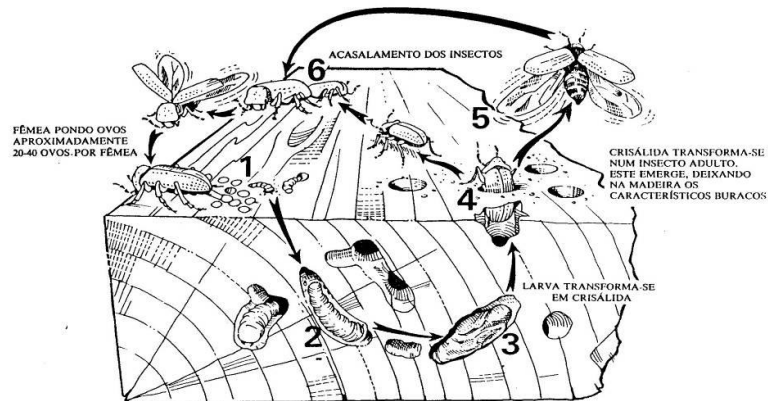


Figura 3.4 - Ciclo de vida de um caruncho (Henriques citando Berry, 1994)

Um estudo efetuado no LNEC por Machado e Cruz (2013) com o objetivo de avaliar a perda de resistência mecânica da madeira degradada pelo caruncho pequeno, relacionou a área superficial das galerias em provetes (2x2x6) mm degradados pelo caruncho com a tensão de rotura à compressão. Não foi possível chegar a resultados conclusivos uma vez que a degradação superficial pode ser bastante diferente da degradação que se encontra no interior do provete. No mesmo estudo foram pesados os mesmos provetes, foi determinada a sua massa volúmica e relacionada com a resistência à compressão. Neste caso, uma vez que os provetes eram todos originários da mesma viga de madeira, foi possível estabelecer uma relação entre a massa volúmica do provete e o seu nível de degradação. Concluiu-se que quanto menor a massa volúmica dos provetes menor era a resistência à compressão.

Como se apresenta nos capítulos seguintes, foi efetuado um estudo semelhante ao que foi elaborado por Machado e Cruz (2013), mas neste caso para além de comparar a massa volúmica com a tensão de compressão é também relacionada a percentagem de saturação dos provetes com a tensão de compressão.

3.4 Durabilidade natural face ao ataque por *Hylotrupes bajulus* e *Anobium punctatum*

A durabilidade natural refere-se à resistência intrínseca da madeira aos ataques por organismos destruidores (NP EN 350-2, 2001). A durabilidade refere-se apenas ao cerne uma vez que o borne de todas as espécies é considerado não durável.

Quadro 3.1 - Classificação da durabilidade natural face ao ataque por *Hylotrupes bajulus* e *Anobium punctatum* (NP EN 350-2, 2001)

Classes de durabilidade	Descrição
D	Durável
S	Suscetível

De acordo com a classificação de durabilidade natural apresentada no Quadro 3.1, apresentam-se no Quadro 3.2 as classes de durabilidade de acordo com a espécie de madeira. Neste apenas serão classificadas as madeiras utilizadas no caso de estudo que mais à frente será apresentado que são a casquinha, pinho bravo e o choupo.

Quadro 3.2 - Durabilidade natural de acordo com espécie (Adaptado EN NP 350-2, 2001)

Nome científico	Nome comum	Origem	Durabilidade natural	
			<i>Hylotrupes</i>	<i>Anobium</i>
<i>P. occara</i> Shiede	Pitespaine	América Central	S	S
<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Pinho Bravo	Sul e Sudoeste da Europa	S	S
<i>Pinus Sylvetris</i> L.	Casquinha	Europa	S	S
<i>Populus canescens</i> Sm	Choupo	Europa	S	S

3.5 Classes de Risco face ao ataque por *Hylotrupes bajulus* e *Anobium punctatum*

O Quadro 3.3 mostra-se de forma simplificada e de acordo com as respetivas classes de risco a relação com o teor de água e o ataque por agentes biológicos.

Quadro 3.3 - Situações gerais de serviço e classes de risco de ataque por agentes biológicos (Adaptado de M1, 1997)

Classes de risco	Teor de água da madeira (%)	Situações gerais de serviço	Risco de ataque por agentes Xilófagos
			Carunchos
1	≤20	Sem contacto com o solo, sob coberto Exemplos: Divisórias; lambris; pavimentos; aros de vãos	Médio
2	Ocasional >20	Sem contacto com o solo, sob coberto (risco de humedificação) Exemplos: Estruturas de cobertura, estruturas de pisos intermédios	Médio
3	Frequentemente > 20	Sem contacto do solo, não coberto Exemplos: Caixilharia de janelas e portas; portadas; persianas; pavimentos exteriores	Baixo
4	Permanentemente > 20	Em contacto com o solo ou água doce Exemplos: Estacas de fundação; pontes; postes	Baixo
5	Permanentemente > 20	Na água Salgada Exemplos: Obras de hidráulica, pontões	Baixo

Como podemos ver no Quadro 3.3 o ataque por caruncho dá-se tanto em condições de ambiente seco como húmido, em contacto com o solo ou não. Este facto leva a que estes ataques sejam difíceis de controlar.

4.

Desenvolvimento Laboratorial

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os procedimentos experimentais para a determinação do grau de degradação por caruncho (pela medição da percentagem de absorção) e a resistência à compressão de provetes de madeira com diferentes graus de degradação por caruncho.

O estudo foi feito usando vigas de choupo e de pinho retiradas de edifícios pombalinos ou gaioleiros dos quais não se conhece com precisão a sua data de construção, mas que se estima ser dos séculos XVIII e XIX, com idades, portanto, entre cerca de 200 e 100 anos.

A madeira é um material cujas características são muito variáveis e em madeira antiga essa variação ainda é mais acentuada. Por outro lado, o grau de degradação por caruncho pode ser significativamente diferente ao longo da mesma viga. Estes dois fatores poderão ser responsáveis pela obtenção de resultados bastante distintos dentro da mesma viga e/ou da mesma espécie de madeira.

Para a avaliação dos estados de degradação da madeira foi realizado o ensaio de saturação, uma vez que os provetes degradados absorvem mais água que os que se encontram sãos. Por fim realizou-se o ensaio de compressão para verificar as alterações na capacidade mecânica devida aos diferentes graus de degradação.

4.2 Preparação e seleção dos provetes

Para a realização dos ensaios, foram cortados provetes, de dimensões $(8.8 \pm 0.5)\text{cm} \times (3.0 \pm 0.5)\text{cm} \times (3.0 \pm 0.5)\text{cm}$ (C x L x e)cm, a partir de vigas selecionadas.

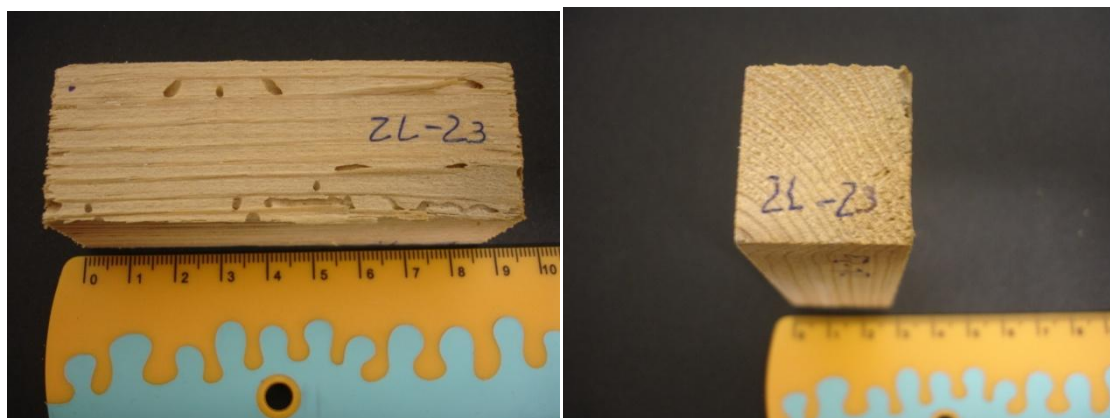


Figura 4.1 - Provete 2L-23

Foram selecionados provetes degradados e são e, sempre que possível, isentos de outros defeitos (nós, orifícios devido a pregos, fendas, outros). Caso apresentassem orifícios de pregos, estes eram selados usando cera. Os provetes foram devidamente identificados através do número e letra da viga e de seguida com o número do provete.

Apresenta-se no Quadro 4.1 a nomenclatura de cada viga ensaiada e a espécie de madeira.

Quadro 4.1- Nomenclatura das Vigas

Viga	Madeira
2Q	Choupo
2H	Pinho
2R	Pinho
4J	Pinho
2U	Pinho
2B/3	Pinho
2L	Pinho

Devido a muitas vigas estarem já bastante degradadas por caruncho, nem sempre foi possível obter provetes sãos. Para estes casos foram estimados valores teóricos para a madeira sã através da média de resultados obtidos nos restantes provetes sãos de outras vigas da mesma espécie de madeira.

Antes da realização dos ensaios de saturação, os provetes foram colocados numa sala durante 15 dias à temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e à humidade ambiente de $65\pm 5\%$, sujeitos, portanto, às mesmas condições ambientes. Assumiu-se, que ao fim daquele tempo, todos os provetes tinham atingido um teor de água idêntico.



Figura 4.2 - Provetes de madeira utilizados nos vários ensaios

4.3 Determinação do teor de água dos provetes

A determinação do teor de água dos provetes de madeira foi efetuado de acordo com a Norma Portuguesa NP – 614.

Para a realização deste ensaio foram utilizados 5 provetes sãos que foram inicialmente pesados e de seguida colocados na estufa durante 18 horas a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Ao fim destas 18 horas estes arrefeceram durante 1 hora no exsicador e de seguida foram pesados. Colocou-se de novo os provetes na estufa à mesma temperatura durante uma 1 hora e 30 minutos e arrefeceu-se no exsicador durante 1 hora antes de se voltarem a pesar. Este procedimento foi repetido até se obter duas pesagens consecutivas com uma diferença de massa do provete inferior a 0,5% do anterior.

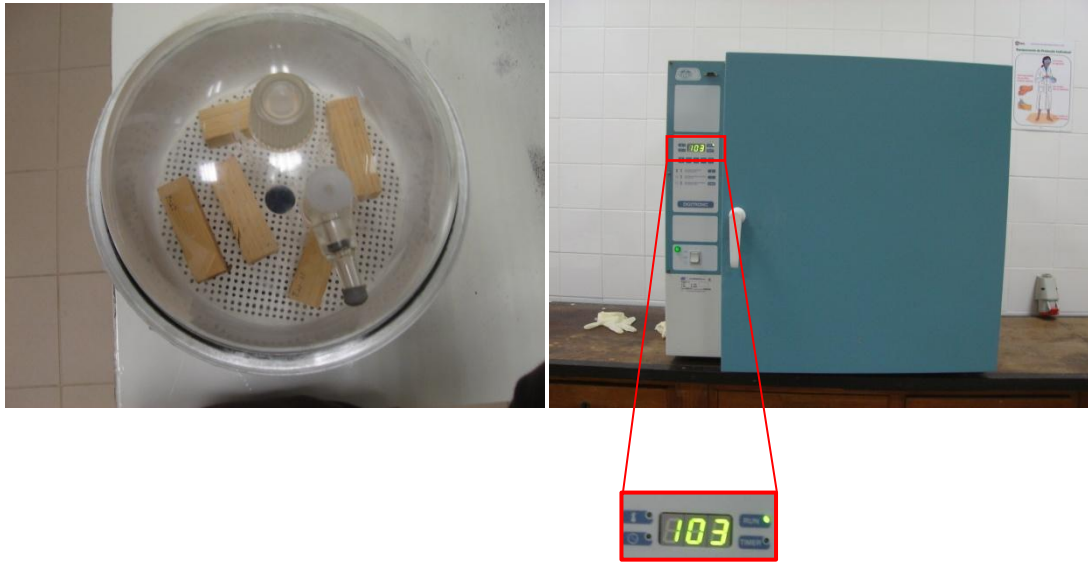


Figura 4.3 - Exsicador e Estufa

Para o cálculo do teor de água foi utilizada a expressão [2], referida no capítulo 2.

4.4 Determinação da percentagem de saturação

O ensaio de saturação foi realizado em todos os provetes, sãos e degradados por caruncho. Com este ensaio pretende-se conhecer qualitativamente o grau de degradação dos provetes admitindo que: quanto mais degradado pelo caruncho estiver o provete, maior a quantidade de água absorvida.

Para este ensaio foram construídas “gaiolas” em arame que permitiam prender o provete e mante-lo submerso em água dentro de recipientes. Ao fim de um determinado tempo de imersão, os provetes eram pesados. Os intervalos de tempo ao fim dos quais os provetes foram pesados e respetivas pesagens encontram-se nas tabelas em anexo. O ensaio terminou quando se obtiveram 3 medições consecutivas em que a diferença de massas com o anterior foi inferior a 0,5%.



Figura 4.4 - Ensaio de saturação



Figura 4.5 - Balança

Os resultados do Quadro 4.2 dizem respeito ao ensaio de saturação para um dos provetes da viga L (Pinho) que se encontra degradado por caruncho, como exemplo do que foi feito para os restantes provetes.

Quadro 4.2 - Caracterização do provete 2L-24 e respetivos valores iniciais

Provete: 2L-24	
Volume (8,840 x 2,910 x 3,114) (cm ³):	80,11
Hora início (h):	09:12
Massa inicial do provete (g):	31,02
Massa da gaiola (g):	7,25
Massa inicial da gaiola+provete (g):	38,27
Massa com cera (g):	0
Massa volúmica (g/cm ³):	0,39

Antes de submergir os provetes em água, eram registados os valores da sua massa e da massa do conjunto (provete e gaiola), uma vez que as pesagens eram feitas sempre com a “gaiola”. A linha referente à massa com cera, que neste caso não foi retirado, deve-se ao facto de nos provetes que possuíam furos devidos a pregos estes foram tapados com cera para que não influenciasses a percentagem de absorção dos provetes.

O ensaio terminou quando se obtiveram três pesagens consecutivas com uma diferença de massa inferior a 0,5% em relação à anterior.

A massa volúmica foi determinada dividindo a massa inicial do provete pelo seu volume.

A tabela seguinte apresenta os valores obtidos ao longo dos ensaios de saturação do provete 2L-24, assim como as percentagens de aumento de massa.

A título de exemplo apresenta-se no quadro 4.3 os valores obtidos no ensaio de saturação para um dos provetes de pinho.

Quadro 4.3 - Valores obtidos no ensaio de saturação do provete 2L-24 e respetivo tratamento de dados

Hora	Tempo		Massa (amostra +gaiola)	Massa (amostra)	ΔM (%)	ΔM_{total} (%)
9:18h	5	5	44,92	36,61	17,79	17,79
9:28h	10	15	46,43	38,12	4,12	22,65
9:38h	10	25	47,12	38,81	1,81	24,87
10:58h	20	45	47,93	39,62	2,09	27,48
10:18h	20	65	48,5	40,19	1,44	29,31
10:48h	30	95	49,14	40,83	1,59	31,37
11:18h	30	125	49,82	41,51	1,67	33,56
12:18h	60	185	50,64	42,33	1,98	36,20
13:18h	60	245	51,34	43,03	1,65	38,45
15:18h	120	365	52,43	44,12	2,53	41,96
17:18h	120	485	53,33	45,02	2,04	44,85
9:18h	960	1445	57,35	49,04	8,93	57,79
11:18h	120	1565	57,56	49,25	0,43	58,46
13:18h	120	1685	57,8	49,49	0,49	59,23
15:18h	120	1805	57,91	49,6	0,22	59,59

Neste quadro eram colocadas as horas a que eram feitas as medições e o tempo entre estas com o respetivo valor das pesagens.

A percentagem de aumento de massa foi obtida através da seguinte fórmula:

$$\Delta M(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad [5]$$

ΔM (%) é determinado considerando a diferença entre duas pesagens consecutivas. ΔM_{total} (%) é determinado considerando a diferença entre o peso do provete sujeito a um determinado tempo de imersão (m_1) e o peso inicial (m_2).

O aumento de massa corresponde à quantidade de água absorvida ao fim de um determinado tempo. Assim, a ΔM_{total} (%), corresponde à % de absorção de água. A percentagem de saturação do provete corresponde ao último valor obtido ΔM_{total} (%).

Os valores que se encontram a cinzento respeitam o critério de paragem do ensaio, ou seja, foram feitas três pesagens consecutivas com diferença de massa do provete inferior a 0.5 % em relação ao anterior.

4.5 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão axial (direção paralela às fibras) foi realizado através da aplicação de forças progressivamente crescentes a uma velocidade constante até atingir a rotura. O ensaio foi efetuado na prensa Tecno Test C025/C a uma velocidade constante de 0,5 kN/min.



Figura 4.6 - Prensa Tecno Test C025/C

Para este ensaio os provetes foram colocados numa sala durante cerca de dois meses à temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e à humidade de $65\pm 5\%$ de forma a perderem a água que retiveram com o ensaio de saturação.

Os dados obtidos pelo programa associado à prensa foram a força aplicada em cada intervalo de tempo bem como os respetivos valores de deslocamento do provete.

O Quadro 4.4 é exemplificativo dos resultados fornecidos pela prensa usada na realização dos ensaios de compressão.

Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de compressão fornecidos pela prensa.

Número do Provede	Tempo	Força (KN)	Deslocamento (μm)
36	0,00	0,00	0,00
36	1,00	0,07	0,00
36	2,00	0,15	0,00
36	3,00	0,36	1,92
36	4,00	0,58	25,21

O valor de tensão de rotura por compressão axial é obtido através do quociente entre a força máxima aplicada em cada provete e a área da secção transversal do provete, como mostra a expressão seguinte:

$$f_c = \frac{F_{\text{máx}}}{b \cdot h} \text{ (MPa)} \quad [6]$$

Sendo:

f_c - tensão de rotura à compressão (MPa)

$F_{\text{máx}}$ - força máxima de rotura (N)

b, h - dimensões da secção do provete (mm)

O valor da deformação é obtido pelo quociente entre o deslocamento que o provete sofre em cada intervalo de tempo e o comprimento total do provete.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \text{ (\%)} \quad [7]$$

Sendo:

ε – deformação do provete (%)

ΔL – deslocamento do provete (m)

L – comprimento total do provete (m)

4.5.1 Módulo de elasticidade

Do ensaio de compressão realizado foram obtidos gráficos que relacionam a força e o deslocamento, através dos quais foi calculado o módulo de elasticidade de cada provete. O módulo de elasticidade é obtido através da secante à curva, entre dois pontos, pela razão entre a diferença de força e de deslocamentos.

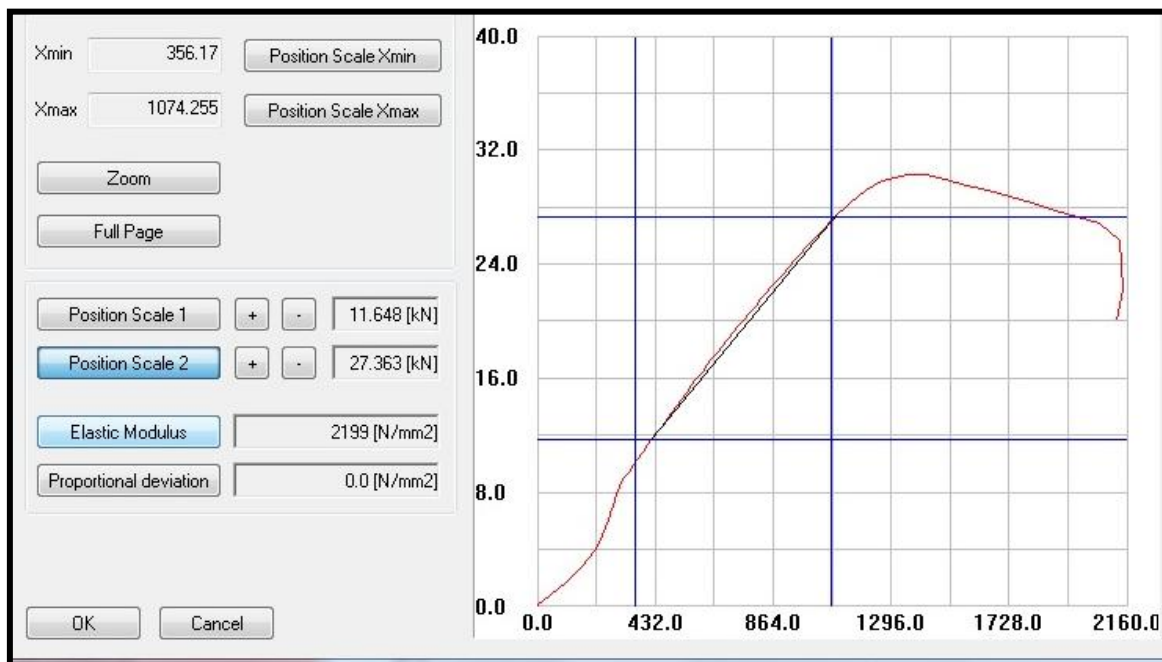


Figura 4.7 - Gráfico Força-deslocamento obtido do ensaio de compressão

4.5.2 Extensão em fase plástica

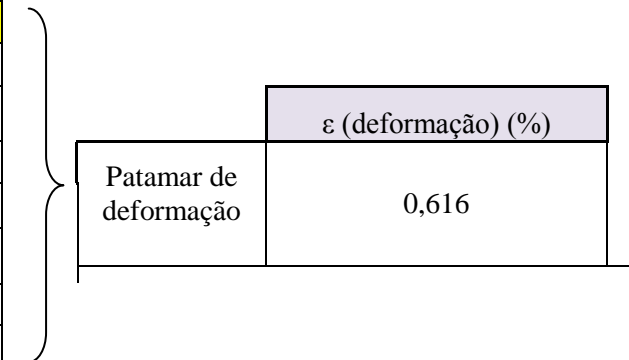
A extensão em fase plástica é a deformação que o provete sofre depois de atingir o valor máximo de tensão até ao ponto em que ocorre a rotura do provete. É o

comprimento deste patamar de deformação que irá ser relacionado com a variação de massa devida à degradação por caruncho e com a massa volúmica dos provetes.

O Quadro 4.5 é um quadro exemplificativo que mostra a forma como foi determinado o patamar de deformação para o provete 2L-3. Para os restantes provetes que foram ensaiados à compressão encontram-se em anexo.

Quadro 4.5 - Determinação do patamar de deformação

2L-3							
Tempo	Deslocamento (μm)	F (KN)	F (N)	P (Pa)	fc (MPa)	Deslocamenlo (m)	ε (deformação) (%)
0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
1,00	0,00	0,06	60,00	65934,02401	0,07	0	0
2,00	0,00	0,15	148,59	163284,2991	0,16	0	0
3,00	17,30	0,38	383,33	421245,4247	0,42	1,73046E-05	0,020
4,00	47,28	0,67	666,45	732364,6692	0,73	4,72764E-05	0,053
⋮							
56,00	960,15	24,57	24567,51	26997260,69	27,00	0,001	1,086
57,00	1007,63	24,85	24853,04	27311035,63	27,31	0,001	1,140
58,00	1066,43	25,02	25019,66	27494133,55	27,49	0,001	1,207
59,00	1139,82	25,01	25014,26	27488195,21	27,49	0,001	1,290
60,00	1230,20	24,49	24486,75	26908521,11	26,91	0,001	1,392
61,00	1321,14	23,80	23800,84	26154764,71	26,15	0,001	1,495
62,00	1416,12	22,85	22849,36	25109182,87	25,11	0,001	1,602
63,00	1505,11	21,91	21905,56	24072040,03	24,07	0,002	1,703
64,00	1589,71	20,76	20759,40	22812522,91	22,81	0,002	1,799
65,00	1610,42	20,03	20028,67	22009529,37	22,01	0,002	1,822



5.

Apresentação e discussão dos resultados experimentais

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais dos ensaios de determinação do teor em água, percentagem de saturação, massa volúmica e resistência à compressão.

5.2 Determinação do teor de água

Os Quadros 5.1 a 5.4 mostram os resultados obtidos na determinação da percentagem do teor de água dos provetes são provenientes de diferentes vigas.

Quadro 5.1 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2U-13

Provete 2U-13		Massa (g)	ΔM (%)	H (%)
Tempo (h)				
Estufa	Exsicador			
18:00	1	36,03	-	11,53
01:30	1	36,03	0	
01:30	1	35,98	0,14	

Quadro 5.2 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2U-23

Provete 2U-23		Massa (g)	ΔM (%)	H (%)
Tempo (h)				
Estufa	Exsicador			
18:00	1	36,28	-	11,24
01:30	1	36,26	0,06	
01:30	1	36,24	0,06	

Quadro 5.3 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 4J-12

Provete 4J-12		Massa (g)	ΔM (%)	H (%)
Tempo (h)				
Estufa	Exsicador			
18:00	1	36,2	-	10,87
01:30	1	36,17	0,08	
01:30	1	36,16	0,03	

Quadro 5.4 - Resultados do ensaio de determinação do teor de água do provete 2H-1

Provete 2H-1		Massa (g)	ΔM (%)	H (%)
Tempo (h)				
Estufa	Exsicador			
18:00	1	34,3	-	11,74
01:30	1	34,27	0,09	
01:30	1	34,27	0	

Com este ensaio podemos concluir que o teor de água dos provetes encontra-se, na generalidade, entre os 10% e os 12%. Estes valores são considerados normais para a situação de humidade e temperatura a que os provetes estavam sujeitos

5.3 Ensaio de saturação

Para cada provete que foi submetido ao ensaio de compressão, foi medida a massa volúmica e o valor da percentagem de saturação como foi apresentado nos Quadros 4.2 e 4.3 apresentados no capítulo anterior. Com os valores de percentagem de absorção para cada intervalo de tempo foi elaborado um gráfico que demonstra a evolução da percentagem de absorção ao longo do ensaio até serem feitas as três pesagens consecutivas com uma diferença inferior a 0,5% relativamente ao anterior.

O gráfico seguinte demonstra a evolução da percentagem de absorção para um provete da viga L. Para os restantes provetes os quadros e os gráficos encontram-se em anexo.

Quadro 5.5 - Resultados do provete 2L-24 (degradado por caruncho)

2L-24	
Tempo	ΔM_{total} (%)
5	25,31
15	32,88
25	37,65
45	45,10
65	49,48
95	54,71
125	58,12
185	61,99
245	64,09
365	65,15
485	66,38
1445	69,70
1565	69,92
1685	70,73
1805	71,02

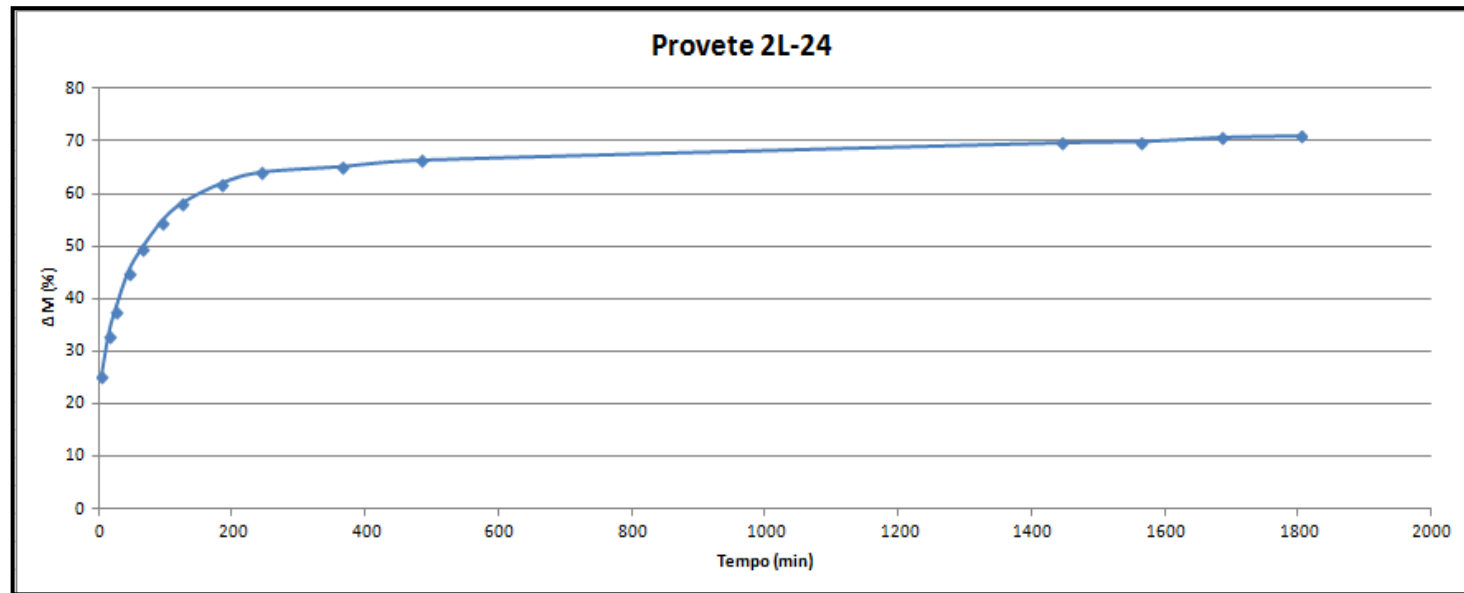


Figura 5.1- Gráfico dos resultados do ensaio de saturação do provete 2L-24 (Degradado)

Quadro 5.6 – Resultados do provete 2L-3 (são)

2L-3	
Tempo	$\Delta M_{total}(\%)$
5	8,4
15	17,6
25	20,96
45	22,95
65	24,41
95	25,24
125	27,12
185	28,97
245	30,14
365	33,22
1445	44,11
1565	44,81
1685	45,51
1805	46,24

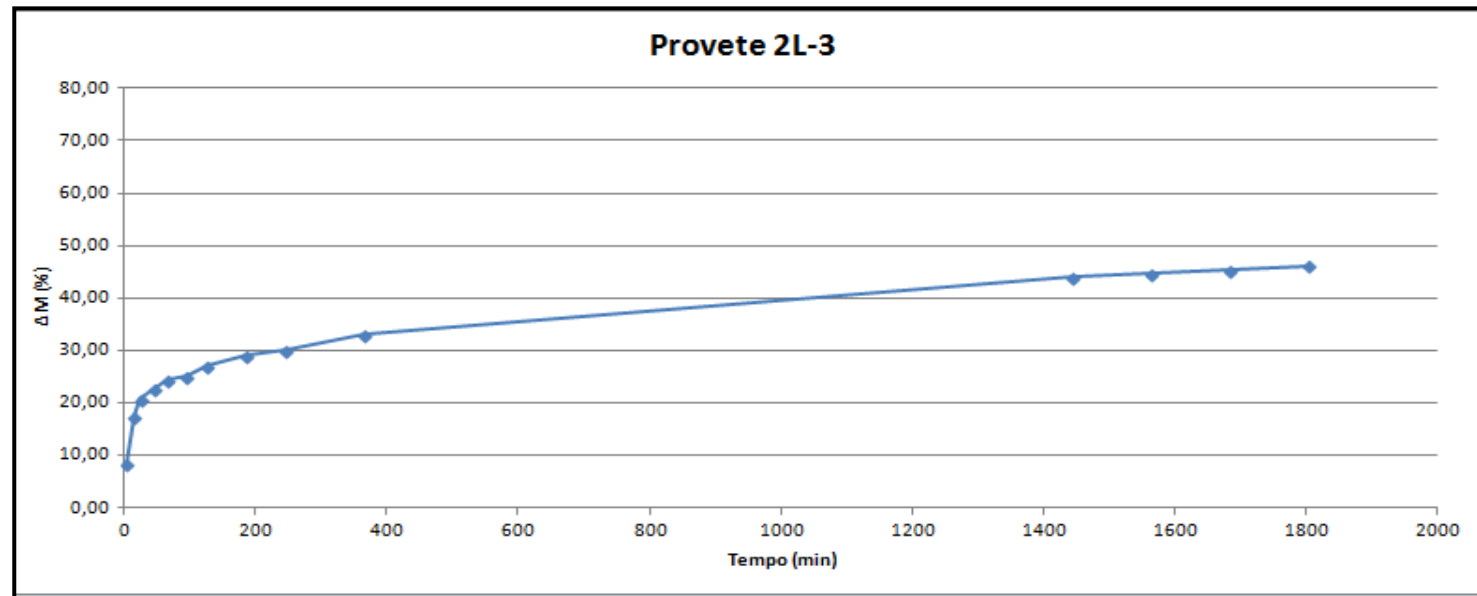


Figura 5.2 - Gráfico com os resultados do ensaio de saturação do provete 2L-3 (São)

Todos os provetes apresentam o mesmo tipo de evolução: inicialmente uma rápida absorção de água até cerca de 200 min de imersão, verificando-se a partir daí um abrandamento, atingindo-se um valor constante ao fim de 150min-1800min de imersão. A absorção inicial corresponderá à água de impregnação, seguindo-se o preenchimento pela água dos vazios/poros existentes na estrutura da madeira. Este processo será mais ou menos lento consoante o diâmetro dos vazios / poros. Os provetes degradados atingem uma percentagem de saturação superior aos correspondentes provetes sãos.

Verifica-se que os provetes sãos da viga B/3 apresentam uma percentagem de saturação muito inferior ao apresentado pelos provetes sãos de viga L e J. A razão para esta diferença deve-se ao facto dos provetes B/3 serem constituídos por uma maior proporção de cerne que os provetes L e J. Como o que se pretende avaliar é o grau de degradação dos provetes de madeira, através da percentagem de saturação, a este valor foi retirada a parcela que se deve à absorção de água pela parte de madeira que se encontra sã. O resultado refere-se à percentagem de água que entra devido à degradação da madeira provocada por caruncho, como mostra a equação [8].

$$\Delta M_{\text{degradação}} = \Delta M_{\text{saturação}} - \Delta M_{\text{sã}} \quad [8]$$

Em que:

$\Delta M_{\text{degradação}}$ – Variação de massa devida à degradação (%)

$\Delta M_{\text{saturação}}$ – Variação de massa total (devida à degradação e absorção de água pela madeira sã) (%)

$\Delta M_{\text{sã}}$ – Variação de massa devida à absorção de água pela madeira sã (%)

Os Quadros 5.7 a 5.12 apresentam os valores de degradação para os vários provetes que foram submetidos ao ensaio mecânico.

Quadro 5.7 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga J

Nº Provede	$\Delta M_{\text{saturação}}$ (%)	$\Delta M_{\text{sã}}$ (%)	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)
4J-41	58,36	14,20	44,16
4J-52	58,59	14,20	44,40
4J-53	54,19	14,20	39,99
4J-54	47,34	14,20	33,14
4J-61	70,59	14,20	56,39
4J-62	66,97	14,20	52,77
4J-73	15,12	14,20	0,92

Para a viga J o $\Delta M_{\text{sã}}$ foi obtido com a média dos provetes sãos desta viga e desta forma calculado o $\Delta M_{\text{degradação}}$. Alguns provetes da viga J apresentam valores de degradação muito semelhantes, sendo que os valores variam entre 33% e 56%, exceção para o provete 4J-73. Este provete tem um grau de degradação muito baixo, podendo ser considerado como praticamente sã.

Quadro 5.8 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga L

Nº Provete	$\Delta M_{\text{saturação}}$ (%)	$\Delta M_{\text{sã}}$ (%)	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)
2L-12	55,81	46,24	9,58
2L-13	72,55	46,24	26,32
2L-23	70,04	46,24	23,81
2L-24	71,02	46,24	24,78

Os valores da percentagem de saturação dos provetes degradados da viga L foram bastante altos assim como o que aconteceu com os provetes sãos. Também neste caso o $\Delta M_{\text{sã}}$ foi obtido através da média obtida dos provetes sãos. Todos os provetes da viga L apresentam o $\Delta M_{\text{degradação}}$ bastante próximos e a rondar os 23 a 26% à exceção do provete 2L-12 o qual apresenta um valor muito mais baixo.

 Quadro 5.9 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga R

Nº Provete	$\Delta M_{\text{saturação}}$ (%)	$\Delta M_{\text{sã}}$ (%)	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)
2R-11	35,50	21,39	14,11
2R-22	49,89	21,39	28,50
2R-31	49,81	21,39	28,42
2R-53	54,71	21,39	33,32
2R-54	56,23	21,39	34,83
2R-62	41,38	21,39	19,99
2R-63	57,52	21,39	36,13

Apesar dos provetes da viga R serem os que visualmente se apresentavam mais degradados, apresentam, em média, menores percentagens de saturação que os provetes da viga L e da viga J. Para a viga R, e uma vez que para esta viga não foi possível obter provetes sãos para correlação de valores, foi obtido um $\Delta M_{\text{sã}}$ teórico através da média dos provetes sãos das vigas de pinho.

 Quadro 5.10 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga B/3

Nº Provete	$\Delta M_{\text{saturação}}$ (%)	$\Delta M_{\text{sã}}$ (%)	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)
2B/3-11	14,94	13,93	1,01
2B/3-12	14,72	13,93	0,78

Os provetes da viga B/3 eram os provetes que visualmente se encontravam menos degradados, o que se veio a comprovar com o ensaio de saturação. Os dois provetes degradados têm praticamente a mesma percentagem de saturação, a qual é ligeiramente superior à do provete são. O $\Delta M_{\text{degradação}}$ obtido para estes provetes é de cerca de 1%. Visualmente nestes provetes também é possível verificar que estes são constituídos na sua maioria por cerne que não é degradado pelo caruncho.

 Quadro 5.11 - Determinação do $\Delta M_{\text{degradação}}$ da viga H

Nº Proвете	$\Delta M_{\text{saturação}} (\%)$	$\Delta M_{\text{sã}} (\%)$	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$
2H-11	35,94	21,39	14,55
2H-23	48,44	21,39	27,05
2H-32	47,42	21,39	26,02

Os valores de percentagem de saturação dos provetes da viga H são muito próximos dos valores da viga R. Também para a viga H e devido ao elevado estado de degradação em que se encontravam algumas vigas, não foi possível obter provetes são. Para o cálculo do $\Delta M_{\text{degradação}}$ foi utilizado o $\Delta M_{\text{sã}}$ teórico.

 Quadro 5.12 - Valores do $\Delta M_{\text{saturação}}$ da viga Q

Nº Proвете	$\Delta M_{\text{saturação}} (\%)$
2Q-24	70,95
2Q-32	59,95
2Q-42	58,06
2Q-53	52,38
2Q-71	75,95
2Q-72	81,48
2Q-82	63,78

Para a viga Q também não foi possível obter provetes são mas neste caso, como se trata de madeira de choupo não foi utilizado o $\Delta M_{\text{sã}}$ teórico obtido através dos resultados dos provetes são de pinho.

Como tal, para os provetes da viga Q e para o estudo feito mais à frente, os valores a correlacionar serão os de $\Delta M_{\text{saturação}}$. Os valores da percentagem de saturação para esta viga são os mais elevados o que se pode dever ao tipo de madeira. O choupo é uma árvore que cresce habitualmente em terrenos muito húmidos ou mesmo alagados e por isso habituado a absorver muita água.

Verificou-se que a percentagem de saturação dos provetes sãos de pinho são semelhantes para a viga J e B/3, sendo significativamente mais baixos que o apresentado para a viga L. Esta diferença poderá resultar de uma estrutura diferente: um maior teor em celulose e hemiceluloses na viga L ou esta viga ser constituída por um maior teor de borne.

Em resumo, como mostram os quadros anteriores, em cada uma das vigas L, R, H e B/3 os valores de percentagens de degradação são próximos. Por sua vez as vigas J, Q e U apresenta uma maior variação das percentagens de degradação dentro da mesma viga.

Como foi referido a viga R é visualmente a viga mais degradada por caruncho. No entanto o grau de degradação é inferior ao das vigas L e J. O facto poderá dever-se a um $\Delta M_{\text{sã}}$ inferior ao teórico que foi usado, o que não pode ser confirmado por não existirem provetes sãos da viga R.

5.4 Relação entre a massa volúmica e o grau de degradação

O Quadro 5.13 apresenta a massa volúmica e o grau de degradação dos provetes.

Quadro 5.13 - Valores da variação de massa devido à degradação e massa volúmica de todos os provetes que foram submetidos a ensaios mecânicos

		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	Massa Volúmica (Kg/m^3)
Viga L	São	2L-3	0,00	444,06
	Degradados	2L-12	9,58	385,69
		2L-24	23,81	401,63
		2L-23	24,78	387,24
		2L-13	26,32	404,75
Viga R	Degradados	2R-11	14,11	599,49
		2R-62	19,99	585,52
		2R-31	28,42	543,30
		2R-22	28,50	543,34
		2R-53	33,32	563,20
		2R-54	34,83	548,46
		2R-63	36,13	548,38
Viga J	Sãos	4J-33	0,00	502,26
		4J-34	0,00	486,78
	Degradados	4J-73	0,92	487,29
		4J-54	33,14	528,29
		4J-53	39,99	525,04
		4J-41	44,16	504,62
		4J-52	44,4	529,31
		4J-62	52,77	480,18
		4J-61	56,39	472,25
Viga U	Sãos	2U-11	0,00	543,41
		2U-12	0,00	562,84
		2U-14	0,00	550,97
Viga H	Degradados	2H-11	14,55	516,92
		2H-32	26,02	476,47
		2H-23	27,05	434,72
Viga B/3	São	2B/3-13	0,00	596,35
	Degradados	2B/3-12	0,78	589,14
		2B/3-11	1,01	569,22
Viga Q	Degradados	2Q-53	52,38	468,61
		2Q-42	58,06	523,25
		2Q-32	59,95	489,84
		2Q-82	63,78	433,30
		2Q-24	70,95	483,96
		2Q-71	75,95	517,44
		2Q-72	81,48	508,68

A degradação por caruncho leva a uma perda de massa, pressupondo, portanto, que quanto maior for o grau de degradação menor será a massa volúmica. Esta relação é estudada através dos gráficos apresentados na figura 5.3.

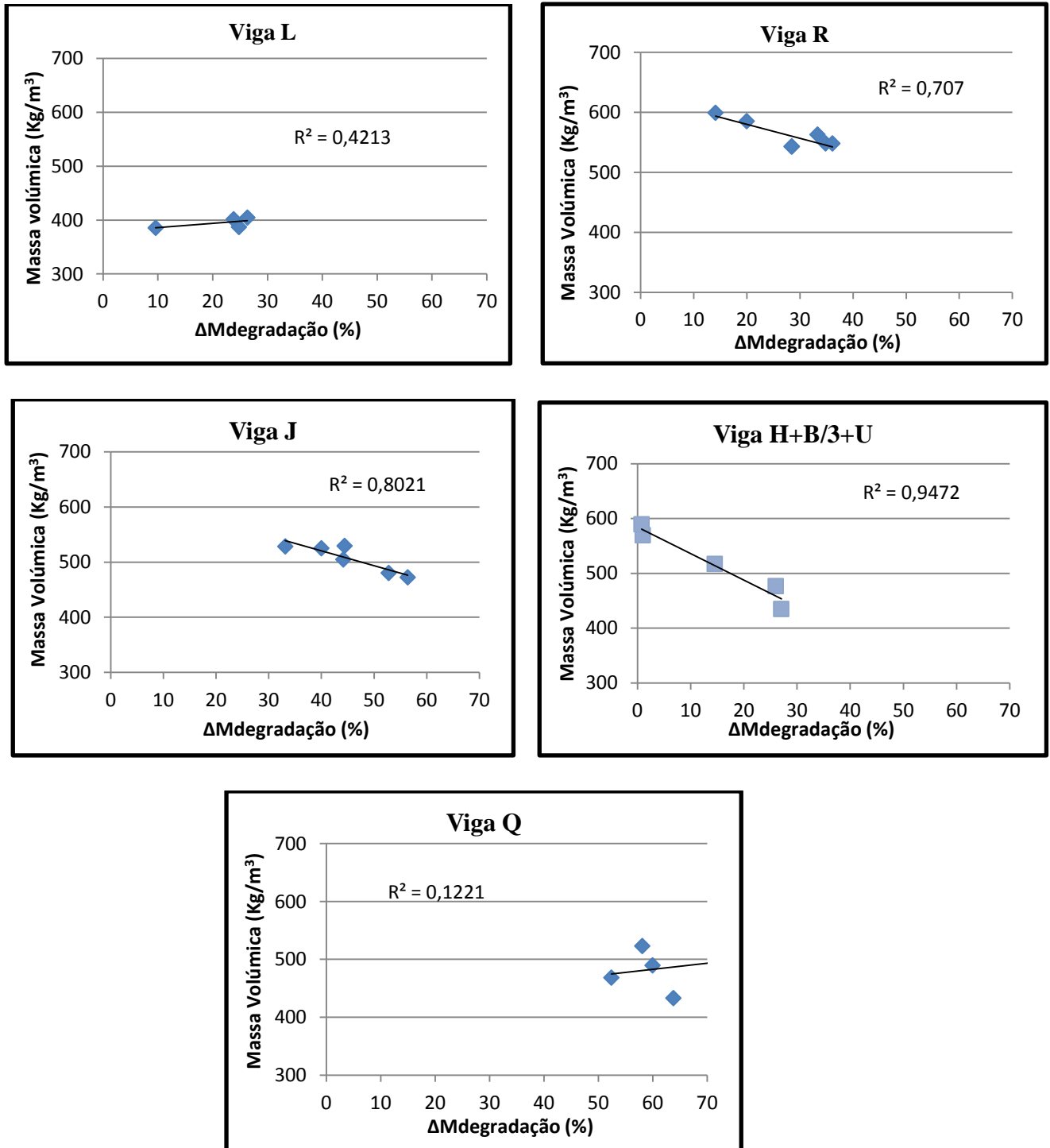


Figura 5.3 - Correlação entre $\Delta M_{degradação}$ e a Massa volúmica

A viga L apresenta um comportamento inverso ao esperado: quanto maior o grau de degradação dos provetes maior a massa volúmica. A viga R, J, H, B/3 e U apresentam o comportamento esperado, ou seja, quanto maior o grau de degradação dos provetes menor a massa volúmica. Na viga J, o provete 4J-73 não foi considerado para esta correlação uma vez que o $\Delta M_{\text{degradação}}$ é inferior a 1% e portanto este encontra-se praticamente são. As cinco vigas apresentam uma relação linear com um coeficiente de determinação elevado. Para a viga Q existe uma grande variação de resultados, não nos permitindo retirar conclusões.

Podemos considerar que de facto existe uma relação relativamente linear entre a massa volúmica e o grau de degradação ($\Delta M_{\text{degradação}}$) e, nos casos em que tal não se verifica, outros fatores que afetam a massa volúmica, poderão “mascarar” os resultados. Entre esses fatores podemos salientar os seguintes: a quantidade de serrim presente no interior do provete, existência de eventuais bolsas de resina, eventuais micro-fendas, corpos estranhos como pregos no interior dos provetes. As razões apresentadas poderão explicar também porque o provete são da viga J apresenta uma massa volúmica inferior à apresentada por alguns dos provetes degradados, ao contrário de o que ocorre com a viga L e B/3.

5.5 Ensaio de Compressão

Para o ensaio de compressão foram selecionados 45 provetes de diferentes vigas, e dentro da mesma viga a seleção foi feita pela seu grau de degradação ($\Delta M_{\text{degradação}}$). Os resultados obtidos apresentam-se nos Quadros 5.14 a 5.20.

Quadro 5.14 - Resumo dos resultados para os provetes da viga L

		VIGA L				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)	ρ (Kg/m ³)	fc (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
São	2L-3	0,00	444,06	27,49	0,62	2871,00
Degradados	2L-12	9,58	385,69	24,22	0,82	1864
	2L-24	23,81	401,63	25,67	0,57	1887
	2L-23	24,78	387,24	22,9	2,21	2585
	2L-13	26,32	404,75	23,62	0,88	1797

Quadro 5.15 - Resumo dos resultados para os provetes da viga R

		VIGA R					
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	E (MPa)
Degrados	2R-11		14,11	599,49	36,03	0,64	2419
	2R-62		19,99	585,52	31,83	1,02	3097
	2R-31		28,42	543,30	27,11	0,5	3074
	2R-22		28,50	543,34	30,3	0,38	3723
	2R-53		33,32	563,20	30,45	0,4	3614
	2R-54		34,83	548,46	29,25	0,62	3112
	2R-63		36,13	548,38	31,09	0,51	3689

Quadro 5.16 - Resumo dos resultados para os provetes da viga J

		VIGA J					
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	E (MPa)
Sãos	4J-33		0,00	502,26	32,39	3,31	2935
	4J-34		0,00	486,78	35,29	2,39	2614
Degrados	4J-73		0,92	487,29	31,94	1,9	1907
	4J-54		33,14	528,29	34,08	0,76	3072
	4J-53		39,99	525,04	32,46	0,79	2199
	4J-41		44,16	504,62	31,22	0,74	2613
	4J-52		44,4	529,31	33,42	1,14	3859
	4J-62		52,77	480,18	33,59	1,33	2725
	4J-61		56,39	472,25	32,91	0,85	2895

Quadro 5.17 - Resumo dos resultados para os provetes da viga Q

		VIGA Q					
		Provete	$\Delta M_{\text{Saturação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	E (MPa)
Degrados	2Q-53		52,38	468,61	36,54	1,5	3046
	2Q-42		58,06	523,25	38,09	1,23	2998
	2Q-32		59,95	489,84	35,67	0,63	2369
	2Q-82		63,78	433,30	30,99	0,76	2378
	2Q-24		70,95	483,96	26,88	0,59	2292
	2Q-71		75,95	517,44	33,57	1,23	2596
	2Q-72		81,48	508,68	33,6	0,97	2262

Quadro 5.18 - Resumo dos resultados para os provetes da viga U

		VIGA U					
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	$E (\text{MPa})$
Sãos		2U-11	0,00	543,41	38,67	0,67	2423
		2U-12	0,00	562,84	36,28	1,55	2560
		2U-14	0,00	550,97	36,72	2,48	2904

Quadro 5.19 - Resumo dos resultados para os provetes da viga H

		VIGA H					
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	$E (\text{MPa})$
Degradados		2H-11	14,55	516,92	36,06	1,12	2173
		2H-32	26,02	476,47	32,75	0,73	2551
		2H-23	27,05	434,72	31,17	2,3	1598

Quadro 5.20 - Resumo dos resultados para os provetes da viga B/3

		VIGA B/3					
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$	$\epsilon (\%)$	$E (\text{MPa})$
São		2B/3-13	0,00	596,35	37,62	1,55	2255
Degradados		2B/3-12	0,78	589,14	35,71	1,09	2374
		2B/3-11	1,01	569,22	37,39	2,26	3009

De seguida os resultados serão apresentados de acordo com a característica a estudar para cada viga.

5.5.1 Resistência mecânica

5.5.1.1 Apresentação de resultados

Os Quadros 5.21 a 5.25 apresentam os resultados e a correlação entre a $\Delta M_{\text{degradação}}$ (%) e a massa volúmica com a tensão máxima de compressão.

Quadro 5.21 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga L

Viga L				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)	ρ (Kg/m ³)	fc (MPa)
São	2L-3	0,00	444,06	27,49
Degradados	2L-12	9,58	385,69	24,22
	2L-24	23,81	401,63	25,67
	2L-23	24,78	387,24	22,9
	2L-13	26,32	404,75	23,62

Para a viga L verifica-se que o provete são é mais resistente que os provetes que se encontram degradados. O grau de degradação e a tensão de rotura não apresentam entre si uma relação linear significativa. No entanto, existe uma relação linear, com um bom coeficiente de determinação, entre a massa volúmica e a tensão de rotura. O provete são, com maior massa volúmica, é o que apresenta maior tensão de rotura.

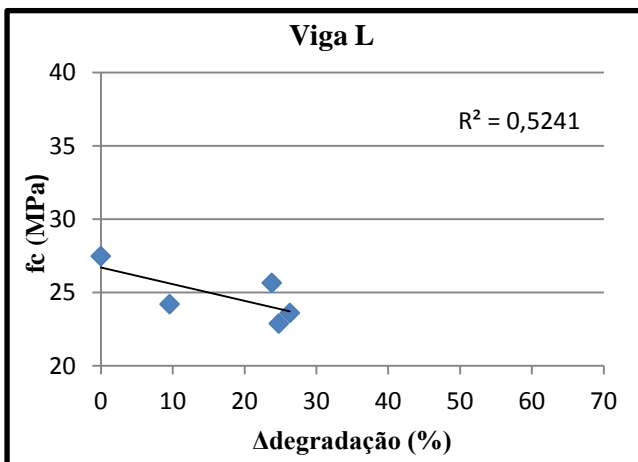


Figura 5.4 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga L

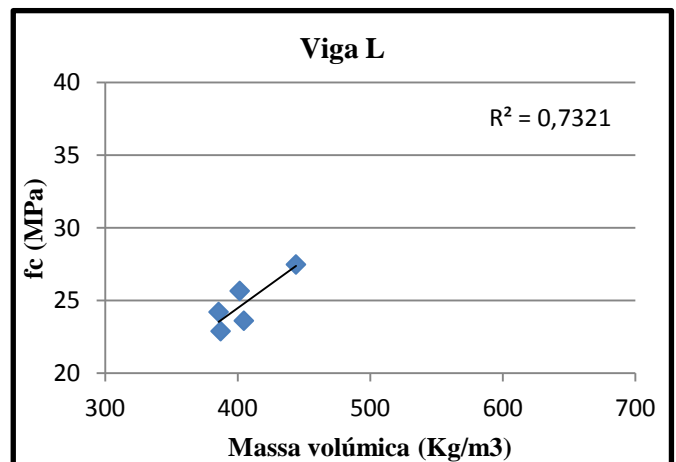


Figura 5.5 - Correlação entre tensão de rotura e a massa volúmica da viga L

Quadro 5.22 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga R

Viga R				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$
Degradados	2R-11	14,11	599,49	36,03
	2R-62	19,99	585,52	31,83
	2R-31	28,42	543,30	27,11
	2R-22	28,50	543,34	30,3
	2R-53	33,32	563,20	30,45
	2R-54	34,83	548,46	29,25
	2R-63	36,13	548,38	31,09

Para a viga R, verifica-se uma tendência, tal como na viga L, para uma diminuição de tensão de rotura com o grau de degradação, mas a relação linear tem um fraco coeficiente de determinação. Regista-se o mesmo comportamento que a viga L, no que respeita à massa volúmica.

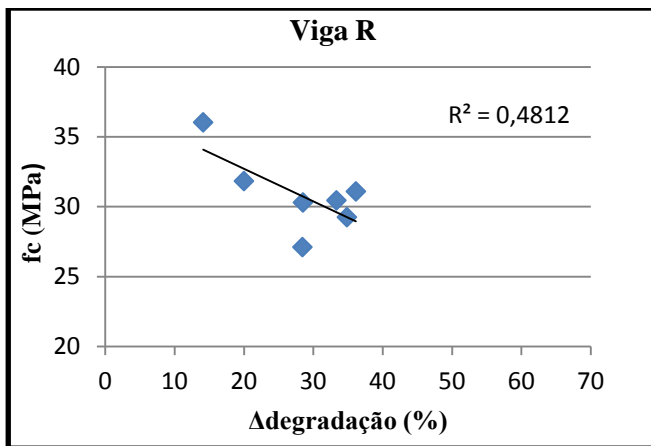


Figura 5.6 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga R

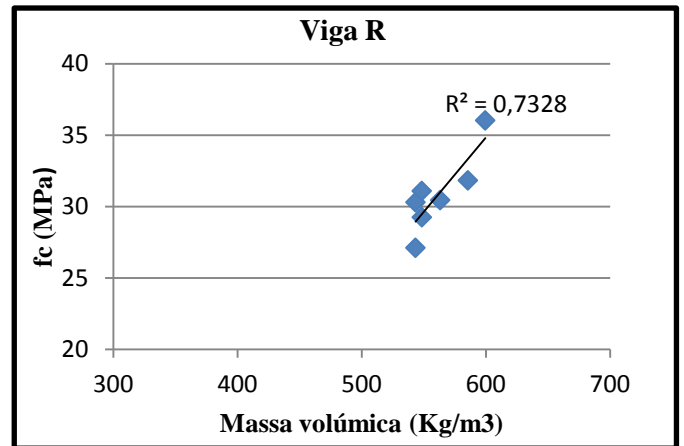


Figura 5.7 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga R

Quadro 5.23 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para a viga J

Viga J				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$
Sãos	4J-33	0,00	502,26	32,39
	4J-34	0,00	486,78	35,29
Degradados	4J-73	0,92	487,29	31,94
	4J-54	33,14	528,29	34,08
	4J-53	39,99	525,04	32,46
	4J-41	44,16	504,62	31,22
	4J-52	44,4	529,31	33,42
	4J-62	52,77	480,18	33,59
	4J-61	56,39	472,25	32,91

Para a viga J os provetes são apresentam uma maior resistência que os provetes degradados. Nesta viga, a força de rotura parece não ser influenciada significativamente nem pelo grau de degradação nem pela massa volúmica. Dentro dos provetes degradados verifica-se que para os diferentes graus de degradação a resistência dos provetes pouco se altera, situando-se entre 31 a 34 MPa de tensão de rotura. Este facto pode sugerir que estando a madeira degradada esta resiste praticamente o mesmo e a diferença de resistência entre degradados e são não é muito elevada.

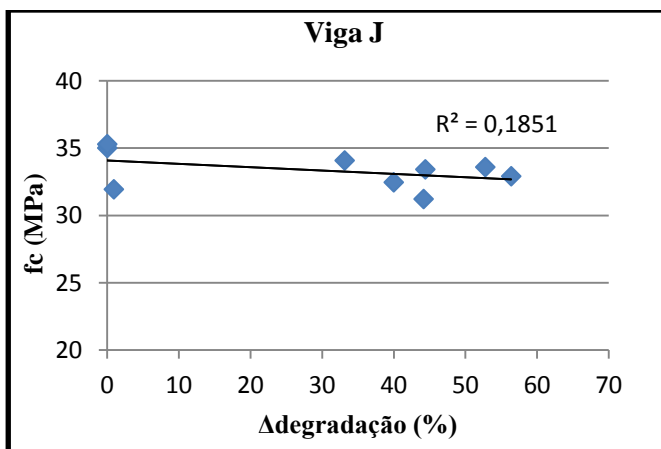


Figura 5.8 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga J

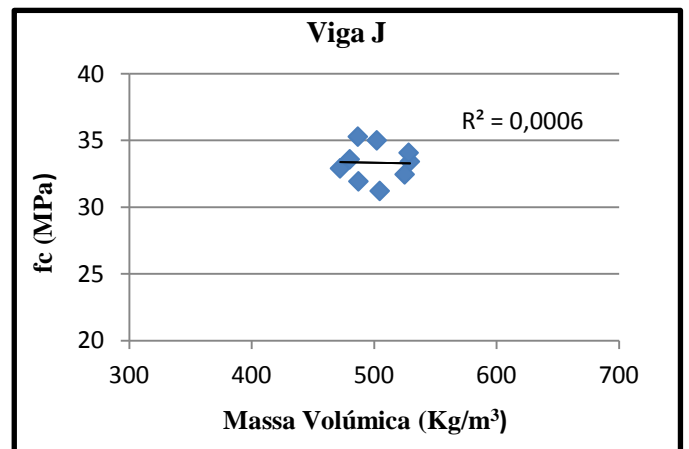


Figura 5.9 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga J

Quadro 5.24 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com tensão de rotura para as vigas H+B3+U

Viga H + B3 + U				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$f_c (\text{MPa})$
Sãos	2U-11	0,00	543,41	38,67
	2U-12	0,00	562,84	36,28
	2U-14	0,00	550,97	36,72
Degradados	2H-11	14,55	516,92	36,06
	2H-32	26,02	476,47	32,75
	2H-23	27,05	434,72	31,17
São	2B/3-13	0,00	596,35	37,62
Degradados	2B/3-12	0,78	589,14	35,71
	2B/3-11	1,01	569,22	37,39

Juntamos os provetes das vigas H, B3 e U para efetuar a respetiva análise uma vez que estes apresentam massas volúmicas muito próximas. Mais uma vez se verifica que a resistência dos provetes são é superior aos degradados.

Continua-se a verificar o mesmo tipo de relação que nos provetes da viga L e R. Neste caso o coeficiente de correlação linear entre o grau de degradação e a tensão de rotura é superior aos verificados nas outras duas vigas.

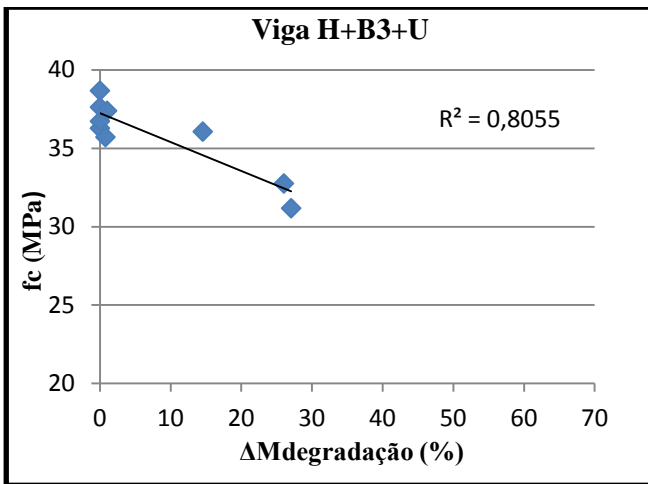


Figura 5.10 - Correlação entre a tensão de rotura e a % degradação da viga H+B3+U

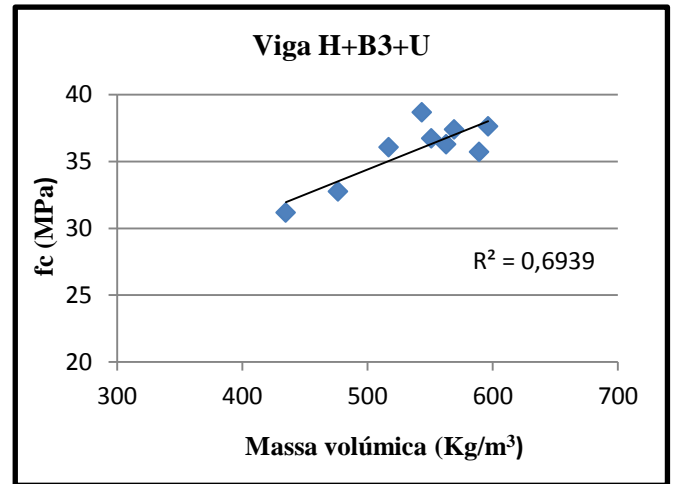


Figura 5.11 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga H+B3+U

Quadro 5.25 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com tensão de rotura para a viga Q

		Viga Q			
		Provete	$\Delta M_{\text{saturação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	fc (MPa)
Degradados		2Q-53	52,38	468,61	36,54
		2Q-42	58,06	523,25	38,09
		2Q-32	59,95	489,84	35,67
		2Q-82	63,78	433,30	30,99
		2Q-24	70,95	483,96	26,88
		2Q-71	75,95	517,44	33,57
		2Q-72	81,48	508,68	33,6

Na viga Q, choupó, observa-se que as percentagens de saturação não influenciam significativamente a tensão de rotura. O provete 2Q-72 tem uma percentagem de saturação de 81,48% e uma tensão de rotura de 33,6 MPa enquanto o provete 2Q-53 apresenta uma percentagem de saturação de 52,38% e 36,54 MPa de tensão de rotura.

Esta viga não apresenta uma relação linear entre a percentagem de saturação e a tensão de rotura. O mesmo ocorre com a massa volúmica.

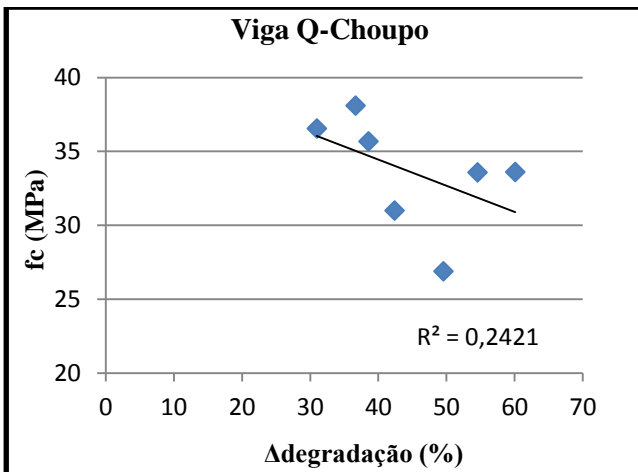


Figura 5.12 - Correlação entre a tensão de rotura e a % saturação da viga Q

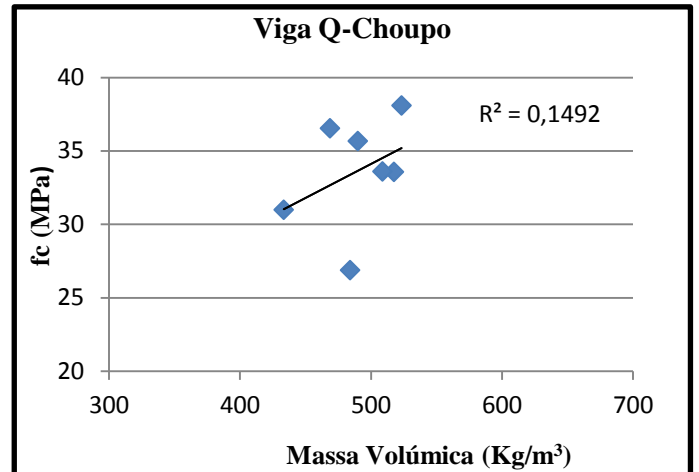


Figura 5.13 - Correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica da viga Q

5.5.1.2 Discussão dos resultados

De uma forma geral, verifica-se que os provetes são ou pouco degradados têm maior resistência à compressão que os provetes mais degradados. Pode-se considerar em todas as vigas, com a exceção da viga J, uma tendência para uma diminuição da tensão de rotura com um aumento do grau de degradação e um aumento da tensão de rotura com um aumento da massa volúmica. Apenas no caso da massa volúmica é que se estabelece uma relação linear com um coeficiente de determinação satisfatório. No caso da viga J, é possível que a variação do grau de degradação, assim como da massa volúmica, não seja suficiente para se refletir em diferenças significativas na tensão de rotura.

Pelos resultados obtidos, podemos verificar que a diferença entre as tensões de rotura dos provetes com diferentes graus de degradação não é muito significativa. Na maioria das vigas, a tensão de rotura apresenta valores muito próximos. Este facto pode sugerir que apesar de a madeira se encontrar degradada, a redução de área efetiva do provete e perda de massa devido à degradação, não é suficiente para afetar significativamente a resistência mecânica.

De acordo com Negrão e Amorim (2009) a resistência à compressão axial para resinosas comuns é de 40 a 50 MPa. Neste caso as tensões de rotura mesmo em provetes são não atingem os 40 MPa o que se deve ao facto de se tratar de madeira antiga usada em edifícios com mais de 200 anos.

Num estudo efetuado no LNEC por Cruz e Machado (2013) em que foi comparado a massa volúmica com a resistência a compressão de provetes degradados por caruncho, os autores verificaram que apesar de não haver uma boa correlação de resultados, como era de esperar, os que tinham maior massa volúmica apresentavam maior resistência mecânica. O gráfico seguinte mostra alguns dos resultados obtidos no estudo de Cruz e Machado (2013).

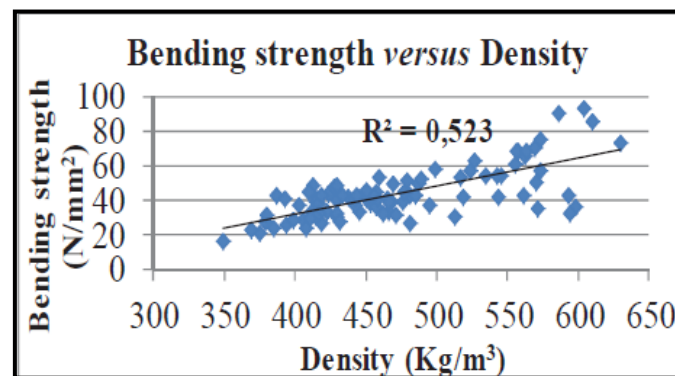


Figura 5.14 - Gráfico de correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica de provetes degradados por caruncho (Cruz & Machado, 2013)

Num outro estudo realizado por Ramos (2009), foi efetuada a correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica de provetes com as dimensões 2x2x6 cm de madeira de carvalho. À semelhança dos resultados obtidos no estudo anteriormente apresentado, também aqui a correlação é fraca como mostra a Figura 5.15.

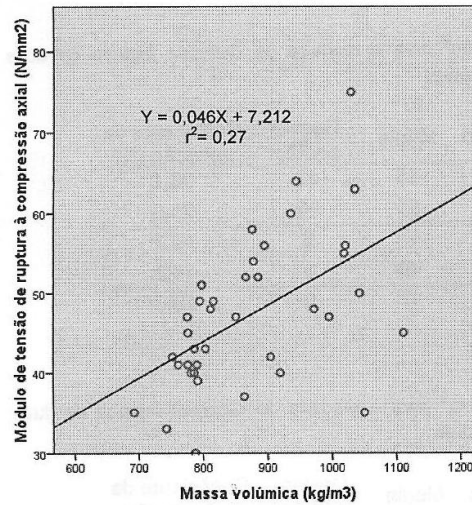


Figura 5.15 - Gráfico com correlação entre a tensão de rotura e a massa volúmica (Ramos, 2009)

Também neste caso de estudo verificou-se a mesma conclusão, ou seja, não existe uma correlação de resultados mas de uma forma geral os que têm maior massa volúmica apresentam maior resistência. Este facto é também verificado quando analisamos os resultados da percentagem de degradação, quanto maior a percentagem de degradação menor a sua resistência ainda que não de forma significativa.

5.5.2 Tipo de rotura

Como mostra a ASTM D-142 de 1994 a rotura na madeira quando submetida à compressão pode dar-se de várias formas.

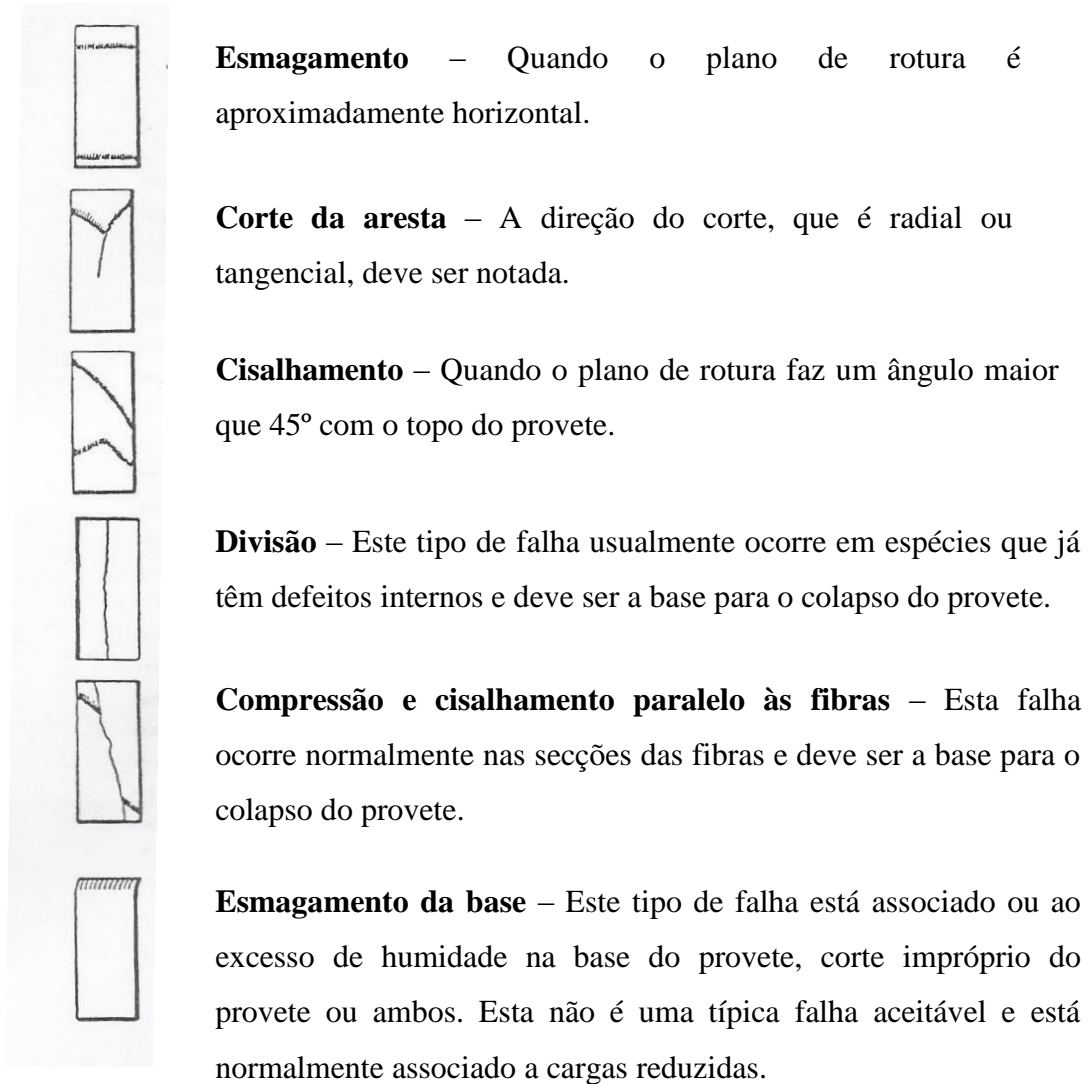


Figura 5.16 - Tipos de fraturas em peças de madeira sujeitas a compressão axial (ASTM D-143, 1994)

Neste estudo as formas de rotura verificadas foram as de esmagamento, cisalhamento, divisão e esmagamento da base.

Nos provetes a rotura foi preferencialmente por cisalhamento e em muitos casos esmagamento da base do provete.

Nos provetes degradados a rutura na maior parte dos casos não é muito visível uma vez que o provete ao ser comprimido as galerias abertas no seu interior pelo caruncho são fechadas, noutros caos ocorrem a divisão do provetes o que também de pode dever à forma das galerias no interior do provete. Também nestes ocorre esmagamento da base e rutura por cisalhamento.



Figura 5.18 - Rotura por cisalhamento



Figura 5.17 - Rotura por esmagamento da base

5.5.3 Deformação em fase plástica

5.5.3.1 Apresentação de resultados

Relacionando agora os valores do grau de degradação e massa volúmica dos provetes com a sua respetiva extensão plástica, os resultados obtidos apresentam-se em seguida. É também apresentado o gráfico de tensão de rutura versus deformação para cada viga, apresentando os provetes por ordem crescente de grau de degradação.

Quadro 5.26 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga L

Viga L				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$\epsilon (\%)$
São	2L-3	0,00	444,06	0,62
Degradados	2L-12	9,58	385,69	0,82
	2L-24	23,81	401,63	0,57
	2L-23	24,78	387,24	2,21
	2L-13	26,32	404,75	0,88

Através da análise dos resultados da extensão plástica verifica-se que a tendência é de que quanto maior a grau de degradação maior o patamar de deformação depois de ser atingindo o valor máximo de tensão de rotura. O facto do coeficiente de determinação da reta ser muito baixo evidencia que não existe uma relação linear entre estas duas propriedades.

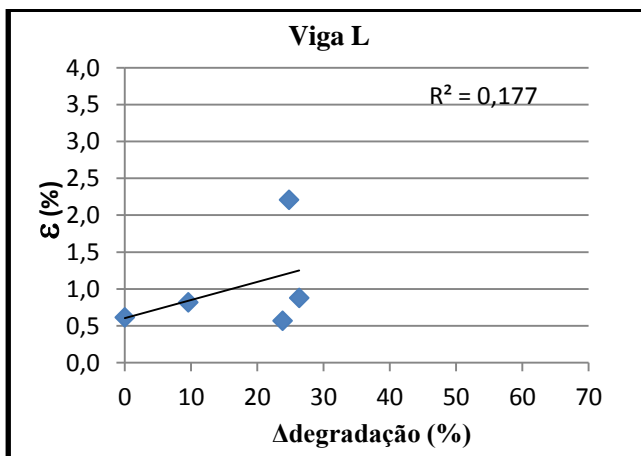


Figura 5.19 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga L

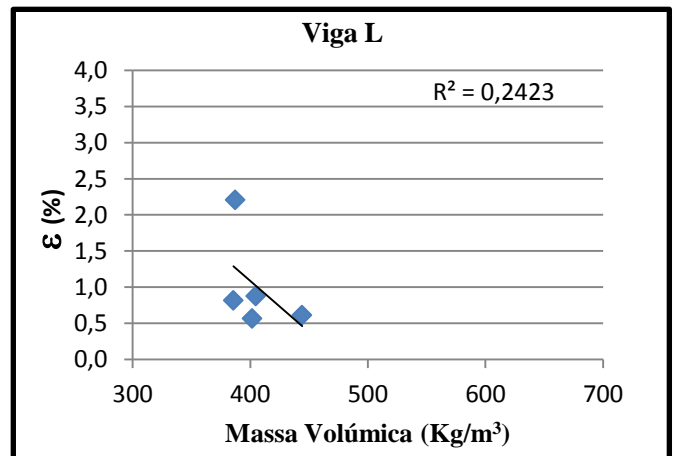


Figura 5.20 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga L

Podemos verificar no gráfico da figura 5.21 que os provetes degradados desta viga apresentam uma deformação semelhante ao provete são, com exceção do provete 2L-23, o qual apresenta uma deformação muito maior que qualquer um dos outros provetes, apesar de apresentar o segundo maior grau de degradação.

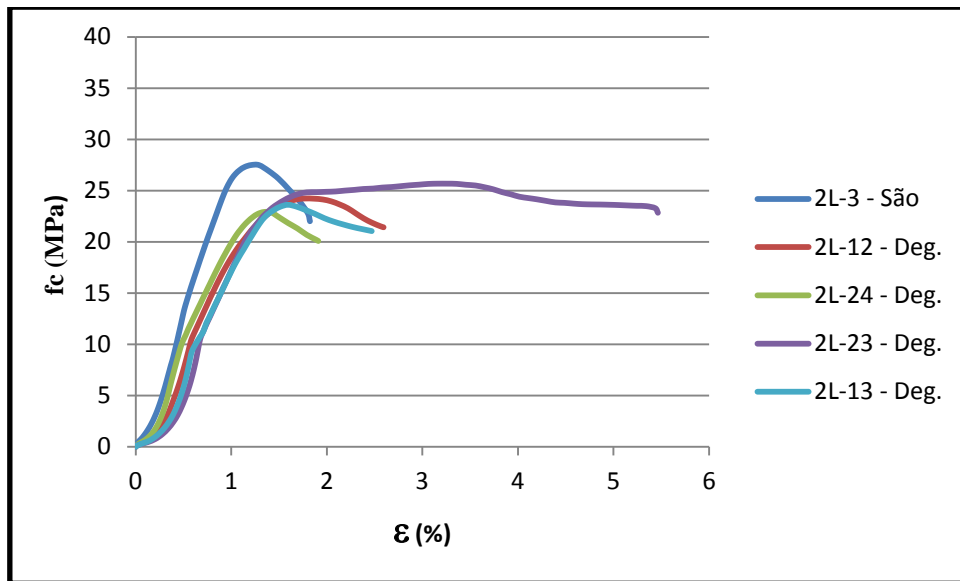


Figura 5.21 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga L

Quadro 5.27 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga R

Viga R				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$\epsilon (\%)$
Degradados	2R-11	14,11	599,49	0,64
	2R-62	19,99	585,52	1,02
	2R-31	28,42	543,30	0,5
	2R-22	28,50	543,34	0,38
	2R-53	33,32	563,20	0,4
	2R-54	34,83	548,46	0,62
	2R-63	36,13	548,38	0,51

Os provetes da viga R demonstram ter o comportamento esperado e contrário aos verificados na viga L, ou seja, a tendência nesta viga é que para valores maiores de grau de degradação e menor massa volúmica menor é a deformação. No entanto continua a observar-se a inexistência duma relação linear significativa.

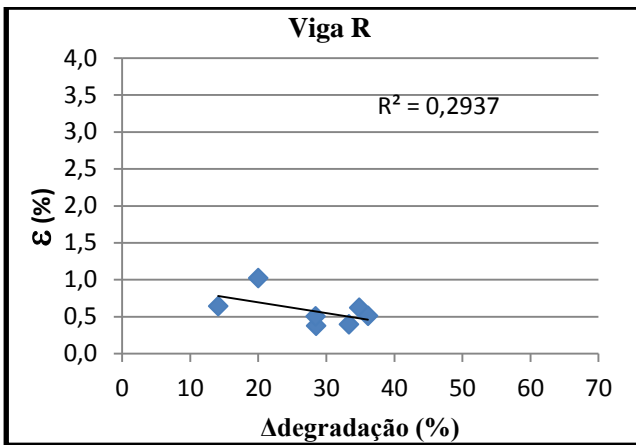


Figura 5.22 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga R

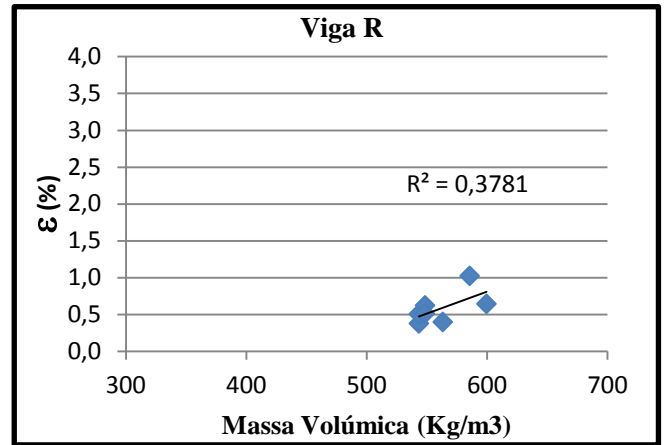


Figura 5.23 - Correlação entre extensão e a massa volúmica da viga R

No gráfico da figura 5.24 observa-se que os dois provetes com menor grau de degradação apresentam uma extensão maior que os restantes, os quais têm valores de deformação muito semelhantes.

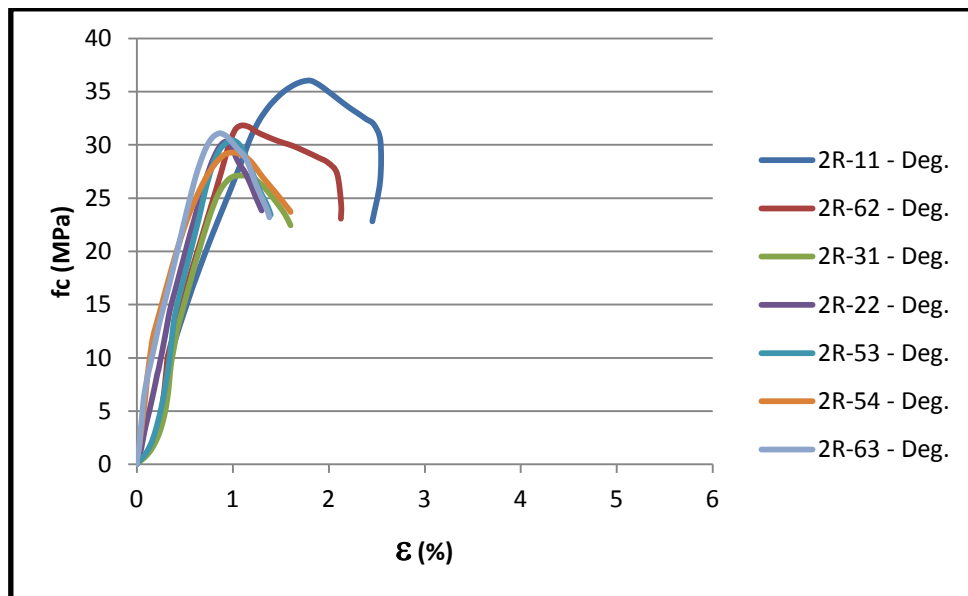


Figura 5.24 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga R

Quadro 5.28 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga J

		Viga J			
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$\epsilon (\%)$
Sãos		4J-33	0,00	502,26	3,31
		4J-34	0,00	486,78	2,39
Degradados		4J-73	0,92	487,29	1,9
		4J-54	33,14	528,29	0,76
		4J-53	39,99	525,04	0,79
		4J-41	44,16	504,62	0,74
		4J-52	44,4	529,31	1,14
		4J-62	52,77	480,18	1,33
		4J-61	56,39	472,25	0,85

À semelhança do que aconteceu com a viga R também os provetes da viga J mantêm o mesmo comportamento. O fator de determinação é superior nesta viga, mas não é ainda significativo para se concluir que existe uma relação linear entre as propriedades em estudo.

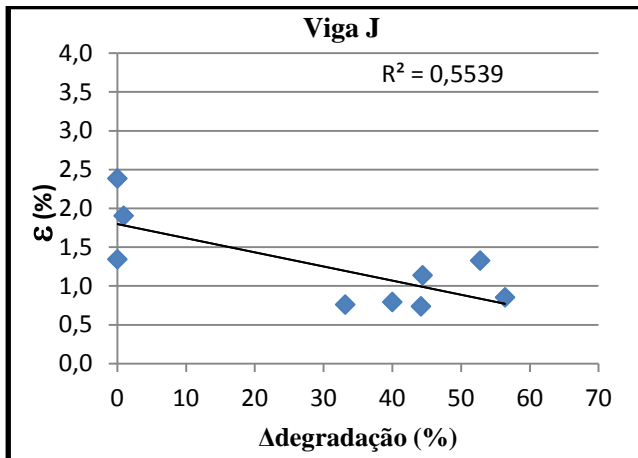


Figura 5.25 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga J

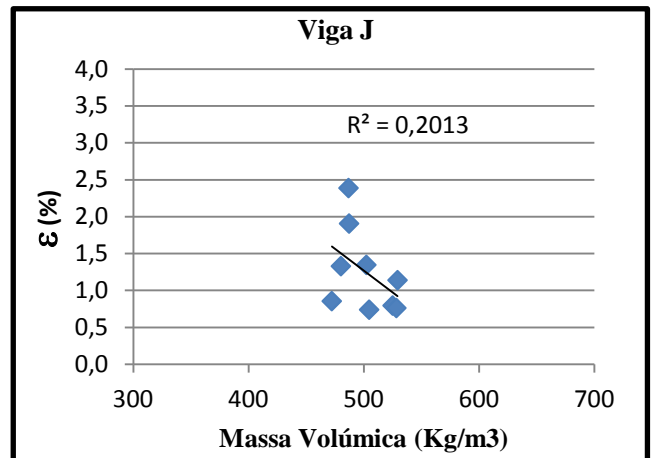


Figura 5.26 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga J

Observando agora o gráfico da figura 5.27 com o desenvolvimento da deformação com a aplicação da tensão verifica-se os provetes são têm um patamar de deformação claramente superior a outros provetes que se encontram degradados. Também neste caso as tensões de rotura são próximas realçando o facto de os patamares serem bastante distintos. No entanto existe um grupo de provetes que apresentam um patamar de deformação muito semelhante ($\Delta M_{\text{degradação}}$ (%) entre 33,14% a 44,4%).

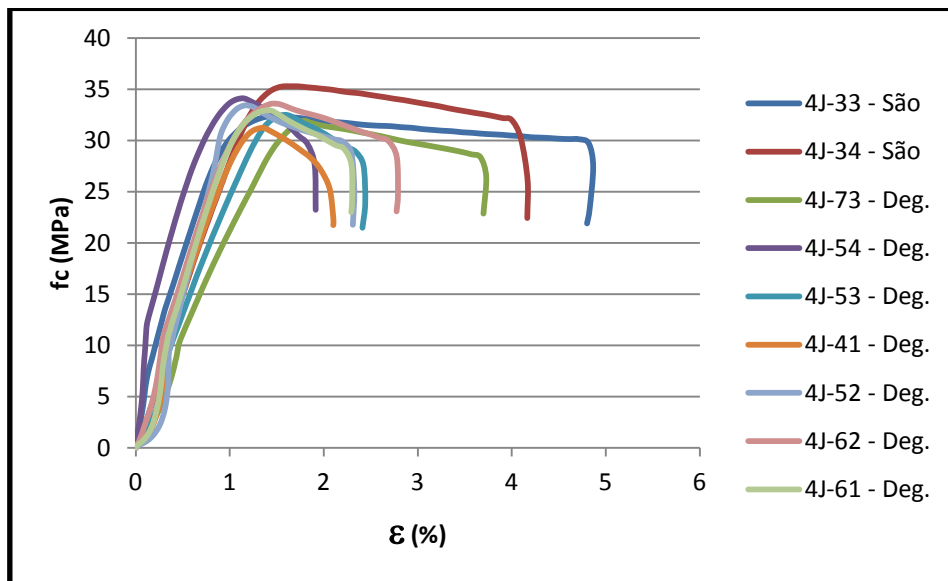


Figura 5.27 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga J

Quadro 5.29 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com extensão para a viga H+B3+U

Viga H + B3 + U				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	$\epsilon (\%)$
Sãos	2U-11	0,00	543,41	0,67
	2U-12	0,00	562,84	1,55
	2U-14	0,00	550,97	2,48
Degradados	2H-11	14,55	516,92	1,12
	2H-32	26,02	476,47	0,73
	2H-23	27,05	434,72	2,3
São	2B/3-13	0,00	596,35	1,55
Degradados	2B/3-12	0,78	589,14	1,09
	2B/3-11	1,01	569,22	2,26

Observando os resultados do conjunto de vigas H, B3 e U verifica-se que a deformação é praticamente independente do grau de degradação ou da massa volúmica.

Os provetes da viga 2B/3 têm um pequeno grau de degradação e o patamar de deformação é elevado embora os dois provetes tenham uma diferença considerável no comprimento desse patamar.

Os provetes da viga U, são, também têm patamares de deformação elevados mas o provete 2U-11 não mantêm este comportamento.

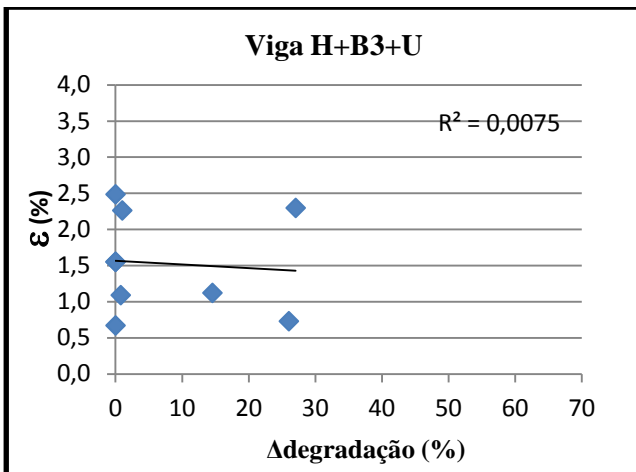


Figura 5.28 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga H+B3+U

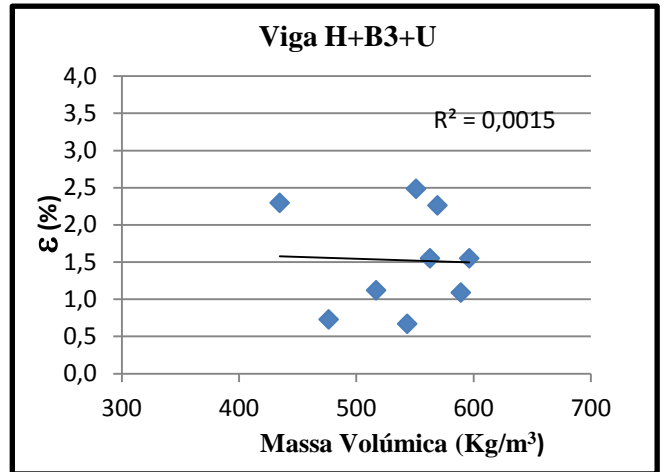


Figura 5.29 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga H+B3+U

Como mostra o gráfico da figura 5.30, as tensões de rotura são bastante próximas assim como o patamar de deformação dos provetes. Esta pequena diferença de comprimentos dos patamares deve-se aos provetes serem sãos ou muito pouco degradados. O que apresenta uma das degradações maiores é o 2H-32 e é o que apresenta o patamar de deformação mais pequeno.

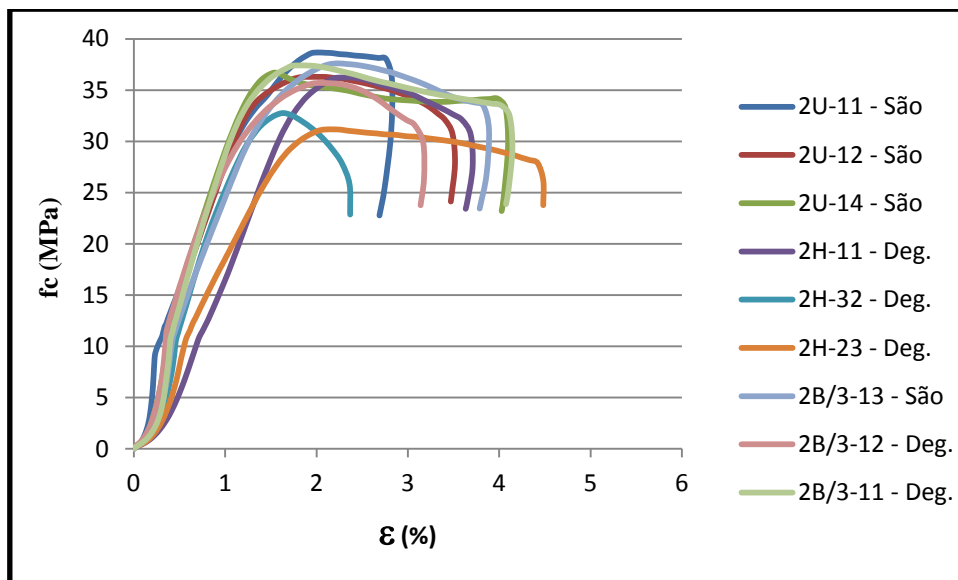


Figura 5.30 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga H+B3+U

Quadro 5.30 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com extensão para a viga Q

Viga Q				
Degradados	Provete	ΔM_{total} (%)	ρ (Kg/m ³)	ϵ (%)
	2Q-53	52,38	468,61	1,5
	2Q-42	58,06	523,25	1,23
	2Q-32	59,95	489,84	0,63
	2Q-82	63,78	433,30	0,76
	2Q-24	70,95	483,96	0,59
	2Q-71	75,95	517,44	1,23
	2Q-72	81,48	508,68	0,97

À semelhança do que aconteceu com a tensão de rotura, também para a deformação os resultados da viga Q são bastante díspares principalmente ao analisar a percentagem de saturação e a deformação. Quanto à massa volúmica, aqui ainda que não seja muito linear, a tendência do que aconteceu com a viga R e J mantem-se. Quanto maior a massa volúmica maior o patamar de deformação depois de atingido o valor de tensão de rotura.

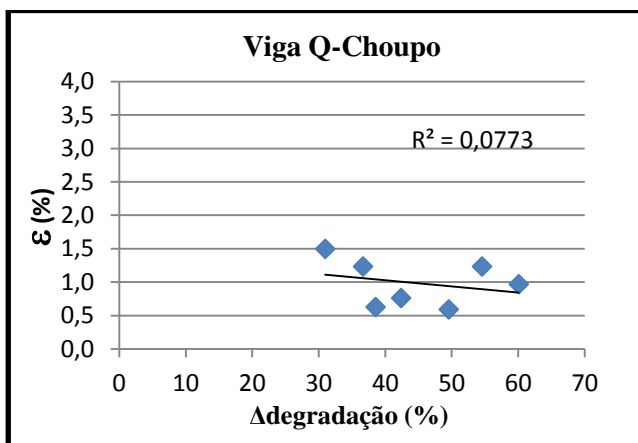


Figura 5.31 - Correlação entre a extensão e a % degradação da viga Q

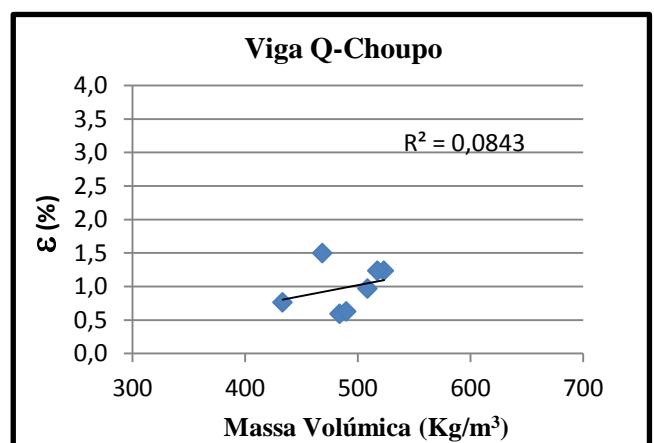


Figura 5.32 - Correlação entre a extensão e a massa volúmica da viga Q

Como se mostra na Figura 5.33, os patamares de deformação dos provetes da viga Q são muito próximos assim como a tensão de rotura. Aqui podemos também verificar que o provete 2Q-53, que tem menor percentagem de saturação (menos degradado), apresenta o maior patamar de deformação mantendo assim o comportamento esperado, de que quanto menos degradado maior o patamar de deformação. Este comportamento, nesta viga, nem sempre se verifica uma vez que existem provetes que mesmo estando bastante mais degradados continuam a ter patamares de deformação superiores aos esperados.

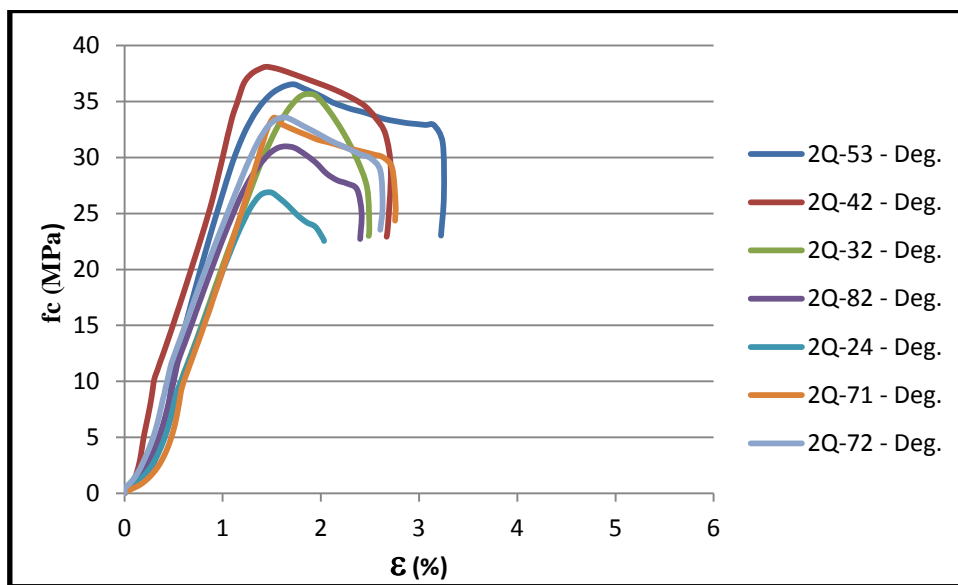


Figura 5.33 - Curvas tensão-extensão para os provetes da viga Q

5.5.3.2 Discussão de resultados

Tal como foi referido no capítulo 2, defeitos tais como vazios e micro-fendas dificultam o escorregamento das cadeias poliméricas, o que faz com que a extensão plástica diminua. O provete deixa de ter capacidade de absorver a energia que recebe, através da sua deformação plástica, ocorrendo a sua fratura.

Quando analisamos os gráficos que relacionam a extensão plástica com a tensão de rotura verifica-se que não existe correlação de resultados mas que para as vigas R, J, H, B/3 e U na fase elástica os provetes são e degradados apresentam o mesmo comportamento e como já foi referido anteriormente estes tem tensões de rotura muito próximas. O que se distingue nestes provetes é o patamar de deformação depois de atingido o valor máximo de tensão de rotura.

Nos provetes são ensaiados o patamar correspondente à extensão de deformação plástica é efetivamente, tal como se esperava, superior ao apresentado pelos provetes degradados, ou seja, depois de atingir o valor máximo de tensão de rotura os provetes são conseguem absorver a tensão, deformando-se plasticamente, sem entrar em rotura durante um determinado tempo enquanto os provetes degradados entram rapidamente em rotura. A viga L é a exceção a este comportamento: um dos provetes mais degradados tem maior deformação plástica, sendo que o provete são apresenta um patamar muito semelhante aos restantes provetes degradados.

Entre os provetes degradados não existe um comportamento consistente: nem sempre o mais degradado apresenta menor deformação plástica.

Dos ensaios efetuados podemos concluir que:

- A presença de túneis/galerias nos provetes devido ao ataque pelo caruncho diminui a capacidade de deformação plástica destes relativamente a provetes são;
- O comportamento não consistente apresentado pelos provetes degradados, sugere que os outros fatores estarão a influenciar a capacidade de deformação plástica e que se sobrepõem à influência do grau de degradação. Entre esses fatores poderão estar a porosidade, a sua distribuição, presença de micro-fendas, de materiais estranhos à madeira como bolsas de resina, pregos, entre outros.

5.5.4 Módulo de elasticidade

5.5.4.1 Apresentação de resultados

Os Quadros 5.31 a 5.35 apresentam os resultados e a correlação entre $\Delta M_{\text{degradação}}$ e massa volúmica com o módulo de elasticidade.

Quadro 5.31 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga L

Viga L				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}}$ (%)	ρ (Kg/m ³)	E (MPa)
São	2L-3	0,00	444,06	2871
Degradados	2L-12	9,58	385,69	1864
	2L-24	23,81	401,63	1887
	2L-23	24,78	387,24	2585
	2L-13	26,32	404,75	1797

Observando agora os valores obtidos do módulo de elasticidade com o ensaio de compressão axial, verifica-se que no caso da viga L o provete são tem um módulo de elasticidade superior aos provetes que se encontram degradados. Nos provetes degradados apesar de não haver uma linearidade de resultados, estes têm um módulo de elasticidade inferior.

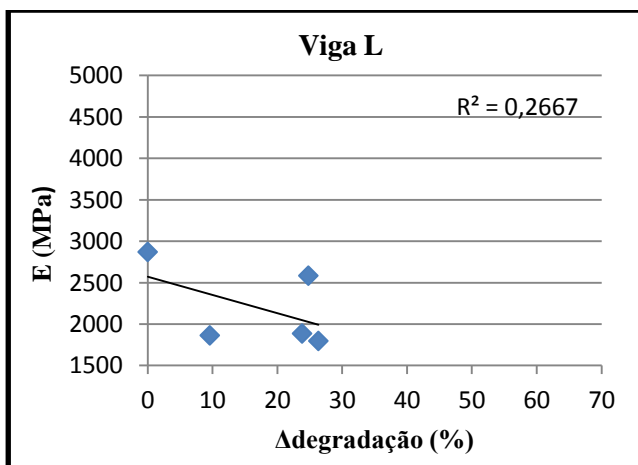


Figura 5.34 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga L

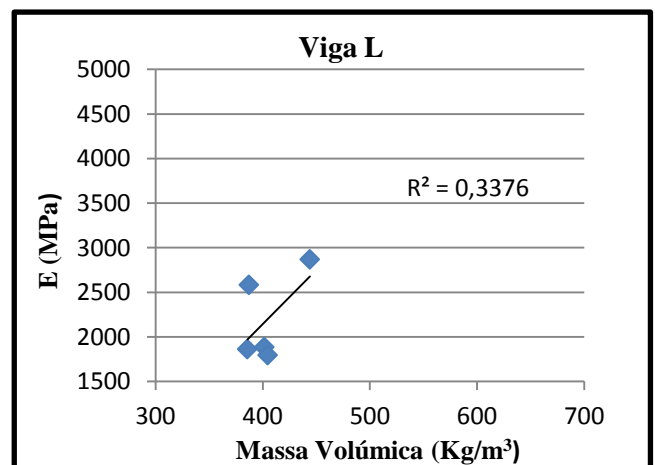


Figura 5.35 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga L

Analisando agora a massa volúmica deteta-se o mesmo comportamento que para o grau de degradação, ou seja, o provete com maior massa volúmica é o que tem maior módulo de elasticidade mas depois não existe uma linearidade de resultados.

Quadro 5.32 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga R

Viga R				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	Viga R	
			$\rho (\text{Kg/m}^3)$	E (MPa)
Degradados	2R-11	14,11	599,49	2419
	2R-62	19,99	585,52	3097
	2R-31	28,42	543,30	3074
	2R-22	28,50	543,34	3723
	2R-53	33,32	563,20	3614
	2R-54	34,83	548,46	3112
	2R-63	36,13	548,38	3689

Na viga R os provetes que têm menor grau de degradação (menos degradados) têm também menor módulo de elasticidade. Relativamente a massa volúmica, o comportamento mantém-se, os que têm maior massa volúmica (menos degradados) têm menor módulo de elasticidade. Neste caso o comportamento é contrário ao que aconteceu com o caso anterior (viga L).

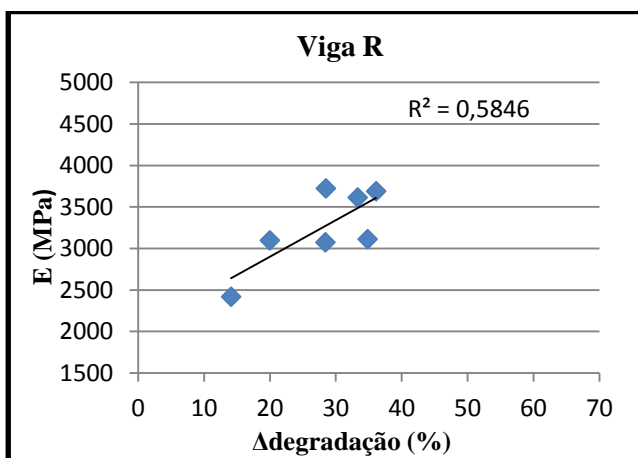


Figura 5.36 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga R

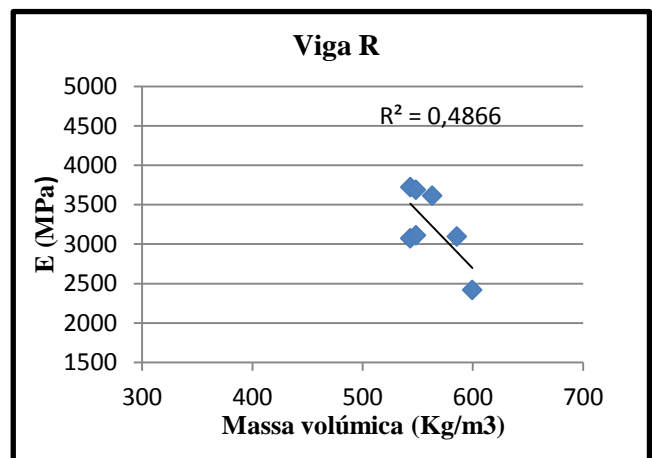


Figura 5.37 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga R

Quadro 5.33 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga J

		Viga J			
		Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	E (MPa)
Sãos		4J-33	0,00	502,26	2935
		4J-34	0,00	486,78	2614
Degradados		4J-73	0,92	487,29	1907
		4J-54	33,14	528,29	3072
		4J-53	39,99	525,04	2199
		4J-41	44,16	504,62	2613
		4J-52	44,4	529,31	3859
		4J-62	52,77	480,18	2725
		4J-61	56,39	472,25	2895

Para os provetes da viga J verifica-se que não há correlação de resultados pois tanto os provetes degradados como os são encontram-se praticamente no mesmo patamar de módulo de elasticidade, ou seja, para diferentes graus de degradação os módulos de elasticidade encontram-se entre 2000 e os 3000 MPa. O mesmo acontece ao analisar a massa volúmica.

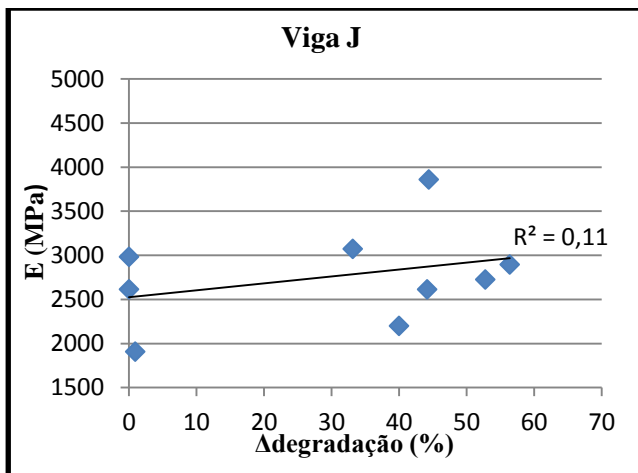


Figura 5.38 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga J

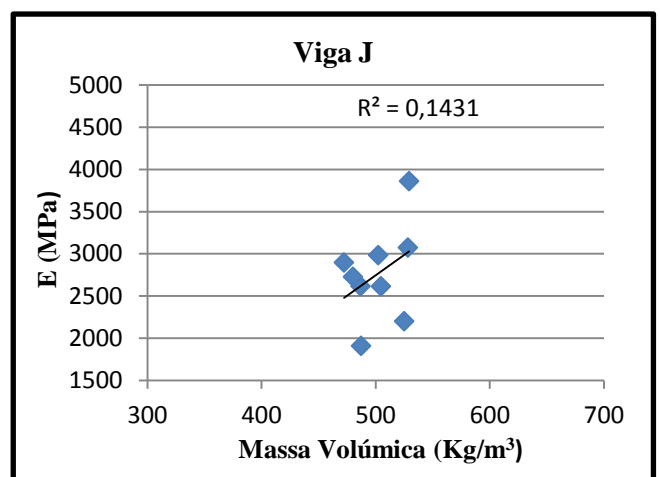


Figura 5.39 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga J

Quadro 5.34 - Relação Massa volúmica/grau de degradação com módulo de elasticidade para a viga H+B3+U

Viga H + B3 + U				
	Provete	$\Delta M_{\text{degradação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	E (MPa)
Sãos	2U-11	0,00	543,41	2423
	2U-12	0,00	562,84	2560
	2U-14	0,00	550,97	2904
Degradados	2H-11	14,55	516,92	2173
	2H-32	26,02	476,47	2551
	2H-23	27,05	434,72	1598
São	2B/3-13	0,00	596,35	2255
Degradados	2B/3-12	0,78	589,14	2374
	2B/3-11	1,01	569,22	3009

À semelhança do que aconteceu com a viga L, também o conjunto de provetes das vigas H, B3 e U seguem a mesma tendência. Os provetes são apresentam maior módulo de elasticidade que os provetes degradados.

Dentro dos provetes degradados e para provetes que têm graus de degradação muito próximos têm módulos de elasticidade muito distintos como é o caso dos provetes 2H-23 e 2H-32.

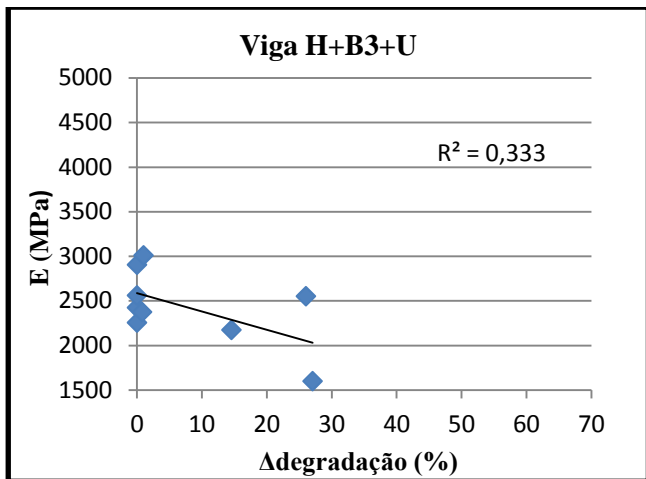


Figura 5.40 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % de degradação viga H+B3+U

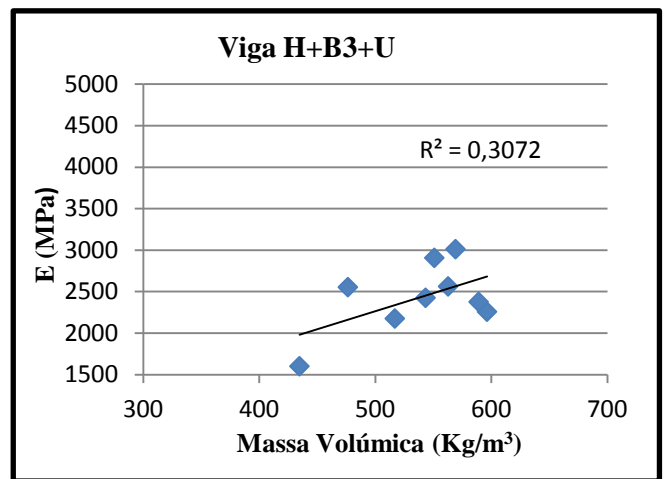


Figura 5.41 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga H+B3+U

Quadro 5.35 - Relação Massa volúmica/percentagem de saturação com módulo de elasticidade para a viga Q

		Viga Q			
		Provete	$\Delta M_{\text{saturação}} (\%)$	$\rho (\text{Kg/m}^3)$	E (MPa)
Degrados		2Q-53	52,38	468,61	3046
		2Q-42	58,06	523,25	2998
		2Q-32	59,95	489,84	2369
		2Q-82	63,78	433,30	2378
		2Q-24	70,95	483,96	2292
		2Q-71	75,95	517,44	2596
		2Q-72	81,48	508,68	2262

Os provetes da viga Q que têm menor percentagem de saturação (menos degradados) têm maior módulo de elasticidade. Quanto à massa volúmica não há correlação de resultados.

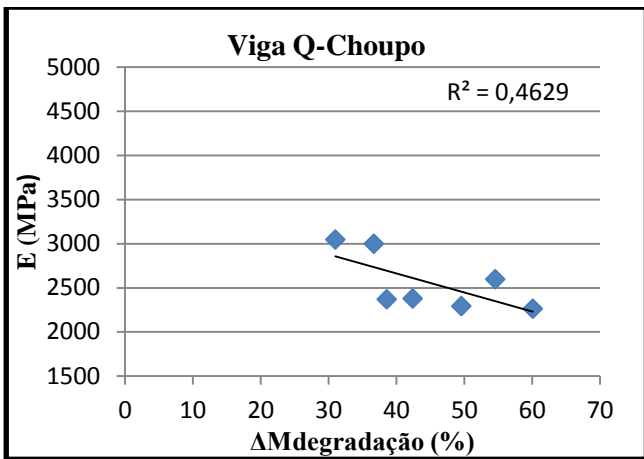


Figura 5.42 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a % degradação da viga Q

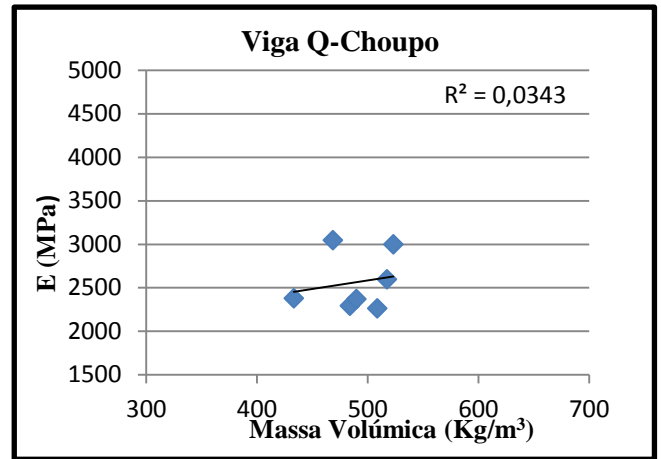


Figura 5.43 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica da viga Q

5.5.4.2 Discussão de resultados

Para o módulo de elasticidade não existe correlação de resultados, contudo as vigas L, H, B/3, U e Q mostram que os provetes com menor grau de degradação e maior massa volúmica têm maior módulo de elasticidade que os provetes que se encontram degradados. As vigas R e J apresentam um comportamento contrário ao que seria de esperar, ou seja, os provetes que têm maior grau de degradação são os que têm maior módulo de elasticidade.

Observando os gráficos f_c (MPa) versus ϵ (%) apresentados anteriormente verificamos que, em cada viga, os valores de módulo de elasticidade são sensivelmente iguais. O módulo de elasticidade é constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação elástica. Esta está diretamente relacionada com as ligações químicas dentro das cadeias poliméricas. A extensão de degradação apresentado pelos provetes não será, portanto, uma variável que afete o valor do módulo de elasticidade significativamente.

Os módulos de elasticidade obtidos para estes provetes de madeira são bastante inferiores aos valores médios que constam na norma EN 338 o que pode também dever-se à idade da madeira e a consequente perda de capacidade mecânica. Na norma EN 338 os valores médios do módulo de elasticidade paralelo às fibras de madeira de resinosas varia entre 7 a 16 KN/mm^2 enquanto que para folhosas este varia entre 10 a 20 KN/mm^2 .

No estudo realizado por Sofia Ramos, também referido anteriormente, foi feita a correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica. Neste caso a correlação obtida foi fraca, apenas 13%. O gráfico seguinte mostra os resultados do referido estudo.

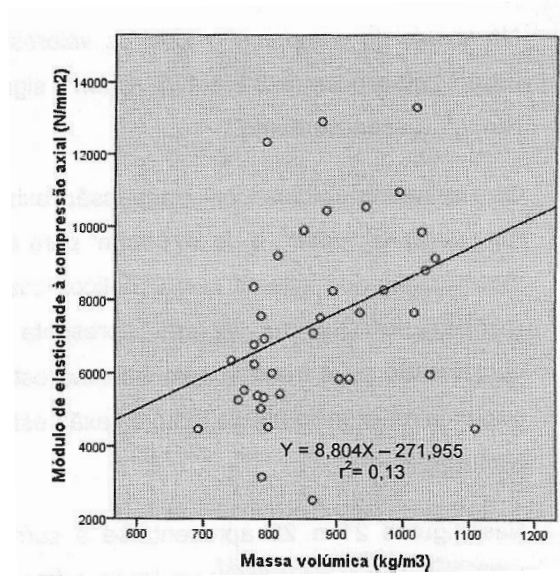


Figura 5.44 - Gráfico com correlação entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica (Ramos, 2009)

6.

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível o conhecimento genérico do comportamento da madeira e sua funcionalidade nos edifícios antigos, assim como o conhecimento de várias formas de degradação da madeira em especial da degradação por caruncho.

Os ensaios laboratoriais realizados mostram que não há correlação de resultados mas que muitos deles permitem detetar um determinado comportamento.

Numa primeira fase determinou-se o grau de degradação dos provetes de madeira através do ensaio de saturação. Considera-se este ensaio um bom método de determinação do grau de degradação da madeira pois ao compararmos estes resultados com a massa volúmica observamos que o grau de correlação em praticamente todas as vigas é elevado.

No ensaio de saturação os provetes de madeira de pinho tiveram um comportamento linear. Cinco das sete vigas mostram que para os provetes que têm menor massa volúmica apresentam maior percentagem de saturação como era de esperar. Para duas vigas este comportamento não se verifica havendo grande variação de resultados que se pode explicar pela constituição do provete, presença de serrim no seu interior e o facto de se tratar de madeira antiga já utilizada em edifícios.

Com a realização do ensaio de compressão foram avaliados alguns parâmetros como a tensão de rotura, a extensão e o módulo de elasticidade. Também aqui não existe correlação de resultados. Mais uma vez para cinco das sete vigas verifica-se que quanto maior o grau de degradação, menor massa volúmica, menor o valor da tensão de rotura. Para uma das vigas o comportamento verificado é contrário ao anterior. Para outra viga não existe um comportamento padrão sendo os resultados muito variáveis.

Outra verificação feita neste ensaio é que apesar de alguns provetes se encontrarem bastante degradados a variação da tensão de rotura não era significativa em relação aos menos degradados, mantendo-se os valores de tensão de rotura num patamar de valores muito próximos (entre cerca de 30 e de 40 MPa). Este facto pode dever-se às ligações entre fibras da madeira não terem sido grandemente afetadas pela degradação do caruncho, e assim a madeira continua a suportar praticamente a mesma carga que um provete são. Esta observação é muito importante, dando-nos orientação de que, em muitos casos, se poderão deixar ficar nos edifícios alguns elementos, ainda que degradados, em vez de se proceder à sua substituição exaustiva.

Relativamente à extensão plástica verificada em cada provete com o ensaio de compressão, depois de atingindo o valor máximo de tensão de rotura para todas as vigas, à exceção da viga L, verifica-se que quanto maior o grau de degradação (menor massa volúmica) menor o patamar de extensão apresentado.

Para o módulo de elasticidade a correlação de valores também é fraca mas quase todas as vigas, à exceção da viga duas, apresentam maior módulo de elasticidade para os provetes que têm menor grau de degradação (maior massa volúmica). Os módulos de elasticidade obtidos dos vários provetes ensaiados são bastante inferiores aos obtidos com madeira nova levando à conclusão que com o passar do tempo a madeira perde alguma rigidez e flexibilidade.

Na sequência do trabalho experimental desenvolvido nesta dissertação, surgiram algumas linhas de investigação com interesse evidente e que são as seguintes:

- Aprofundamento desta linha de trabalho, com maior número de provetes e com situações mais representativas de madeira sã e degradada por caruncho para comparação de resultados;
- Desenvolvimento de outras formas de avaliação do estado de degradação da madeira como vibrações induzidas para relacionar com a resistência mecânica e outras características da madeira que tenha sido atacadas por caruncho;

Bibliografia

- ANASTÁCIO, R.; 2010 - Especificação de Proteção Fogo para Estruturas de Madeira. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil, FEUP, Porto;
- APPLETON, J.; 2001 - Reabilitação de Edifícios Gaioleiros – Um Quarteirão em Lisboa, Lisboa: Edições Orion;
- APPLETON, J.; 2011 - Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de Intervenção, Lisboa: Edições Orion;
- BASTOS, J. M.,; 2011 - Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e Reforço. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro;
- BERRY, R. W.; 1994 – Remedial Treatment of Wood Rot and Insect attack in Buildings. Building Research Establishment. Garston/Watford;
- CARVALHO, A.; 1996 - Madeiras Portuguesas, Estrutura Anatómica, Propriedades e Utilizações Vol.1, Instituto Florestal, Lisboa;
- CARVALHO, A.; 2009 - Isotérmica de Sorção da Madeira de Pinho Marítimo (Pinus Pinaster Ait.). Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real;
- COIAS, V.; 2007 - Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos, Lisboa: Edições Argumentm/Geocorpa;
- COSTA, A.; 2008 - Reparação e Reforço das Construções, Capítulo 11 – Sismos e Edifícios, Lisboa: Edições Orion;
- CRUZ, H.; 2000 - Patologia e Reabilitação de Estruturas de Madeira, Lisboa: LNEC;
- CRUZ, H.; 2001 - Patologias, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira, Santarém: LNEC;
- CRUZ, H.; MACHADO, J. S.; NUNES, L.; 1999 - Inspeção e Avaliação de Estruturas de Madeira. Seminário Estruturas de madeira: reabilitação e inovação. Organização GECORPA, Lisboa;

- CRUZ, H.; MACHADO, J. M.; 2013 - Effect of Beetle Attack on the Bending and Compression Strength Properties of Pine Wood, SHATIS 13. Em: *Structural Health Assessment of Timber Structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland;
- EN 335-2; 2006 - Durability of Wood-Based Products – Definition of Use Classes – Parte 2: Application to Solid Wood;
- EN 338; 2003 - Structural Timber – Strength Classes;
- GILFILLAN, J.R.; 2000 - Development of a technique to measure the residual strength of woodworm infested timber;
- HENRIQUES, D. F.; 2011 - Tratamento e Consolidação de Madeira de Pinho Degradada em Elementos de Edifícios Antigos. Dissertação para a obtenção do grau de doutor em Engenharia civil, IST-UTL, Lisboa;
- HENRIQUES, D. F.; 2005 - Madeira e seus Derivados, Folhas de apoio à disciplina de materiais de construção II. ISEL;
- HÖLL, W.; FROMMBERGER, M.; STRABL, C.; 2002 - Soluble Carbohydrates in the Nutrition, *Hylotrupes bajulus* (L.) (Col., Cerambycidae): from living Sapwood to faeces, Berlin;
- ISO 3787:1976. Wood – Test methods – Determination of stress in compression parallel to grain;
- JÚNIOR, J. B.; 2006 - Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, FEUP, Porto;
- KLOCK, U.; 2013 – Química da Madeira. Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal do Paraná;

- LNEC; 1967 – *Informação sobre deterioração de materiais: Carunchos – Hylotrupes bajulos L.*, Série: Documentação De Materiais e Elementos de Construção, LNEC, Lisboa;
- LNEC; 1967 – *Informação sobre a deterioração de materiais: Carunchos – Anobium punctatum*, Série: Documentação De Materiais e Elementos de Construção, LNEC, Lisboa;
- LNEC; 1997 - *Ficha M1: Especificação de madeira para estruturas*. Série: Madeira para a construção, LNEC, Lisboa;
- LNEC; 1997 - *Ficha M4: Casquinha*. Série: Madeira para a construção, LNEC, Lisboa;
- LNEC; 1997 - *Ficha M9: Humidade da madeira*. Série: Madeira para a construção, LNEC, Lisboa;
- LOPES, M.; 2010 - *Construção Pombalina: Património Histórico e Estrutura Sismo-Resistente*: Edição ICIST;
- MACHADO, J. S.; 2009 - *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira*, Lisboa: Edições Verlag Dashofer;
- MIRANDA, F.; 2011 - *Caracterização dos Edifícios Pombalinos da Baixa de Lisboa*; Lisboa; Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, FCT, Lisboa;
- NEGRÃO, J.; AMORIM, F.; 2009 - *Projeto de Estruturas de Madeira*, Porto: Edições Publindustria;
- NP – 614; 1973 - *Determinação do Teor de Água em Madeiras*;
- NP – 616; 1973 - *Determinação da Massa Volúmica em Madeiras*;
- NP 350-2; 2001 - *Durabilidade da Madeira e de Produtos Derivados; Durabilidade Natural da Madeira Maciça; Parte 2: Guia da Durabilidade Natural da Madeira Seleccionadas pela sua Importância na Europa*;

- NP EN 350-1; 2001 - Durabilidade da Madeira e de Produtos Derivados; Durabilidade Natural da Madeira Maciça; Parte 1: Guia dos Princípios de Ensaio e Classificação da Durabilidade Natural da Madeira;
- NUNES, L.; NOBRE, T.; MACHADO, J. S.; 2000 - Degradação e Reabilitação de Estruturas de Madeira. Importância da Ação das térmitas subterrâneas. REPAR 2000: Encontro Nacional sobre conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, LNEC;
- PEREIRA, S. S. C.; 2009 - Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, FEUP, Porto;
- RAMOS, L.; 2000 - Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do Estado de Conservação Estrutural do Quarteirão do Martinho da Arcada, Universidade do Minho, Guimarães;
- RAMOS, S.; 2009 - Caracterização das Propriedades Mecânicas e Durabilidade Biológica da Madeira de *Quercus faginea*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia florestal e recursos naturais, IST, Lisboa;
- RAMOS, A.; 2010 - Avaliação do Comportamento Mecânico da Madeira Antiga. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil, FEUP, Porto;
- SILVA, M.; 2010 - Apontamentos de Tecnologia dos Produtos Florestais (Composição Química da Madeira), UTAD;
- TEIXEIRA, M. J.; 2010 - Reabilitação de Edifícios Pombalinos em Lisboa. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, IST, Lisboa.

Anexos