



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



## **Avaliação, Tratamento e Consolidação de Madeira em Edifícios Antigos**

**ANDRÉ EMANUEL PAULOS SANTIAGO DAS NEVES**

Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais: Doutor José Maria Santos Rodrigues Saporiti Machado

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

**Dezembro de 2013**





INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

## **Avaliação, Tratamento e Consolidação de Madeira em Edifícios Antigos**

ANDRÉ EMANUEL PAULOS SANTIAGO DAS NEVES

Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos (ISEL)

Vogais: Doutor José Maria Santos Rodrigues Saporiti Machado (LNEC)

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques (ISEL)

A tese foi elaborada com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto  
“CONSERV-TIMBER – *Novo método de conservação de madeira em edifícios antigos*” – ref.<sup>a</sup>  
EXPL/ECM-COM/0664/2012.

Foi desenvolvida no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, sendo estas, respetivamente, instituição proponente e instituição participante no projeto referido.

**Dezembro de 2013**



À minha família e amigos,  
em especial à minha mãe, a  
grande Senhora a quem devo  
tudo aquilo que sou...



## Resumo

Reabilitar é sem dúvida, na atualidade, a área mais próspera dentro da engenharia civil portuguesa, sendo a zona de Lisboa uma das que mais cuidado carece, quer pelo estado de degradação do seu edificado, quer pela necessidade de preservar a herança cultural da cidade. É nesta área de intervenção que se situa o presente trabalho, desenvolvido para as espécies de madeira mais correntemente encontradas nos edifícios antigos da zona de Lisboa: Pinho bravo e Casquinha.

Apresenta-se nesta tese um estudo de correlações entre resultados de ensaios não destrutivos de aplicação *in situ* (com *Resistograph*® e *Pilodyn*®) e diversas propriedades físico-mecânicas como a massa volúmica, resistência à compressão e dureza superficial da madeira sã e também da madeira degradada por fungos de podridão. Para tal, realizou-se uma campanha laboratorial com vários ensaios destrutivos e não destrutivos, donde resultaram, em geral, correlações aceitáveis. Pretendeu-se assim contribuir para o aumento da compreensão da informação obtida através de ensaios não destrutivos.

A par deste primeiro objetivo, apresenta-se e testa-se um método de tratamento e consolidação para a madeira de edifícios mediantemente degradada por fungos que, não se encontrando sã, ainda possui capacidade resistente, não necessitando por isso de ser removida. Expõe-se um caso de estudo de um edifício nobre, datado de 1877, localizado no centro de Lisboa, onde se aplica a técnica estudada e avalia a sua eficácia através dos equipamentos *Resistograph*® e *Pilodyn*®, utilizados antes e após o tratamento e consolidação. Foram também ensaiados provetes em laboratório, através de ensaios destrutivos e não destrutivos, a fim de sustentar os resultados obtidos *in situ*. Concluiu-se a eficácia do método proposto.

Numa terceira etapa, com base no resultado dos ensaios realizados no edifício e nas tendências de correlação encontradas em laboratório, estimam-se as propriedades físico-mecânicas dos elementos estudados, a fim de demonstrar a utilidade que as correlações podem apresentar no âmbito da inspeção e diagnóstico de estruturas de madeira de edifícios antigos.

**Palavras-chave:** Reabilitação; Madeira; Edifícios antigos; Degradação por fungos; Ensaios não destrutivos; Correlações de propriedades; Tratamento e Consolidação.



## Abstract

Nowadays, rehabilitation is undoubtedly the most prosperous area of Portuguese civil engineering, being Lisbon one of the areas that requires the most maintenance, either for the degradation of the city or the need of preserving its cultural heritage. It is in this exact same area that this work focuses on, developed for the wood that can be found in the older buildings of Lisbon: Maritime Pine, Scots pine and Redwood.

It is presented in this thesis a study of correlations between results of non-destructive tests of application *in situ* (with *Resistograph*® and *Pilodyn*®) and several physical and mechanical properties such as density, compressive strength, surface hardness of the sound wood and the degraded wood by fungi of rotteness. In order to that, a laboratorial campaign was conducted with several destructive and non-destructive tests, which, overall, resulted in reasonable correlations. Therefore, it was intended to contribute to increase of information provided by non-destructive tests.

Alongside this first goal, is presented and tested a method of treatment and consolidation for the wood of buildings, moderately degraded by fungi, that despite not being sound, is still resistant, therefore, it does not need to be removed. It is stated a case of a study of a noble building, dated 1877, located in the heart of Lisbon, where the studied technique is applied and it evaluates the efficiency through the *Resistograph*® and *Pilodyn*® equipments, used before and after the treatment and consolidation. Specimens were also tested in laboratory, through destructive and non-destructive tests, in order to verify the results obtained *in situ*. It was concluded the effectiveness of the proposed method.

In a third step, based on the results from the tests that were conducted on the building and the trend lines of the established correlations, the physical-mechanical properties of the studied elements are estimated, in order to show the way that is intended to follow within the inspection and diagnosis of the wooden structures of old buildings.

**Key words:** Rehabilitation; Wood; Old Buildings; Degradation by Fungi; Non-Destructive Tests; Properties Correlations; Treatment and Consolidation.



## Agradecimentos

Pretendo deixar por escrito o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que me incentivaram, acompanharam e fizeram acreditar no trabalho que hoje apresento.

Desta forma, começo por agradecer à minha família e amigos pelo apoio e suporte que sempre me forneceram, fazendo-me ver que é sempre possível fazer mais e melhor, que devemos lutar por aquilo em que acreditamos e nunca desistir.

Agradeço igualmente à minha orientadora, a Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques, o grande pilar de todo o trabalho desenvolvido, que puxando por mim sempre que necessário, procurou dar-me asas para voar como engenheiro recém formado.

Da Área Departamental de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ADEC – ISEL), o meu agradecimento ao Professor Manuel Brazão Farinha pelo auxílio na inspeção e diagnóstico do edifício intervencionado na presente tese. Do Laboratório de Materiais de Construção do instituto (LMC-ISEL), agradeço aos técnicos António Fernandes e Raquel Milho pelo apoio e disponibilidade prestada durante todas as fases deste trabalho.

Da mesma forma agradeço à Doutora Helena Cruz, ao Doutor José Saporiti Machado e à Doutora Lina Nunes por me terem acolhido no Núcleo de Estruturas de Madeira do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NEM-LNEC) e por amavelmente me terem prestado auxílio sempre que necessitei. Agradeço igualmente ao Técnico Paulo Frazão e ao Engenheiro António Silva pela disponibilidade demonstrada no decorrer dos diversos trabalhos laboratoriais realizados nesta instituição, revelando-se uma ajuda incansável.

Agradeço, por fim, às seguintes entidades:

- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, por me ter disponibilizado um local de trabalho, assim como possibilitado a realização de algumas etapas deste estudo nas suas instalações;
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por me ter permitido o uso total de equipamentos e instalações;
- Eastbanc, empresa proprietária do Palacete Ribeiro da Cunha, por me ter permitido desenvolver ensaios nesse mesmo edifício;
- Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro prestado no âmbito do projeto “CONSERV-TIMBER – *Novo método de conservação de madeira em edifícios antigos*” – ref.<sup>a</sup> EXPL/ECM-COM/0664/2012.



# Índice de Texto

<b>1</b>	<b>Enquadramento e justificação do tema</b> .....	<b>1</b>
1.1	Estrutura da tese .....	3
<b>2</b>	<b>A madeira como material da construção</b> .....	<b>5</b>
2.1	Estrutura anatómica da madeira .....	5
2.1.1	Composição química .....	6
2.1.2	Defeitos .....	7
2.2	Características físicas .....	8
2.2.1	Teor em água e higroscopicidade .....	8
2.2.2	Massa volúmica .....	10
2.2.3	Retractilidade .....	11
2.2.4	Reação e resistência ao fogo .....	11
2.2.5	Dureza .....	12
2.3	Características mecânicas .....	12
2.3.1	Resistência à tração .....	13
2.3.2	Resistência à compressão .....	13
2.3.3	Resistência à flexão estática .....	14
2.3.4	Resistência ao corte ou escorregamento .....	14
2.3.5	Módulo de elasticidade .....	14
2.3.6	Pinho bravo, <i>Pinus pinaster Ait.</i> e Casquinha, <i>Pinus sylvestris L.</i> .....	15
2.4	Fatores que influenciam as propriedades físicas e mecânicas .....	15
2.4.1	Classes de qualidade .....	17
2.4.2	Classes de resistência .....	17
2.4.3	Normas de ensaio .....	18
<b>3</b>	<b>Construção Pombalina e Gaioleira em Lisboa</b> .....	<b>19</b>
3.1	Introdução .....	19
3.2	Características genéricas das épocas construtivas .....	20
3.2.1	Edifícios de alvenaria da época Pombalina e similares (1755 – 1870) .....	20
3.2.2	Edifícios de alvenaria de tijolo do tipo Gaioleiro (1880 – 1930) .....	21
3.3	Madeira em edifícios antigos .....	22
3.3.1	Fundações .....	22
3.3.2	Paredes .....	22
3.3.3	Pavimentos .....	25

3.3.4	Cobertura.....	26
3.3.5	Escadas.....	27
<b>4</b>	<b>Degradação por agentes biológicos.....</b>	<b>29</b>
4.1	Introdução.....	29
4.2	Fungos.....	30
4.2.1	Fungos de ação cromogénea.....	31
4.2.2	Fungos de podridão.....	31
4.2.3	Patologias em edifícios.....	32
4.3	Térmitas.....	33
4.3.1	Patologias em edifícios.....	34
4.4	Carunchos.....	35
4.4.1	Patologias em edifícios.....	36
4.5	Durabilidade natural.....	37
4.5.1	Classes de risco da madeira em edifícios.....	39
<b>5</b>	<b>Técnicas de inspeção e diagnóstico, tratamento e consolidação.....</b>	<b>41</b>
5.1	Introdução.....	41
5.2	Metodologia a seguir.....	42
5.2.1	Inspeção visual.....	42
5.2.2	Meios auxiliares de diagnóstico.....	43
5.2.3	Tratamento de dados e decisão.....	46
5.3	Tratamento preservador.....	47
5.3.1	Bora-Care.....	48
5.4	Consolidantes.....	49
5.4.1	Produtos Poliméricos.....	49
5.4.2	Consolidante EPO155.....	51
5.5	Compatibilidade do Bora-Care e EPO155.....	52
<b>6</b>	<b>Verificação das propriedades da madeira por ensaios laboratoriais.....</b>	<b>55</b>
6.1	Introdução.....	55
6.2	Material e métodos.....	56
6.2.1	Provetes.....	56
6.2.2	Ensaio não destrutivo.....	58
6.2.3	Ensaio destrutivo.....	60
6.2.4	Degradação em meio natural.....	62
6.2.5	Tratamento e consolidação.....	65
6.3	Análise de resultados e discussão.....	66

6.3.1	Correlações com a massa volúmica, $\rho$ .....	67
6.3.2	Correlações com a resistência à compressão, $f_{c,o}$ .....	71
6.3.3	Correlações com a resistência à indentação, $H_{c,12\%}$ .....	73
6.3.4	Correlação entre medida resistográfica, MR, e profundidade com o <i>Pilodyn</i> ®..	75
6.3.5	Correlações com a perda de massa.....	75
6.3.6	Avaliação do método de tratamento e consolidação .....	78
6.4	Conclusão do capítulo .....	81
<b>7</b>	<b>Caso de estudo: Palacete Ribeiro da Cunha .....</b>	<b>83</b>
7.1	Introdução .....	83
7.2	Apresentação do edifício .....	84
7.3	Pontos de ensaio .....	86
7.3.1	Costaneira.....	87
7.3.2	Escadas .....	88
7.3.3	Vigas do pavimento.....	88
7.4	Tratamento e consolidação.....	89
7.5	Ensaaios não destrutivos .....	90
7.6	Análise de resultados e discussão.....	90
7.6.1	Costaneira.....	91
7.6.2	Escadas .....	92
7.6.3	Vigas do Pavimento .....	93
7.6.4	Efeito da consolidação .....	93
7.6.5	Estimar propriedades físico-mecânicas <i>in situ</i> .....	96
7.7	Conclusões do capítulo.....	97
<b>8</b>	<b>Considerações finais e áreas de desenvolvimento futuro.....</b>	<b>99</b>
8.1	Considerações finais.....	99
8.2	Áreas de desenvolvimento futuro.....	100
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>103</b>
	<b>Referências normativas.....</b>	<b>111</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>113</b>



## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Organigrama de trabalho	3
Figura 2.1 – Estrutura microscópica de a) Resinosa; b) Folhosa (Machado, 2007)	5
Figura 2.2 - Distinção Medula / Cerne / Borne	6
Figura 2.3 - Exemplo da composição química da madeira	7
Figura 2.4 - Tipos de nós possíveis devido à inserção de um ramo: A – nó vivo; B- nó morto; C- Galho ou rajo; D- Medula; E- Cerne; F-Borne; G- Casca. Secções tangenciais: 1 e 2 – nó aderente; 3 – nó soltadiço. Adaptado de Carvalho, 1996	8
Figura 2.5 - Teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo em função das condições higrotérmicas ambientais. Adaptado de Cruz & Rodrigues, 2000	9
Figura 2.6 – Higrómetro de superfície. a) Aplicação <i>in situ</i> ; b) Aplicação em laboratório	10
Figura 2.7 - Coeficientes médios de retração, em termos relativos, referentes ao Pinho bravo. Adaptado de Carvalho, 1996	11
Figura 2.8 - Diagrama representativo da diferença da resistência da madeira em função do tipo de solicitação. Adaptado de Carvalho,1996	12
Figura 2.9 – a) Aproximação das fibras devido ao esforço de tração paralelo às fibras; b) Afastamento das fibras devido ao esforço de tração perpendicular às fibras	13
Figura 2.10 – a) Afastamento das fibras devido ao esforço de compressão paralelo às fibras; b) Aproximação das fibras devido ao esforço de compressão perpendicular às fibras	13
Figura 2.11 – Efeitos do teor em água nas características mecânicas. Adaptado de Henriques, 2011, traduzido de Green <i>et al.</i> , 1999	16
Figura 2.12 - Incidência de defeitos na resistência da madeira à compressão axial. Adaptado de Carvalho,1996	16
Figura 3.1 - - Edifício Pombalino: A -Paredes meãs; B - Paredes de alvenaria de pedra; C - Estacaria de madeira; D - Arcos de reforço de fundação; E - Abóbadas; F- Escadas em patamar intermédio; G - Escadas junto à fachada; H - água-furtada. Adaptado de Farinha, 2012.	20
Figura 3.2 - a) Esquema de uma parede de frontal (Andrade, 2011); b) Estrutura de madeira de uma parede de frontal reconstruída num edifício na Calçada do Sacramento, Lisboa	23
Figura 3.3 - a) Esquema de uma parede de tabique (Andrade,2011); b) Parede de tabique; c) Ligação parede de tabique - frontal	24
Figura 3.4 - a) Pavimento assente em estrutura de madeira; b) Pavimento assente em arco preenchido com entulho; (Appleton, 2011).	25
Figura 3.5 - Esquema de um pavimento de madeira (Andrade, 2011)	26

Figura 3.6 - a) Complexidade de cobertura em edifício nobre, Palacete Ribeiro da Cunha. (Príncipe Real, 1877); b) Ligação à parede. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877); c) Asna simples ( <a href="http://www.ingenhariacivil.com">http://www.ingenhariacivil.com</a> )	27
Figura 3.7 - a) Esquema de uma escada apoiada em frontal pombalino. Adaptado de Andrade, 2011, traduzido de Pena,2008; b) Escada em frontal pombalino. Adaptado de Andrade, 2011, traduzido de Silva, 2007	28
Figura 4.1 – a) Colónia de fungos num armário do piso térreo; b) Colónia de fungos num armário do primeiro piso. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)	30
Figura 4.2 - a) Podridão cúbica em frontal pombalino; b) Podridão cúbica em vigas de pavimento, por rotura de canalizações. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)	33
Figura 4.3 - a); b); c) Degradação por térmitas em estrutura da cobertura do Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)	34
Figura 4.4 - Ciclo de vida do caruncho. (Henriques, 2011, adaptado de Berry,1994)	35
Figura 4.5 - a) Ataque de caruncho restrito ao borne da peça; b) Remoção da película superficial por objeto cortante e deteção de galerias preenchidas por serrim. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)	37
Figura 5.1 - Procura de anomalias no exterior. Adaptado de Cruz <i>et al</i> , 1999	42
Figura 5.2 - Exemplo do tratamento de um perfil de densidade	44
Figura 5.3 - <i>Resistograph</i> ® IML- Resi-B-1280	44
Figura 5.4 - <i>Pilodyn</i> ® 6J	45
Figura 5.5 - Funcionamento de ultra-sons (Feio & Lourenço, 2005)	45
Figura 5.6 - Classificação dos polímeros. Adaptado de Anon., 2008	50
Figura 6.1 - a) Elementos originais; b) Após o corte; c) Após identificação; d) Colocação em sala acondicionada	57
Figura 6.2 - a) Provetes na estufa; b) Temperatura; c) Balança digital; d) Exsicadores; d) Higrómetro	58
Figura 6.3 - a) Realização do ensaio; b) Unidade móvel do <i>Resistograph</i> ®	58
Figura 6.4 - Tratamento de perfis resistográficos de provetes degradados	59
Figura 6.5 - a) Realização do ensaio; b) Escala de leitura; c) Posicionamento do <i>Pilodyn</i> ®	59
Figura 6.6- Máquina de ensaio universal AMSLER; b) Escala de medição; c) Esfera de ensaio; d) Realização do ensaio; e) Após o ensaio	60
Figura 6.7 - a) Máquina de ensaio <i>Schimatzu</i> ; b) Realização do ensaio; c) Após o ensaio	61
Figura 6.8 - Gráfico resultante do ensaio de compressão ( <i>Trapezium2</i> ®)	61

Figura 6.9- a) Componentes da mistura; b) Realização da mistura de solo; c) Imersão dos provetes em água; d) Colocação dos provetes nas caixas de degradação; e) Vista lateral da caixa de degradação	64
Figura 6.10 - a) Proвете após degradação; b) Grupo de provetes degradados; c) Presença de ramificações de fungos em provete degradado	65
Figura 6.11 - a) Bora-Care; b) Resina (EPO155) mais endurecedor (K156); c) Preparação da mistura; d) Mistura	66
Figura 6.12 – Gráfico Resistência à compressão Vs. Massa volúmica	68
Figura 6.13 - Gráfico Resistência à indentação Vs. Massa volúmica	68
Figura 6.14 - Gráfico MR Vs. Massa volúmica	69
Figura 6.15 - Gráfico Profundidade <i>Pilodyn</i> ® Vs. Massa volúmica	70
Figura 6.16 - Gráfico Resistência à indentação Vs. Resistência à compressão	72
Figura 6.17 - Gráfico MR Vs. Resistência à compressão	72
Figura 6.18 - Gráfico Profundidade <i>Pilodyn</i> ® Vs. Resistência à compressão	73
Figura 6.19 – Gráfico MR Vs. Resistência à indentação	74
Figura 6.20 – Gráfico Profundidade <i>Pilodyn</i> ® Vs. Resistência à indentação	74
Figura 6.21 - Gráfico Profundidade <i>Pilodyn</i> ® Vs. MR	75
Figura 6.22 - Gráfico Resistência à compressão Vs. <i>p.m.</i>	76
Figura 6.23 - Gráfico Resistência à indentação Vs. <i>p.m.</i>	77
Figura 6.24- Gráfico MR Vs. <i>p.m.</i>	77
Figura 6.25 - Gráfico Profundidade <i>Pilodyn</i> ® Vs. <i>p.m.</i>	78
Figura 6.26 - Gráfico dos valores registados para a resistência à compressão, antes e após o tratamento e consolidação	79
Figura 6.27 - Gráfico dos valores registados para a resistência à indentação, antes e após o tratamento e consolidação	79
Figura 6.28 - Gráfico dos valores registados para a medida resistográfica, antes e após o tratamento e consolidação	80
Figura 6.29 - Gráfico dos valores registados para a Profundidade com <i>Pilodyn</i> ®, antes e após o tratamento e consolidação	80
Figura 7.1 - a) Localização do Palacete; b) Fachada do Palacete Ribeiro da Cunha	84
Figura 7.2 - a) Escadaria principal; b) Estuque de valor patrimonial; c) Elevador; d) Iluminação natural do átrio; e) Átrio central	85

Figura 7.3 - a) Utilização da faca na inspeção visual; b) Podridão cúbica; c) Degradação por caruncho; d) Fungos de podridão; e) Degradação por térmitas; f) Podridão na viga da cobertura	86
Figura 7.4 - a) Costaneira; b) Escadas; c) Vigas do pavimento	87
Figura 7.5 - a) Origem da degradação (canalização); b) Zona B (mais degradada); c) Zona A, B e C	87
Figura 7.6 - a) Zona A, B e C; b) Zona B, mais degradada	88
Figura 7.7 - a) Origem do problema (caleira); b) Identificação da degradação; c) Zona A e B	89
Figura 7.8 - Aplicação do consolidante a) Costaneira; b) Escadas; c) Vigas do pavimento	89
Figura 7.9 - a) Higrómetro de superfície; b) <i>Pilodyn</i> ®; c) <i>Resistograph</i> ®	90
Figura 7.10 – Exemplo de um perfil resistográfico e da extensão considerada para avaliar o efeito do consolidante	91
Figura 7.11 - Posição das vigas A, B e C	93
Figura 7.12 – Análise de perfis resistográficos comparáveis com verificação do ganho de resistência	94
Figura 7.13 – Gráficos dos valores registados pelo <i>Resistograph</i> ® antes e após o tratamento e consolidação	95
Figura 7.14 – Gráficos dos valores registados pelo <i>Pilodyn</i> ® antes e após o tratamento e consolidação	95

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores médios das características físico-mecânicas das madeiras em estudo (Henriques,2011, citando, Tsoumis 1991) .....	15
Tabela 4.1 - Características do ataque de carunchos. Adaptado de Cruz & Nunes, 2005.....	36
Tabela 4.2 - Resumo das classes de risco (Cruz & Nunes, 2005).....	40
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios laboratoriais do par de produtos (Henriques, 2011) .....	52
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios <i>in situ</i> do par de produtos (Henriques, 2011) .....	53
Tabela 6.1 – Composição da mistura de terra utilizada .....	63
Tabela 6.2 - Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência.....	71
Tabela 7.1 - Quadro resumo dos ensaios na costaneira.....	92
Tabela 7.2 - Quadro resumo dos ensaios nas escadas .....	92
Tabela 7.3 - Quadro resumo dos ensaios nas vigas do pavimento .....	93
Tabela 7.4 - Estimativa das características em função da medida resistográfica .....	96
Tabela 7.5 - Estimativa das características em função da profundidade com <i>Pilodyn</i> ®.....	97



## Simbologia e Acrónimos

- b e h - Dimensões da secção do provete, em mm;
- BC - Produto de tratamento Bora-Care;
- CEN – Comité Européen de Normalisation;
- DOT - Octaborato Dissódico Tetra-hidratado;
- E - Consolidante EPO155;
- $f_{c,0}$  - Tensão de rotura paralela às fibras, em N/mm<sup>2</sup>, para o ensaio de compressão;
- $F_{máx}$  - Força máxima de rotura, em N;
- $H(\%)$  - Teor de água da madeira;
- $H_{c,12\%}$  - Força de rotura em N, a 12% de teor em água, para o ensaio de dureza estática;
- IPQ - Instituto Português da Qualidade;
- ISA - Instituto Superior de Agronomia;
- ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa;
- IST - Instituto Superior Técnico;
- K - Coeficiente que é tomado igual a 1 ou a 4/3, consoante a profundidade de embebição da esfera seja 5,64mm ou 2,82mm, respetivamente;
- $K_l$  - Fator de correção da resistência à compressão;
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa;
- LOSP - Light Organic Solvent Preservative;
- MGE - Métodos Globais de ensaio;
- $m_H$  - Massa a  $H(\%)$  de teor em água;
- MLE - Métodos locais de ensaio;
- MR - Medida resistográfica;
- PSF - Ponto de Saturação das Fibras;
- $R^2$  - Coeficiente de determinação;
- RDS - Radiological Density Scanning;
- $R_r$  - Variação dimensional na direção radial;
- $R_t$  - Variação dimensional na direção tangencial;
- TD - Técnicas destrutivas;
- TND - Técnicas não destrutivas;
- $V_H$  - Volume a  $H(\%)$  de teor em água;
- WHC - Water Holding Capacity;

- $\Delta$  - Deslocamento;
- $\rho_H$  - Massa volúmica a  $H(\%)$  de teor em água.

# 1 Enquadramento e justificação do tema

Numa época em que o sector da construção sofre uma crise profunda, os espaços livres nos grandes centros urbanos são uma realidade cada vez mais longínqua e o património nacional se degrada a cada dia, a reabilitação toma cada vez mais um papel de destaque na engenharia civil nacional.

De facto, só na cidade de Lisboa existem vários exemplos de edifícios antigos, edificados com base em técnicas construtivas características de determinada época, que além de serem um registo vivo da história da cidade, são hoje em dia impossíveis de reproduzir, em grande parte pelo desaparecimento de mão-de-obra especializada, mas também pela qualidade própria dos materiais empregues. Aliada à preservação do património insubstituível, encontra-se a possibilidade de reutilizar estruturas antigas, conseguindo muitas vezes a remodelação de espaços nos centros urbanos e potenciando uma poupança significativa de recursos.

Entre 1755 e 1930 (Oliveira & Cabrita, 1985), a madeira apresentava-se como material estrutural de eleição na construção de edifícios, muitas vezes desde as fundações à cobertura. Como elemento construtivo, é bastante heterógeno e anisotrópico, sendo por vezes difícil fazer uma caracterização adequada das suas propriedades físico-mecânicas. Outro fator a ter em conta é a sua suscetibilidade a agentes biológicos, quando as condições ambientais são propícias à sua atuação. Neste sentido, há elementos centenários que chegam à atualidade em perfeitas condições e outros que se apresentam irreversivelmente degradados. Perante este cenário, facilmente se depreende a necessidade de uma avaliação do estado de conservação de um edifício antigo com estrutura em madeira. Contudo, a sua rigorosa caracterização obrigaria à utilização de técnicas destrutivas (TD), com a recolha de carotes para ensaios laboratoriais. No entanto, essa solução apresenta-se inadmissível na maioria dos casos e o recurso a inspeções visuais e a técnicas não destrutivas (TND) é a opção (Feio & Lourenço, 2005; Valle, *et al.*, 2006; Tannert, *et al.*, 2010).

É neste sentido que vários estudos têm vindo a ser publicados nesta área (Gorlacher, 1987; Machado & Cruz, 1997; Lladró, *et al.*, 2006; Branco, *et al.*, 2010; Henriques, 2011; Machado, 2013), caminhando-se para a obtenção do maior número de informação conseguida por técnicas não destrutivas. Pretende-se assim que, em harmonia com a procura de informação como a idade e a história do edifício, seja possível fazer uma caracterização real do estado de conservação de um elemento, avaliado através de técnicas não destrutivas. Desta forma, espera-se ser possível, pela utilização de equipamentos como o *Resistograph*® e o *Pilodyn*®, estimar *in situ* propriedades como a massa volúmica, resistência à compressão, dureza superficial e também a perda de massa por podridão, através dos resultados obtidos na campanha laboratorial a desenvolver. Na realidade, um dos grandes objetivos deste estudo passa pelo estabelecimento de correlações entre os resultados desses ensaios e ensaios destrutivos realizados em laboratório.

O presente trabalho incide sobre madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*) e Casquinha (*Pinus sylvestris L.*), com idades entre 100 e 200 anos, pela sua representatividade no parque edificado português. Igualmente pela frequência com que se encontram situações de degradação associadas à podridão dos elementos de madeira, e seguindo estudos de Henriques, 2011, pretende-se apresentar e testar uma nova técnica de conservação de elementos de madeira mediamente degradados por fungos. Baseia-se a técnica na aplicação de um preservador líquido, para cessar a atividade do fungo, e posterior consolidação por impregnação dos elementos degradados com uma resina epoxídica de baixa viscosidade, considerando-se o método aplicável para madeiras com perda de massa inferior a 20%. De facto, para esta percentagem de degradação, o Pinho bravo e a Casquinha, as espécies estudadas, apresentam em geral uma resistência à compressão de cerca de 18 N/mm<sup>2</sup> (Henriques, 2011). Uma vez que, este é o valor característico da classe de resistência C18 (resinosas), segundo a EN338:2009 – *Structural Timber. Strength classes*, para madeiras destas espécies utilizadas em estruturas, não se considera adequado aplicar o tratamento estudado a madeiras com degradação superior a 20%, cujos valores de resistência poderão ser inferiores a 18 N/mm<sup>2</sup>.

Para o efeito, será conduzida uma campanha laboratorial e apresentado um caso de estudo de um edifício nobre, datado de 1877, localizado no centro de Lisboa, e com características construtivas do período pombalino (Oliveira & Cabrita, 1985). A avaliação do processo será feita com recurso a ensaios físico-mecânicos não destrutivos realizados *in situ*, e ainda por ensaios laboratoriais, destrutivos e não destrutivos.

Chama-se a atenção para o facto de este estudo apresentar repercussões tanto a nível técnico como económico, pois desenvolve uma solução para a madeira de edifícios que, não se encontrando sã, ainda possui capacidade resistente, não necessitando por isso de ser removida. Mais ainda, permite preservar a herança edificada protegida, conservando o valor histórico, patrimonial ou artístico de elementos de madeira ou outros, como estuques ou frescos, a que a madeira serve de suporte. Este processo é inovador, tanto no panorama nacional como internacional da conservação e reabilitação de edifícios antigos, envolvendo a engenharia civil em metodologias tradicionalmente utilizadas pela área de conservação e restauro de obras de arte, situação que tem sido muito pouco explorada (Henriques, *et al.*, 2013).

Espera-se então, com o desenvolvimento dos trabalhos, promover a alteração de mentalidades no que à reabilitação de edifícios com estrutura em madeira diz respeito, caminhando-se para a permanência das madeiras originais nos edifícios, ainda que apresentem algum grau de degradação. Espera-se ainda contribuir para inspeções visuais futuras cada vez mais precisas e eficazes.

É de referir que todo o trabalho desenvolvido no presente estudo se encontra inserido no projeto de investigação “CONSERV-TIMBER- *Novo método de conservação de madeiras em edifícios*

antigos” (ref.<sup>a</sup> EXPL/ECM-COM/0664/2012), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, o que tornou a sua execução possível.

## 1.1 Estrutura da tese

A tese apresenta-se estruturada em 8 capítulos, começando por se dar a conhecer a madeira como elemento estrutural, pela apresentação das suas propriedades e principais utilizações. De seguida, identificam-se as causas de degradação mais comuns e os meios de identificação do estado de conservação dos elementos em análise. Por último, dá-se a conhecer todo o trabalho experimental realizado, incluindo este uma campanha laboratorial e um caso de estudo num edifício antigo. O capítulo final apresenta as conclusões do trabalho e indica as áreas de desenvolvimento futuro.

Desta forma, a estrutura da tese é a seguinte:

- Enquadramento e justificação do tema;
- A madeira como material da construção;
- Construção Pombalina e Gaioleira em Lisboa;
- Degradação por agentes biológicos;
- Técnicas de inspeção e diagnóstico, tratamento e consolidação;
- Verificação das propriedades da madeira por ensaios laboratoriais;
- Caso de estudo: Palacete Ribeiro da Cunha;
- Considerações finais e áreas de desenvolvimento futuro.

Chama-se a atenção que, para a plena compreensão do trabalho experimental, é essencial a leitura dos capítulos anteriores, que apresentam conceitos utilizados posteriormente nessa etapa.

A inter-relação entre os capítulos apresentados esquematiza-se no organigrama seguinte.

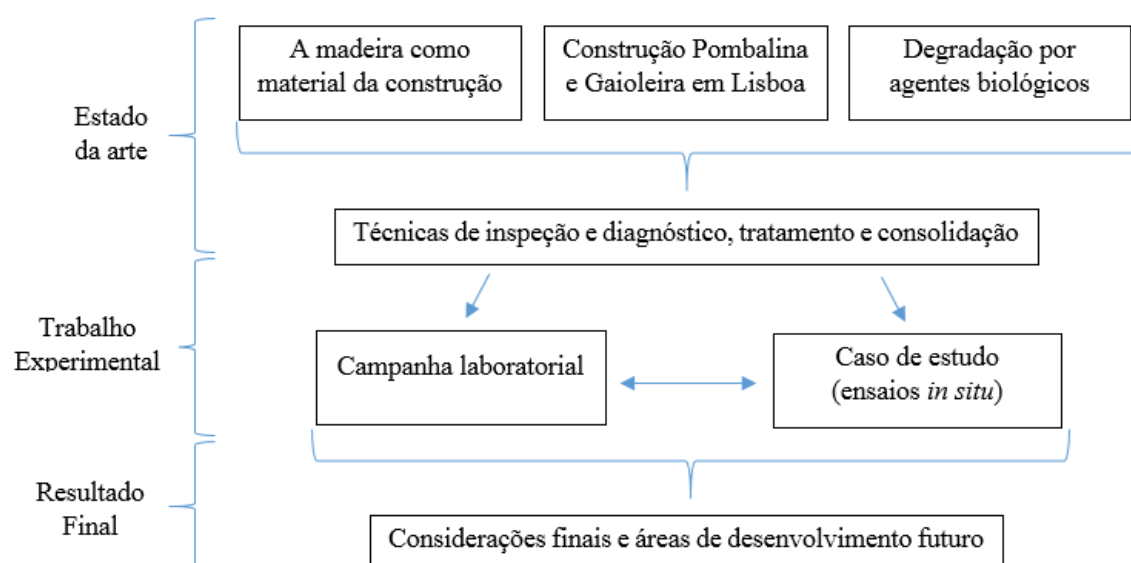


Figura 1.1 - Organigrama de trabalho



## 2 A madeira como material da construção

Pretende-se com este capítulo apresentar a madeira como material de construção, fazendo uma pequena abordagem à sua constituição e diferenciação, dando a conhecer as suas principais características físicas e mecânicas, essenciais para a compreensão de todo o trabalho desenvolvido ao longo da presente tese.

### 2.1 Estrutura anatómica da madeira

A madeira, como ser vivo que é, apresenta-se heterogénea e anisotrópica, quer pela diversidade genética existente, quer pelo meio em que se desenvolve. É no entanto possível identificar dois grandes grupos botânicos: Gimnospérmicas, geralmente denominadas Resinosas, e as Angiospérmicas, denominadas Folhosas. Dentro desta divisão existem subgrupos, sendo que nem todos apresentam características para a correta utilização como material estrutural. Neste sentido, do grupo das gimnospérmicas destacam-se as Coníferas, como é o caso do Pinho bravo e da Casquinha, destacando-se nas Angiospérmicas, as dicotiledóneas, como é exemplo o Carvalho.

A grande distinção entre estes dois grupos reside essencialmente na estrutura anatómica do seu tecido essencial, utilizável industrialmente, o lenho (Carvalho, 1996). As Resinosas apresentam uma estrutura celular simplificada comparativamente às Folhosas, sendo constituídas em 90% por traqueídeos, células alongadas de paredes espessas e em inferior número, por células parenquimatosas, mais pequenas e limitadas a elementos de circulação transversal (radial).

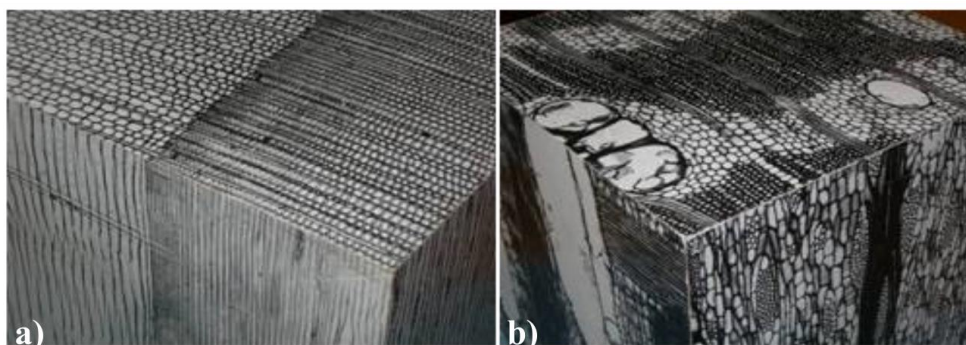


Figura 2.1 – Estrutura microscópica de a) Resinosa; b) Folhosa (Machado, 2007)

Nas Folhosas, a complexidade celular origina células especializadas, desde a circulação, atribuída aos vasos, às funções estruturais, responsabilidade de diversas fibras.

Em ambos os grupos apresentados, as árvores sofrem um desenvolvimento ao longo da sua vida, ficando essa evolução registada através de formações cíclicas do lenho, denominadas camadas de crescimento (Carvalho, 1996). Nesta ordem de ideias, com um corte transversal na secção reta de um tronco, facilmente se identificam os vários períodos de crescimento da árvore. Desde a medula, no centro da secção, resultante da estrutura primária da planta, passando pelas várias

camadas de crescimento, maiores ou menores em função das condições climáticas ocorridas, até à casca, a camada protetora. Nas regiões temperadas, como é o caso de Portugal, as árvores têm ao longo do ciclo de crescimento ritmos diferentes em função da necessidade de água. Forma-se então, na Primavera e início do Verão, o lenho inicial, de coloração clara e células de grande largura e paredes finas, capazes de movimentar grandes quantidades de água e nutrientes. No fim do Verão e Outono, forma-se o lenho final, de coloração mais escura e células de largura menor e paredes mais espessas, normalmente mais denso e por isso de maior resistência mecânica (Henriques, 2011, citando Miller, 1999).

Entre os anéis de crescimento é ainda possível identificar duas zonas distintas, o borne ou albarno, responsável pela atividade fisiológica da árvore, de cor mais clara e delimitado pela casca e o cerne ou durâmen (em algumas espécies), zona mais escura em função de alterações físicas e químicas das células que deixam de conduzir seiva. Estas tornam-se depósitos de produtos residuais, como nutrientes e metabolitos, e ainda de água, a que a planta pode recorrer em períodos críticos ou de *stress* hídrico (Carvalho, 1996).



Figura 2.2 - Distinção Medula / Cerne / Borne

A formação do cerne inicia-se entre os 5 e os 30 anos de vida, consoante a espécie, com início na zona central (Cruz & Nunes, 2005). As células, que são agora tidas como mortas, passam então a ter como principal função o suporte. Em consequência, o cerne apresenta normalmente maior durabilidade e melhor comportamento mecânico do que o borne, sendo também mais resistente aos agentes biológicos, em função de produtos resultantes da transformação borne – cerne.

### 2.1.1 Composição química

Na constituição das células do lenho existem três substâncias químicas principais, poliméricas, a Celulose, a Hemicelulose e a Lenhina.

A Celulose representa cerca de 40 a 50% da massa da madeira, apresentando-se como uma substância esquelética e contribuindo pela sua alta resistência à tração, para o complexo da estrutura lenhosa (Carvalho, 1996). Atrai quimicamente a água, pela presença de pontes de

hidrogénio, sendo assim um material higroscópico, responsável pela mesma característica na madeira (Negrão & Faria, 2009).

A Hemicelulose, que constitui cerca de 20 a 30% do conjunto, é responsável por aglutinar a celulose e garantir a função de união entre as fibras. A Lenhina por sua vez, também com representatividade de 20 a 30% da madeira, além de aglutinar a celulose contribui para a rigidez e resistência da madeira à compressão e ao corte (Negrão & Faria, 2009).

Os restantes constituintes, como é o caso das resinas, taninos, trementinos, ceras, proteínas e pectinas, designados genericamente, na grande maioria, por extractivos (Carvalho, 1996), constituem cerca de 5 a 7% da composição química da madeira e são responsáveis por propriedades não estruturais como a cor, odor, sabor e durabilidade.

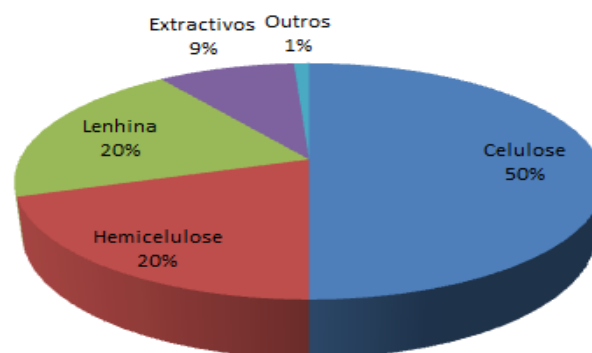


Figura 2.3 - Exemplo da composição química da madeira

### 2.1.2 Defeitos

Segundo Albino Carvalho, 1996, defeito é toda e qualquer irregularidade, descontinuidade ou anomalia estrutural, alteração química ou de coloração, modificação morfológica originada durante a vida da árvore, na exploração e transporte da madeira, na conversão primária, na secagem, na preparação e noutras operações tecnológicas, sempre que qualquer um desses aspetos comprometa o valor intrínseco da madeira. São então exemplo os nós, inclinação do fio, fendas, bolsas de resina, presença de medula, descaio e empenos (Cruz & Nunes, 2005).

Da definição apresentada, facilmente se extrai a vasta origem dos defeitos. A NP-180:1962 – *Anomalias e defeitos na madeira* – subdivide-os da seguinte forma:

- Defeitos produzidos durante a formação do lenho;
- Defeitos produzidos durante a exploração das madeiras;
- Defeitos produzidos durante a secagem;
- Defeitos produzidos durante a conversão e a laboração.

De forma mais ou menos direta é possível controlar o aparecimento de alguns defeitos, contudo, é de extrema dificuldade o controlo daqueles que ocorrem durante a formação do lenho. É o caso

dos nós, porções da base de ramos inseridos no tronco da árvore, de desenvolvimento sensivelmente cônico e irradiando da medula ou próximo dela (Cruz & Nunes, 2005).

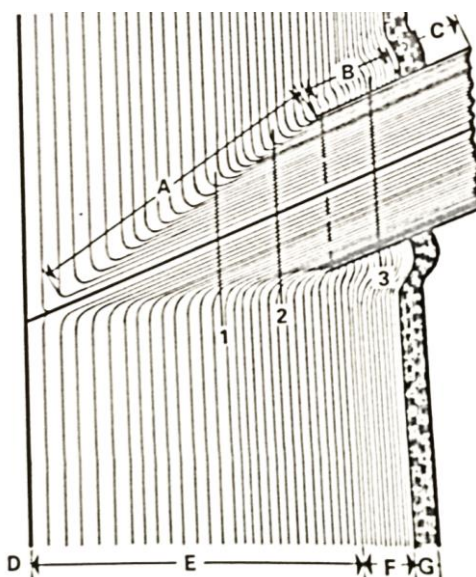


Figura 2.4 - Tipos de nós possíveis devido à inserção de um ramo: A – nó vivo; B- nó morto; C- Galho ou rajo; D- Medula; E- Cerne; F-Borne; G- Casca. Secções tangenciais: 1 e 2 – nó aderente; 3 – nó soltadiço. Adaptado de Carvalho, 1996

É de referir que a existência de defeitos condiciona a utilização da madeira. Por exemplo, uma peça com nós ou fendas de secagem dificilmente poderá cumprir funções estruturais, contudo, a sua utilização decorativa pode ser interessante. Torna-se assim essencial a análise dos defeitos existentes, de acordo com a utilização pretendida.

## 2.2 Características físicas

Como anteriormente referido, a diversidade é uma constante na madeira, tornando-se assim de extrema importância a sua caracterização. Como material estrutural interessa conhecer:

- Teor em água e higroscopicidade;
- Massa volúmica;
- Retractilidade;
- Reação e resistência ao fogo;
- Dureza;

### 2.2.1 Teor em água e higroscopicidade

A água faz parte da biologia da madeira, sendo intrínseca na sua constituição. Pode encontrar-se sob várias formas. Imediatamente após o abate, qualquer árvore exhibe uma grande quantidade de água, apresentando, em função da sua localização diferentes designações: água de constituição, de impregnação ou livre.

A água livre preenche os vazios entre as células, não ocasionando, com o seu movimento, variação de volume do lenho ou alteração da sua resistência mecânica. Após o abate a perda desta água é rápida. A água de impregnação preenche os vazios das paredes celulares, sendo que a sua saída implica a contração das células, dando início ao fenómeno de retração da madeira. A água de constituição está intimamente ligada à substância lenhosa, não podendo ser removida sem que ocorra a decomposição química da madeira (Cruz & Nunes, 2005).

A perda de toda a água livre, mantendo-se a água de impregnação, corresponde ao Ponto de Saturação das Fibras (PSF), o qual se verifica para a maioria das espécies, entre 25 e 35% de teor em água (Cruz & Rodrigues, 2000). Após atingir este ponto, a madeira pode alterar o seu teor em água em função da higrometria do ambiente, isto é, do conteúdo de vapor de água e da temperatura do ar com que contacta. Este fenómeno designa-se higroscopicidade e provoca alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira (Negrão & Faria, 2009).

Aquando da aplicação em obra, deve-se procurar garantir que a madeira possui um teor de água próximo do equilíbrio com as condições médias desse local, que para a maioria das aplicações interiores varia entre 12 e 16% (Cruz & Rodrigues, 2000), com o objetivo de minimizar as trocas de água com o ambiente e as conseqüentes variações dimensionais das peças.

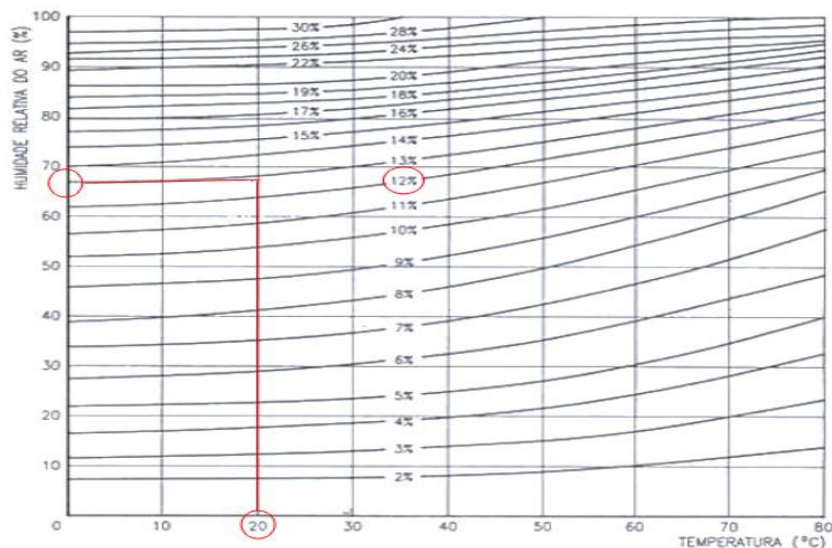


Figura 2.5 - Teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo em função das condições higrotérmicas ambientais. Adaptado de Cruz & Rodrigues, 2000

O teor em água de referência para o estudo de diversas propriedades da madeira é considerado como 12% na maioria das normas, sendo obtido com condições ambientais de humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  e temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

A NP-614 define teor de água de um provete de madeira como o quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do provete por secagem a  $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante, pela massa do provete depois de seco, sendo que o teor em água de referência de um

provete de madeira é de 12%, garantindo assim o equilíbrio com as condições envolventes. Neste sentido, para verificações laboratoriais recorre-se à seguinte expressão definida na norma.

$$H(\%) = \frac{\text{Peso húmido} - \text{Peso seco}}{\text{Peso Seco}} \times 100$$

Para aplicações práticas usam-se métodos expeditos de leitura instantânea, recorrendo a aparelhos portáteis não destrutivos, como é o caso dos higrómetros de superfície ou higrómetros de agulhas. O seu princípio de funcionamento baseia-se no facto da condutibilidade elétrica da madeira aumentar com o seu teor em água.



Figura 2.6 – Higrómetro de superfície. a) Aplicação *in situ*; b) Aplicação em laboratório

### 2.2.2 Massa volúmica

A massa volúmica é uma medida do peso da madeira por unidade de volume, sendo este um dos modos fundamentais de caracterizá-la. É no entanto necessária a correlação com o seu teor em água pela influência que este pode ter na correta avaliação do parâmetro. É neste sentido que a NP 616:1973 define massa volúmica a  $H(\%)$  de teor em água, como o quociente da massa pelo volume, sendo ambos os valores determinados com o provete a  $H(\%)$  de teor em água.

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

Define ainda massa volúmica de referência, sendo este parâmetro determinado com provetes a 12% de teor em água pelas razões apontadas em 2.2.1.

Sendo uma medida de concentração de substância por unidade de volume, está relacionada com a sua resistência mecânica. Pode por isso constituir um indicador de qualidade da madeira, já que a uma maior massa volúmica corresponde, quase sempre, maior resistência mecânica, maior impermeabilidade, maior durabilidade natural, mas também, em muitos casos, maior retratilidade e maior dificuldade de laboração e de secagem (Cruz, *et al.*, 1994).

É ainda de referir que as madeiras apresentam um valor de massa volúmica relativamente baixo, face à sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, o que lhes confere grandes

potencialidades para o uso estrutural, dado o seu baixo peso, quando confrontada com outros materiais de iguais características de resistência mecânica (Negrão & Faria, 2009).

### 2.2.3 Retractilidade

Conforme referido em 2.2.1, para valores de teor em água inferiores ao ponto de saturação das fibras (PSF), a madeira é suscetível a alterações dimensionais por variações do teor em água.

Devido à sua anisotropia, estas variações dão-se de forma diferenciada consoante as direções em estudo: tangencial, radial ou axial. De uma forma geral a variação longitudinal é desprezável, sendo que é máxima na direção tangencial,  $R_t$ , chegando mesmo a ser duas vezes superior à verificada na direção radial,  $R_r$ , conforme se verifica pelo gráfico seguinte.

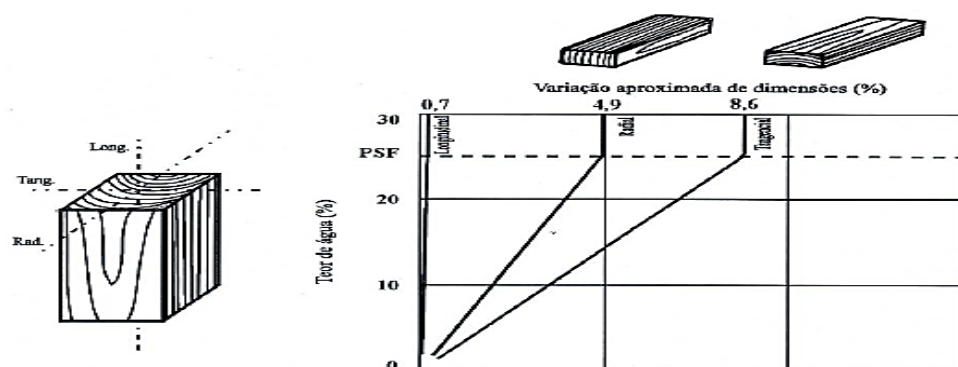


Figura 2.7 - Coeficientes médios de retração, em termos relativos, referentes ao Pinho bravo. Adaptado de Carvalho, 1996

Neste sentido, um dos modos de classificar uma madeira quanto à estabilidade dimensional baseia-se no fator de anisotropia, definido pela relação entre os coeficientes tangencial e radial ( $R_t / R_r$ ), sendo que quanto maior for este fator, maior a tendência da madeira para fender ou empenar (Cruz & Nunes, 2005).

### 2.2.4 Reação e resistência ao fogo

A madeira é um material combustível devido à presença de elementos como o carbono, o oxigénio e o hidrogénio, fornecidos pela celulose e lenhina. Contudo, embora seja combustível, apresenta uma considerável resistência ao fogo. Isto é, a madeira permite que a sua superfície exterior entre facilmente em combustão, mas rapidamente cria uma capa carbonizada que é cerca de 6 vezes mais isolante que a própria madeira, atrasando desta forma o processo de combustão e permitindo que a madeira no interior da peça não seja afetada pela ação do fogo, conservando assim, durante algum tempo, uma boa resistência mecânica, tanto maior, quanto maior a massa volúmica do elemento (Negrão & Faria, 2009). Tem sido verificado que, embora as ligações das peças sejam pontos fracos, a madeira apresenta, em muitos casos, melhor comportamento quando exposta ao fogo, do que estruturas equivalentes em aço e betão.

### 2.2.5 Dureza

A dureza é uma propriedade físico-mecânica de extrema importância, constituindo uma medida do comportamento à penetração, riscagem e desgaste por objetos mais duros. Esta é uma propriedade bastante variável, mas intimamente ligada à massa volúmica. Por norma, madeiras mais duras, apresentam também uma maior densidade (Carvalho, 1996).

Neste sentido, a dureza pode comprometer a função de um elemento em madeira. Por exemplo, madeiras a aplicar em pavimentos deverão ter um índice de desgaste superficial baixo e uma dureza elevada.

A avaliação desta propriedade é possível por métodos não destrutivos, como é o caso da utilização do *Pilodyn*®, ou ainda por métodos laboratoriais destrutivos, como o ensaio de dureza estática. Ambos os ensaios são utilizados na presente tese, sendo explicados em 6.2.

## 2.3 Características mecânicas

Como já referido, a anisotropia da madeira condiciona as suas propriedades. Desta forma, para falar da resistência mecânica é necessário conhecer o tipo de solicitação, nomeadamente a sua grandeza e direção. Na verdade, a direção da carga chega a ser um fator preponderante, verificando-se grandes diferenças na resistência mecânica para solicitações no sentido paralelo e perpendicular às fibras.

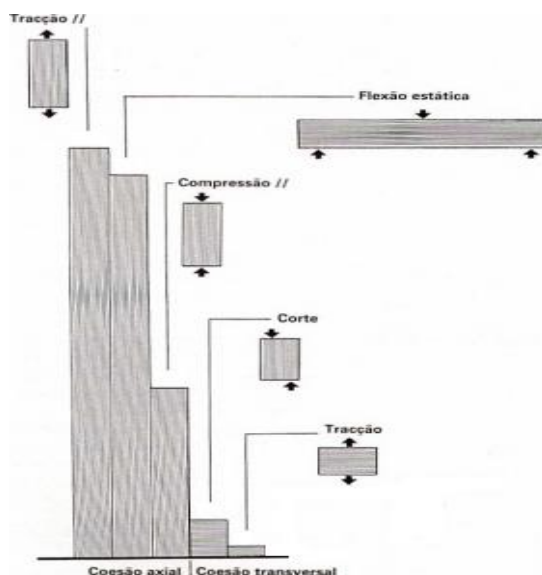


Figura 2.8 - Diagrama representativo da diferença da resistência da madeira em função do tipo de solicitação. Adaptado de Carvalho, 1996

Olhando para as árvores como elemento da natureza, facilmente se percebe o porquê desta diferença. Ao longo do seu ciclo de vida, desenvolvem o tronco de forma a resistir às solicitações a que estão sujeitas durante o seu crescimento, como o vento (esforço de flexão) ou a ação

gravítica (esforço de compressão), orientando a sua estrutura anatómica neste sentido (Negrão & Faria, 2009).

É de referir que as características de seguida descritas, apresentam-se sem ter em conta qualquer tipo de defeito, o que raramente é possível de conseguir.

### 2.3.1 Resistência à tração

A resistência à tração no sentido paralelo às fibras ou axial é geralmente bastante elevada quando comparada com a resistência a outros esforços. De facto, o esforço de tração nesta direção proporciona a aproximação das fibras, contribuindo assim para o aumento da coesão interna da peça de madeira.

Por outro lado, fazendo um raciocínio semelhante, e conhecendo a escassez de ligações no sentido transversal, facilmente se depreende que a resistência à tração perpendicular às fibras é bastante inferior à sentida na direção axial. Na verdade, a resistência nesta direção chega a ser, para o Pinho bravo, 50 vezes superior, à verificada na direção perpendicular (Negrão & Faria, 2009).

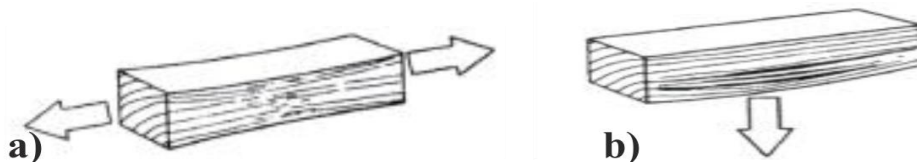


Figura 2.9 – a) Aproximação das fibras devido ao esforço de tração paralelo às fibras; b) Afastamento das fibras devido ao esforço de tração perpendicular às fibras

### 2.3.2 Resistência à compressão

Mais uma vez, pela falta de ligações transversais, a compressão no sentido axial provoca a separação das fibras longitudinais, diminuindo a coesão do elemento estrutural e consequentemente a sua resistência. Contudo, a resistência à compressão neste sentido é ainda considerável.

No sentido perpendicular às fibras, a resistência à compressão volta a ser mais reduzida, tendo como base as justificações já apresentadas e sendo cerca de 20 a 25% do valor indicado para o sentido paralelo (Negrão & Faria, 2009).

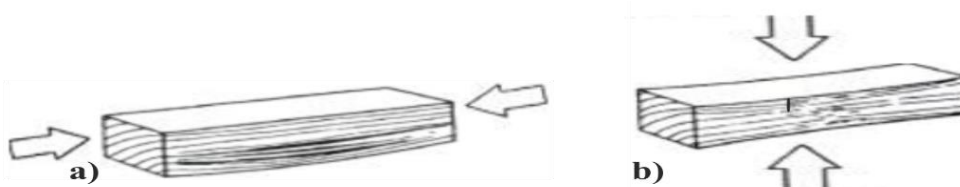


Figura 2.10 – a) Afastamento das fibras devido ao esforço de compressão paralelo às fibras; b) Aproximação das fibras devido ao esforço de compressão perpendicular às fibras

### **2.3.3 Resistência à flexão estática**

A resistência à flexão estática é elevada, atingindo, para a maioria das madeiras, valores próximos aos da resistência à tração paralela às fibras. A título de exemplo, para o Pinho bravo este valor é, para peças perfeitas, cerca de 90% do valor da resistência à tração paralela às fibras (Negrão & Faria, 2009). Em termos estruturais, é uma das propriedades mais complexas da madeira, tendo componentes de quase todos os outros tipos de esforços puros, como trações, compressões e corte em diferentes direções. Outro fator de extrema importância nesta área é a relação entre o peso próprio do elemento e a carga a suportar, sendo de salientar que neste aspeto a madeira apresenta um excelente comportamento, sendo um dos materiais de construção com melhor desempenho nesta perspetiva (Santos, 2007).

### **2.3.4 Resistência ao corte ou escorregamento**

As tensões de corte devem-se à tendência para o deslizamento entre diferentes planos, sendo necessário considerar, para avaliar este parâmetro, a existência possível de vários tipos de tensões, por exemplo de compressão e tração de sentidos opostos. Mais uma vez pela falta de ligações transversais na estrutura anatómica da madeira, as tensões tangenciais paralelas às fibras são aquelas que mais problemas podem trazer. Por norma, sendo esta a situação mais desfavorável, os ensaios de resistência ao corte são realizados nesta direção (Negrão & Faria, 2009). Por outro lado, quando os esforços de corte atuam na direção perpendicular às fibras, não é comum acontecer rotura, pois muitas vezes antes de se atingir o limite de resistência por corte, atingem-se outros limites, nomeadamente a compressão transversal (Santos, 2007). É de referir que nas zonas de ligação entre peças e nas zonas de esforços concentrados, esta avaliação ganha especial interesse no sentido de garantir a própria segurança das estruturas.

### **2.3.5 Módulo de elasticidade**

O comportamento elástico de um material traduz-se pela recuperação da sua forma quando a carga aplicada cessa. Contudo, quando o nível de carga supera o admissível para o comportamento elástico, entra-se no comportamento plástico, onde a deformação não é recuperada, ou na rotura (Green, *et al.*, 1999). Teoricamente o módulo de elasticidade define-se como a relação entre a tensão e a deformação unitária, sendo o seu conhecimento de extrema importância na determinação das deformações do material em função das cargas sobre ele aplicadas.

A madeira apresenta, de uma forma geral, um comportamento elástico quase perfeito até tensões relativamente elevadas, desde que o tempo de atuação seja curto, pois caso contrário começa a revelar-se um novo fenómeno que é o do comportamento visco-elástico, ao que se segue ainda o comportamento visco-plástico (Santos, 2007), isto é, a fluência.

De uma forma simples, pode dizer-se que quanto maior for o módulo de elasticidade de um material, menor será a deformação resultante para a aplicação de uma carga idêntica. Pode ainda afirmar-se que a madeira apresenta um bom coeficiente de correlação entre o valor do módulo de elasticidade e a sua massa volúmica, permitindo criar estruturas leves com um bom comportamento elástico (Santos, 2007).

### 2.3.6 Pinho bravo, *Pinus pinaster* Ait. e Casquinha, *Pinus sylvestris* L.

Como referido no capítulo 1, a presente tese trata madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) e de Casquinha (*Pinus sylvestris* L.), podendo encontrar-se a sua caracterização físico-mecânica nas fichas técnicas do LNEC, M2 e M4, respetivamente, e ainda numa ficha de características do Pinho bravo, de 1963, publicada pelo LNEC. As características apresentadas referem-se a madeira de Pinho bravo nacional e de Casquinha em função da sua origem: *Scots pine* para madeira da Europa central e Reino Unido e *Redwood* para madeira proveniente da Europa do Norte ou Nordeste.

Apresenta-se no quadro seguinte os valores médios de algumas das características físico-mecânicas das madeiras estudadas.

Espécie	Propriedades físicas		Valores médios das propriedades mecânicas a 12% de t.a.(N/mm <sup>2</sup> )				
	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de retracção volúmica (%)	Módulo de elasticidade por flexão estática, $E_{m,12\%}$	Tensão de rotura por flexão estática, $f_{m,12\%}$	Tensão de rotura por compressão axial, $f_{c,0,12\%}$	Tensão de rotura por tracção transversal, $f_{t,90,12\%}$	Tensão de rotura por corte, $f_{v,12\%}$
Pinho bravo ( <i>Pinus pinaster</i> , Ait.)	530 - 600	0,6	13800	98	54	3,0	10,0
Casquinha ( <i>Pinus sylvestris</i> , L.) <i>Redwood</i>	400	0,29	9250	69	42	1,7	1,5
Casquinha ( <i>Pinus sylvestris</i> , L.) <i>Scots pine</i>	530	0,53	11760	98	54	2,9	9,8

Tabela 2.1 - Valores médios das características físico-mecânicas das madeiras em estudo (Henriques,2011, citando, Tsoumis 1991)

Pela consulta do quadro apresentado, conclui-se a semelhança de propriedades da madeira de Casquinha, do tipo *Scots pine*, com o Pinho bravo, classificado como leve a mediamente pesado, mediamente retráctil e mediamente resistente do ponto de vista mecânico, em LNEC, 1963.

## 2.4 Fatores que influenciam as propriedades físicas e mecânicas

Como já referido a madeira apresenta-se como material anisotrópico e de grande variabilidade de propriedades, tanto entre espécies, como dentro da mesma espécie. Além desta variabilidade natural, fatores como o teor em água, a massa volúmica e os defeitos, afetam as suas propriedades.

Relativamente ao teor de água, regra geral, abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), verifica-se uma proporção inversa entre muitas propriedades mecânicas e este parâmetro, sendo que acima deste valor, não se verificam alterações (Henriques, 2011).

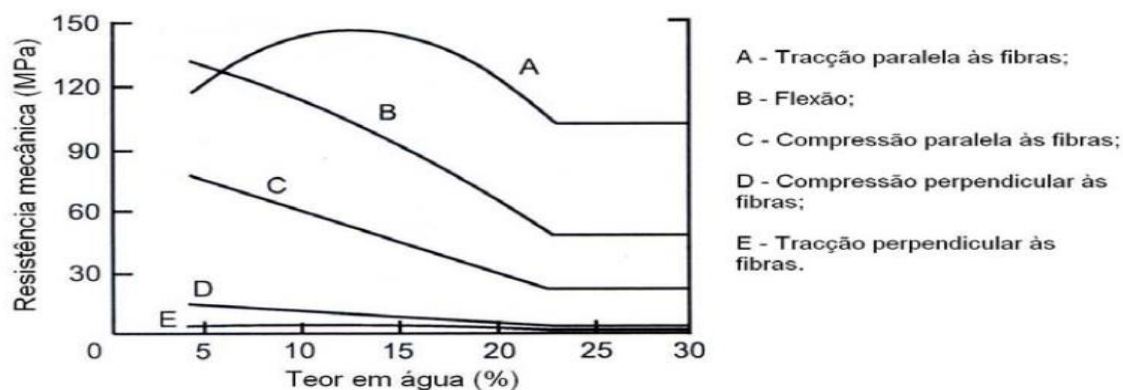


Figura 2.11 – Efeitos do teor em água nas características mecânicas. Adaptado de Henriques, 2011, traduzido de Green *et al.*, 1999

De facto, pela observação da imagem apresentada, facilmente se compreende a influência do teor de água nas propriedades mecânicas.

A massa volúmica, como referido em 2.2.2, associada à quantidade de substância, é, por norma, um bom indicador de qualidade. De facto, existe uma correlação positiva bastante consistente entre massa volúmica e resistência mecânica (Carvalho, 1996). Há no entanto de considerar a presença de resinas e extrativos, que contribuindo para a densidade, têm pouco significado na resistência mecânica (Green, *et al.*, 1999).

Os defeitos, por sua vez, apresentam-se como um fator de depreciação nesta área, muitas vezes pela imprevisibilidade do seu efeito, resultante da alteração que provocam na estrutura anatómica da madeira

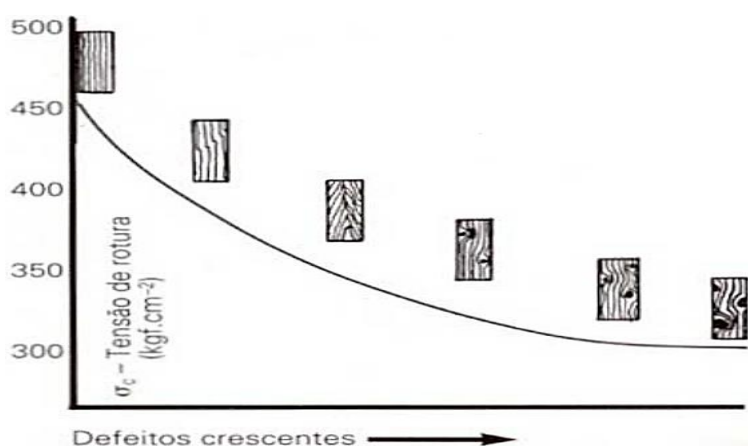


Figura 2.12 - Incidência de defeitos na resistência da madeira à compressão axial. Adaptado de Carvalho, 1996

Pela observação da figura 2.12, facilmente se percebe a influência que os defeitos, como nós, podem representar na resistência mecânica da madeira. De facto, sabendo que a resistência à

tração paralela às fibras é bastante superior à verificada na direção perpendicular, e que os nós correspondem a material inserido numa peça cujas fibras são aproximadamente perpendiculares à direção geral das fibras da peça, facilmente se compreende a influência negativa que a sua presença proporciona (Cruz & Nunes, 2005).

### 2.4.1 Classes de qualidade

Qualquer madeira utilizada com função estrutural pressupõe o cumprimento de normas ou especificações conhecidas para o efeito, com o objetivo de constituir lotes com propriedades mecânicas bem definidas.

Com base numa adaptação às espécies de madeira e à sua proveniência, é possível, através de uma avaliação visual, definir classes de qualidade assentes num conjunto de valores máximos admitidos para os vários tipos de defeitos apresentados em 2.1.2 (Cruz & Nunes, 2005). É igualmente viável estabelecer diversas classes de qualidade através de uma classificação mecânica, com vista a limitar a gama de variação de propriedades, proporcionando lotes com comportamento mecânico mais previsível (Machado, et al., 1997). O LNEC aponta para o seguimento da norma EN 518:1995 – *Structural timber. Grading. Requirements for visual strength grading standards* – no que respeita a classificações visuais, e da norma EN 519:1995 – *Structural timber. Grading. Requirements for machine strength graded timber and grading machines* – para classificações mecânicas.

Para o Pinho bravo, as classes de qualidade encontram-se definidas na NP 4305:1995 – *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. – sendo que para as restantes espécies deve seguir-se a NP EN 1912:2013 – *Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species* – nomeadamente a listagem de normas de classificação visual aceites e respetivas classes de qualidade, apresentada em anexo a esta.

É de salientar que no que se refere à classificação mecânica, a indicação da classe de qualidade por si só conduz a um material com propriedades mecânicas conhecidas. Contudo, este tipo de classificação encontra-se bastante menos difundida que a visual (Machado, et al., 1997).

### 2.4.2 Classes de resistência

Este tipo de classificação permite a seleção das propriedades mecânicas a utilizar sem que para isso seja necessário conhecer as madeiras disponíveis no mercado. A norma EN 338:2009 – *Structural timber. Strength classes* – estabelece um sistema de classes de resistência, baseando-se em valores característicos de resistência, módulo de elasticidade e massa volúmica. Compreende nove classes para as resinosas e seis para as folhosas, prendendo-se esta distinção com as diferenças de massas volúmicas apresentadas por estes dois grupos (Machado, et al., 1997).

A correspondência entre as classes de resistência estabelecidas na EN 338:2009 e as diversas combinações espécie/origem/classe de qualidade é estabelecida na NP EN 1912:2013 – *Madeira para estruturas. Classes de resistência. Atribuição de classes de qualidade e espécies* – que indica as diversas opções que satisfazem cada uma das classes de resistência (Cruz & Nunes, 2005).

### 2.4.3 Normas de ensaio

Pela variedade de fatores que podem afetar as características mecânicas da madeira, facilmente se compreende que a sua caracterização exija uma uniformização de fatores de variabilidade. É neste sentido que as normas de ensaios de avaliação exigem, de uma forma geral, a isenção de defeitos, o controlo do teor de água, a forma paralelepípedica e uma orientação específica dos provetes (Henriques, 2011).

A caracterização mecânica da madeira encontra-se definida em várias normas, como a EN 408:2010, a ASTM D143-94:2007 e várias normas nacionais. Apresenta-se então uma lista dos ensaios mais comuns e, quando for o caso, das normas portuguesas por que se regem (Henriques, 2011):

- Resistência à tração paralela às fibras;
- Resistência à tração perpendicular às fibras (NP621:1973);
- Resistência à compressão paralela às fibras (NP 618:1973);
- Resistência à compressão perpendicular às fibras;
- Flexão estática (NP 619:1973);
- Corte (NP 623:1973).

### 3 Construção Pombalina e Gaioleira em Lisboa

A madeira foi durante anos um dos materiais estruturais mais utilizados, tendo deixado vastos testemunhos até aos dias de hoje. Neste capítulo pretende dar-se a conhecer os principais métodos e técnicas construtivas, de acordo com os períodos históricos convencionalmente balizados.

#### **3.1 Introdução**

Lisboa, 1755, um grande terramoto seguido de um devastador incêndio atinge os edifícios da cidade, edifícios estes por vezes de fraca qualidade, construídos em alvenaria de pedra e sobre terrenos instáveis, condições que se viriam a verificar devastadoras. De facto, dez mil pessoas perderam a vida, dois terços das ruas ficaram destruídas e apenas três mil casas, das vinte mil existentes não foram gravemente afetadas após o incêndio (Teixiera, 2010).

Havia uma nova cidade a erguer, a qual foi pensada não só para suprimir a falta de habitação resultante do terramoto, mas para uma reconversão de dados sectores da cidade em estado urbano caótico (Oliveira & Cabrita, 1985). Foi esta mesma reconversão, por mão de Sebastião José de Carvalho e Melo, Marquês de Pombal, que transformou a cidade de então, numa nova, moderna e preparada para o futuro, assente numa construção de extrema qualidade, que marca uma época, a pombalina. Esta, encontra a madeira como material de excelência. Usada para elementos não estruturais e estruturais como a gaiola pombalina, uma estrutura tridimensional de elevada flexibilidade que, aliada a uma grande capacidade de dissipação de energia, dota os edifícios de excepcionais características antissísmicas (Appleton, 2011).

Contudo, à medida que os anos foram passando e a memória do terramoto desvanecendo, as exigências pombalinas foram abrandando sucessivamente e a utilização da gaiola de madeira foi cada vez menor, verificando-se um decréscimo acentuado na qualidade dos edifícios. Foi por volta de 1880 que a construção lisboeta decaiu em qualidade e aumentou em quantidade, verificando-se uma grande expansão da cidade, conseguida não só pela ocupação urbana de grandes áreas como pelo acréscimo em altura de muitos edifícios antigos (Oliveira & Cabrita, 1985). Uma nova época construtiva, conhecida por gaioleira, de menor qualidade mas também assente na madeira como material de excelência, iria perdurar até cerca de 1930, altura em que o aparecimento do betão armado veio substituir gradualmente a madeira até aí utilizada.

## 3.2 Características genéricas das épocas construtivas

### 3.2.1 Edifícios de alvenaria da época Pombalina e similares (1755 – 1870)

O mau comportamento das alvenarias de pedra verificado durante o terramoto exigia uma solução adequada. A construção pombalina preconizando a gaiola de madeira e limitando as alturas dos edifícios a 4 pisos mais mansarda, incluindo o r/c, foi a resposta.

Um piso térreo com arcaria em pedra ou abóbada de tijolo, amplo e maioritariamente dedicado ao comércio, descarrega, nas zonas aluvionares, sobre grades e estacas de madeira de Pinho verde, material adequado às condições de humidade do solo. Serve ainda de base para toda a estrutura superior. As grandes paredes mestras de alvenaria de pedra de 1 ou 2 folhas são agora presas, a partir do primeiro piso, a um pórtico tridimensional interior em madeira com a função de solidarizar os diferentes elementos estruturais (Oliveira & Cabrita, 1985). Os elementos de madeira verticais (prumos), horizontais (travessas ou travessanhos), e diagonais (escoras), formam a chamada cruz de Santo André através de ligações precisas. São depois envolvidos em alvenaria de tijolo maciço, fragmentos cerâmicos ou de pedra irregular argamassada de cal, originando os chamados frontais pombalinos. Estes, juntamente com as paredes divisórias de tabiques de madeira com acabamento por fasquiado, extremamente esbeltas e de grande elasticidade (Oliveira & Cabrita, 1985), dão origem às divisões das habitações e conferem um excelente comportamento sísmico ao edifício.

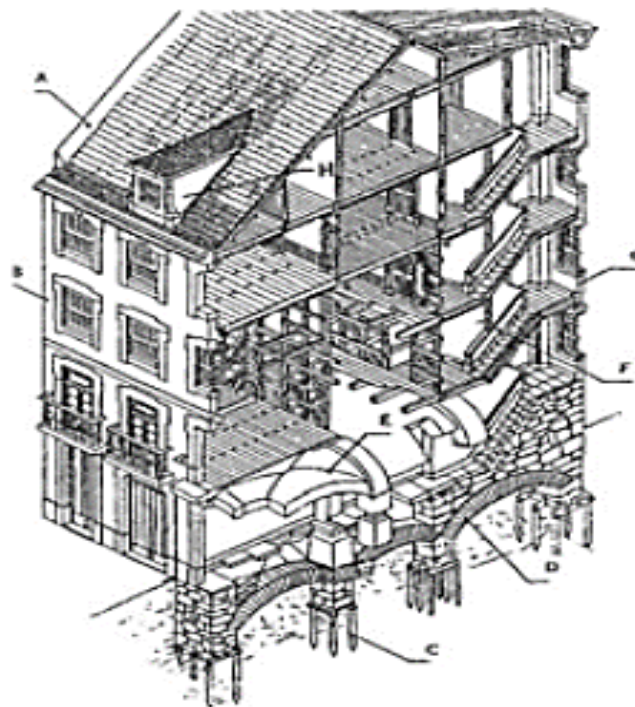


Figura 3.1 - - Edifício Pombalino: A -Paredes meãs; B - Paredes de alvenaria de pedra; C - Estacaria de madeira; D - Arcos de reforço de fundação; E - Abóbadas; F- Escadas em patamar intermédio; G - Escadas junto à fachada; H - água-furtada. Adaptado de Farinha, 2012.

Uma outra preocupação era o deflagrar de um novo grande incêndio. Desta forma, o piso térreo é maioritariamente construído em alvenaria e as paredes meãs dos edifícios são elevadas acima dos telhados, reduzindo desta forma o risco de passagem do fogo ao longo do quarteirão.

É ainda de salientar todo o rigor do detalhe construtivo ao nível das ligações, principalmente da ligação da gaiola ao piso térreo, essencialmente por meio de pernos metálicos chumbados nas pedras (Oliveira & Cabrita, 1985). Mas o rigor não se ficava por aqui, existia ainda um grande cuidado na seleção da madeira em função da sua localização no edifício e do grau de qualidade exigido. O Castanho de origem nacional, assim como o Choupo, o Cedro e o Carvalho eram madeiras mais correntes, sendo também de aplicação frequente a Casquinha e, em menor grau, o Pitespaine, sobretudo em obras de maior importância (Appleton, 2011).

### **3.2.2 Edifícios de alvenaria de tijolo do tipo Gaioleiro (1880 – 1930)**

No final da década de 1870, passados vários anos desde o terramoto de 1755, as memórias desvaneciam e a grande expansão da cidade iniciava-se. Construtores preocupados essencialmente com o lucro e muito pouco com a qualidade da construção levaram à decadência da qualidade característica do período Pombalino (Andrade, 2011).

De facto, passou-se a construir mais em altura, 5 a 6 pisos, a característica gaiola pombalina passou a ser cada vez menos utilizada e certos elementos de solidarização horizontal das paredes mestras chegaram também a ser postos de lado (Oliveira & Cabrita, 1985). Mesmo os edifícios pombalinos, de extremo detalhe construtivo, viam agora a sua altura aumentar em 1 ou 2 pisos de qualidade francamente inferior.

Estávamos perante uma nova era construtiva de características muito próprias. É possível identificar 3 tipos de paredes, as mestras, em geral de pedra maciça e argamassas de “argila”, dispostas nas fachadas principais e posteriores, com grande espessura na base, indo diminuindo depois em altura. As resistentes, de tijolo maciço e espessura de 30 cm dispostas nas empenas e em outro local no interior do edifício, e as paredes divisórias de tabique ou tijolo furado e espessura de 15 cm. No piso térreo, as paredes são todas resistentes e descarregam sobre caboucos de alvenaria de pedra maciça com largura sensivelmente dupla da das paredes e profundidade necessária para encontrar terreno firme (Oliveira & Cabrita, 1985). Os pavimentos de madeira são constituídos por barrotes dispostos na direção de menor vão, passando a descarregar diretamente sobre as paredes através de alguns centímetros de entrega, existindo também, em alguns edifícios, travamento lateral de paredes à custa de ferrolhos metálicos.

Quanto à madeira utilizada neste período, verificou-se o abandono quase total de Casquinha nos madeiramentos, passando o Pinho bravo, pela sua abundância no país, a ser aplicado de forma generalizada (Appleton, 2011).

Verificou-se ainda a presença de marquises no tardo, destinadas a instalações sanitárias que, tendo inicialmente o pavimento em madeira, foi substituído por elementos metálicos ou abobadilhas.

O aparecimento do betão armado por volta de 1930 veio substituir gradualmente a madeira, começando pelas zonas mais húmidas dos edifícios, estendendo-se depois a todos os pavimentos (Oliveira & Cabrita, 1985). Até aos dias de hoje, a maior ou menor utilização do betão armado marcou alguns períodos construtivos, tendo a madeira ficado com funções essencialmente decorativas e de revestimento.

Atualmente, devido à degradação do parque edificado, ao excesso de construção na cidade e à grande potencialidade de edifícios antigos situados nos grandes centros urbanos, a reabilitação e a utilização da madeira como elemento estrutural volta a estar na história da construção.

### **3.3 Madeira em edifícios antigos**

Após a caracterização das épocas construtivas em que a madeira foi o elemento estrutural chave, é agora fundamental fazer uma descrição mais específica da sua localização no edifício, sendo esta referente aos dois períodos históricos.

#### **3.3.1 Fundações**

Em muitos casos, principalmente em edifícios pombalinos construídos em terrenos brandos, o recurso a estacas de madeira nas fundações é comum. Esta técnica, além de permitir descarregar as cargas em terrenos mais resistentes, serve ainda para a consolidação do terreno de fundação (Appleton, 2011).

A madeira de eleição é o Pinho bravo aplicado em verde, material com capacidade de absorver a humidade dos terrenos, sendo as estacas aplicadas, nas situações mais comuns, com diâmetro de 15 cm e 1,5 m de comprimento, afastadas cerca de 30 a 40 cm. Desta forma cria-se um sistema rígido que contribui para a capacidade resistente do terreno pela sua consolidação e confinamento (Teixeira, 2010, citando Ramos, 2002). Neste sentido, mesmo que a estacaria não atinja terreno resistente, a consolidação deste permite suportar o edifício.

#### **3.3.2 Paredes**

De uma forma geral é possível encontrar três grandes grupos de paredes: as de alvenaria, os frontais e os tabiques.

As paredes de alvenaria dos edifícios pombalinos apresentam cerca de 0,9 m de espessura ao nível do rés-do-chão, indo esta diminuindo ligeiramente em altura (Silva, *et al.*, 2002). São normalmente constituídas por materiais heterogéneos de que resultam elementos rígidos e

pesados (Appleton, 2011), bastante estáveis e resistentes a esforços de compressão. A alvenaria recorre a argamassa de cal aérea, a pedras e alguns materiais cerâmicos arrumados de forma cuidada (Teixeira, 2010, citando Silva, 2007), sendo que em edifícios gaioleiros o cuidado no detalhe é fracamente inferior.

Acima do primeiro andar, como já referido, existe a gaiola de madeira, em paredes de frontal formando uma malha ortogonal que recebe os vigamentos dos pisos, complementada por uma estrutura simples colocada do lado interior dos paramentos exteriores. Esta estrutura de madeira, que liga os pavimentos e frontais às paredes de alvenaria é constituída por peças de ligação designadas “mãos”, que ficam embebidas na alvenaria e melhoram a ligação.

### 3.3.2.1 Frontais

As paredes de frontal constituem-se como verdadeiras paredes mestras inseridas no todo estrutural (Appleton, 2011). De facto, podem ser vistas como uma “armadura” ou “esqueleto” de madeira, constituído por um conjunto de peças verticais, horizontais e inclinadas, que formam, como referido em 3.2.1, a chamada cruz de Santo André. O preenchimento do espaço livre entre estes elementos, normalmente com alvenaria de tijolo maciço, fragmentos cerâmicos ou de pedra irregular argamassada de cal, e a aplicação de posterior revestimento, dá origem ao chamado frontal. Estes, colocados nas duas direções, na época Pombalina, desempenham uma função estrutural muito importante no comportamento da gaiola, quer para absorção de parte da carga vertical, quer para o travamento geral da estrutura, conseguida pelo rigor das ligações existentes.

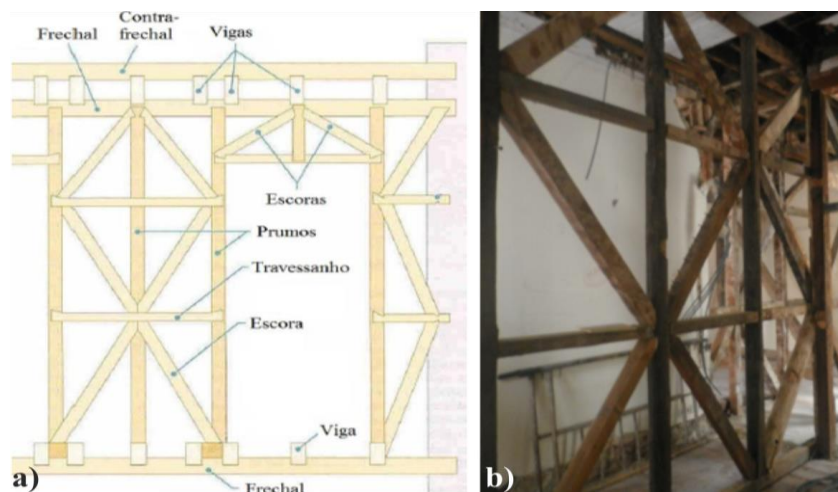


Figura 3.2 - a) Esquema de uma parede de frontal (Andrade, 2011); b) Estrutura de madeira de uma parede de frontal reconstruída num edifício na Calçada do Sacramento, Lisboa

A disposição construtiva mais comum é a do frontal tecido que se apresenta na imagem, constituído por prumos de secção de (0,1 a 0,15) x (0,08 a 0,10) m, encaixados e pregados nas vigas de pavimento e do teto, com um afastamento de aproximadamente 1 m. Dividida a altura do pé-direito em partes iguais colocam-se travessanhos horizontais de prumo a prumo (Henriques, 2011) sendo depois ligados às paredes de alvenaria por meio de mãos (Silva, *et al.*, 2002). Nos

retângulos formados entre os travessanhos e os prumos colocam-se escoras na diagonal, que vão garantir a indeformabilidade da estrutura e a sua capacidade de resistir a um sismo. As vigas onde assenta o pavimento tomam a designação de frechal, sendo o contra-frechal a viga assente sobre o pavimento.

A aderência da argamassa de revestimento é normalmente conseguida pela lascagem da madeira ou pela pregagem de fasquias afastadas entre si, garantindo desta forma uma superfície irregular e como tal, mais aderente.

### 3.3.2.2 Tabiques

Os tabiques, paredes divisórias teoricamente sem função estrutural. Embora exista registo da existência de tabiques antes da época pombalina, foi sem dúvida nesta que ganharam maior expressão (Appleton, 2011). Estas paredes apresentam-se com reduzida espessura, normalmente inferior a 0,1 m e assentam nos pavimentos e paredes (Henriques, 2011).

A disposição construtiva mais comum passa pela colocação de tábuas costaneiras, com cerca de 0,04 m de espessura, no interior, espaçadas entre si pelo menos 1 cm e pregadas ao alto em calhas fixas ao soalho e ao teto. Um outro elemento, as aspás, são pregadas na diagonal e têm como função o aumento da rigidez do conjunto. Perpendicularmente às costaneiras, pregava-se o chamado fasquiado, fasquias de secção trapezoidal, colocadas pela face menor tendo como objetivo facilitar a aderência do acabamento final em argamassa. O Castanho foi muito utilizado para fasquiado, sendo gradualmente substituído pelo Pinho bravo e Casquinha devido às suas dimensões regulares e uniformes (Appleton, 2011).

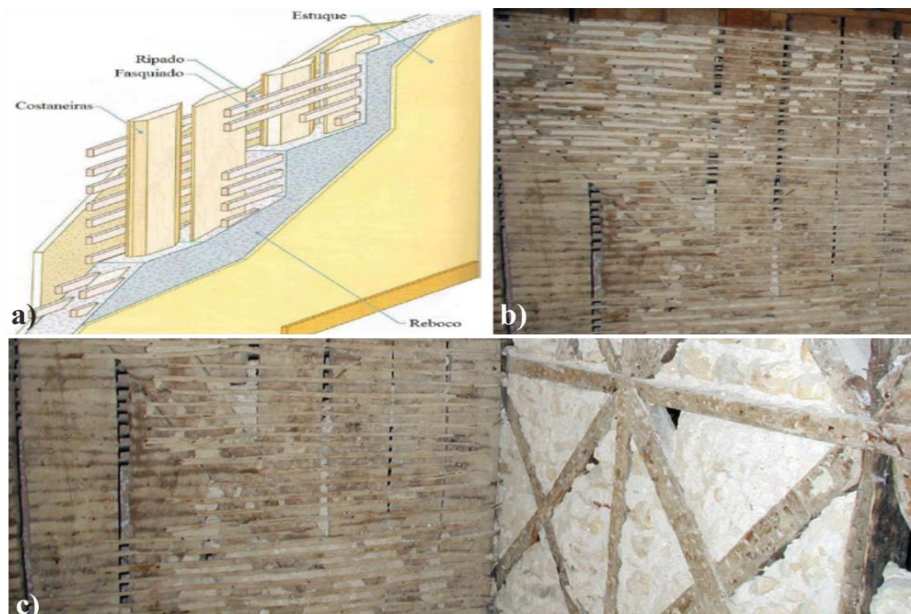


Figura 3.3 - a) Esquema de uma parede de tabique (Andreade,2011); b) Parede de tabique; c) Ligação parede de tabique - frontal

Numa construção menos cuidada, como a que existiu na época gaioleira, é comum o tabique ligeiro, constituído apenas por uma estrutura aligeirada de sarrafões, com placas de estafe pregadas.

### 3.3.3 Pavimentos

O pavimento do piso térreo apresenta-se por norma em terra batida ou enrocamento de pedra arrumada à mão sobre o qual se coloca a camada de revestimento e desgaste, em lajeta de pedra, em ladrilhos, tijoleira cerâmica ou em sobrados de madeira (Appleton, 2011). Nos pisos elevados, a madeira é sem dúvida o material estrutural de excelência. No teto do piso térreo, que é muitas vezes constituído por arcos e abóbodas de alvenaria, principalmente no período pombalino, é comum o pavimento do primeiro piso assentar numa estrutura de madeira apoiada nos elementos de alvenaria, sobre a qual se coloca o vigamento que serve de suporte ao soalho. Uma outra hipótese para este elemento é o preenchimento do arco com entulho, sobre o qual se coloca uma camada de argamassa e posteriormente o soalho, lajetas de pedra ou material cerâmico (Appleton, 2011).

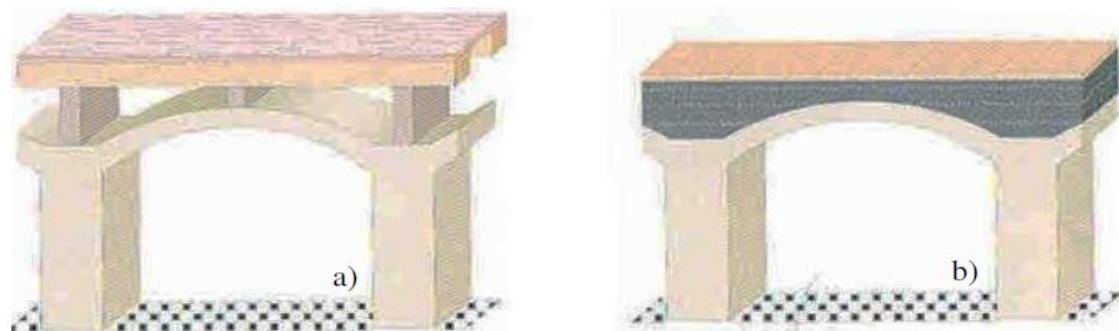


Figura 3.4 - a) Pavimento assente em estrutura de madeira; b) Pavimento assente em arco preenchido com entulho; (Appleton, 2011).

Nos restantes pisos, as vigas principais assentam sobre os frechais ou diretamente nas paredes resistentes, normalmente sobre pedra aparelhada, apresentando-se com um afastamento que varia entre 0,2 e 0,4 m e seguindo a regra de um afastamento entre vigas igual à largura das mesmas, principalmente em edifícios pombalinos. A altura dos perfis situa-se nos 0,2 m ou menos devido a limitações correntes de espécimes florestais, o que por sua vez limita os vãos máximos a valores próximos dos 4 m (Appleton, 2011). No caso de vencer vãos superiores, nomeadamente em edifícios mais nobres, o pavimento toma uma organização mais complexa em que se criam alinhamentos de vigas principais de grande altura, transversais às vigas do pavimento.

Uma outra situação é o tarugamento da estrutura dos pavimentos, pela introdução de elementos transversais ao vigamento com o objetivo de impedir a encurvadura e minimizar efeitos de deformação transversal e torção, que ocorrem muitas vezes durante o período de secagem da madeira (Appleton, 2011). É comum a existência de tarugos aplicados a meio vão, para vãos até 4 m, e de 2,5 m em 2,5 m para vãos superiores.

Por último aplica-se o soalho, pregado às vigas e o fasquiado no teto para possibilitar a aplicação do revestimento.

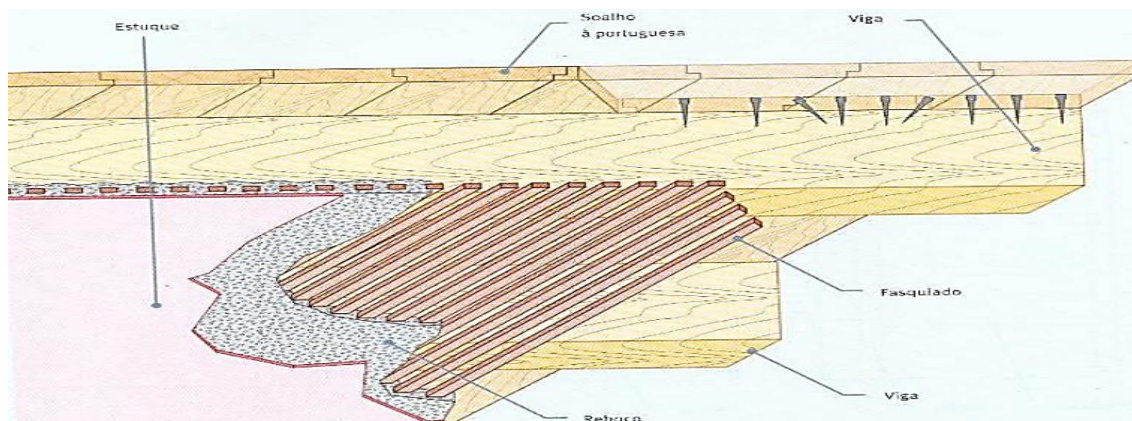


Figura 3.5 - Esquema de um pavimento de madeira (Andrade, 2011)

As madeiras mais utilizadas dependiam de condições regionais, sendo frequente o uso de Castanho, Choupo, Cedro e Carvalho. As Casquinhas, o Pitespaine ou o Pitch-pine também tinham utilização frequente, principalmente em obras de maior importância. Mais raramente utilizavam-se madeiras de espécies exóticas, provenientes do Brasil, Índia ou das colónias africanas. O Pinho bravo e o Eucalipto são menos comuns nos edifícios antigos, a não ser em posteriores reparações (Appleton, 2011).

### 3.3.4 Cobertura

Em linha com os pavimentos, também as coberturas podem apresentar soluções construtivas distintas. No que se refere à forma, apresentam-se maioritariamente inclinadas, existindo depois, em menor número, coberturas planas, em terraço, e coberturas curvas, as abóbadas e cúpulas (Appleton, 2011). Nas coberturas em terraço, a pedra e o tijolo predominam, em arcos e abóbadas, que são depois preenchidos com material de enchimento que por sua vez recebe o pavimento. As coberturas curvas, reservadas a edifícios nobres ou religiosos, correspondem geralmente a pequenas zonas da construção (Andrade, 2011). Já as coberturas inclinadas são comuns, apresentando-se num vasto número de formas, nomeadamente em função da inclinação destas, a qual considera os fatores climáticos do local e o tipo de utilização do espaço (Appleton, 2011). De facto, quanto mais nobre fosse o espaço, mais complexa seria a cobertura e por sua vez, mais difícil a sua correta execução.

Neste tipo de coberturas, as asnas, obtidas pela triangulação de elementos simples ligados entre si, são os tipos estruturais mais comuns, adaptando-se bem a geometrias variáveis. Os elementos principais – linha, pernas, escora ou diagonal e pendural – e os elementos secundários – madres, varas e ripas – que recebem diretamente os revestimentos, podem variar as suas dimensões e com isso a forma da cobertura.

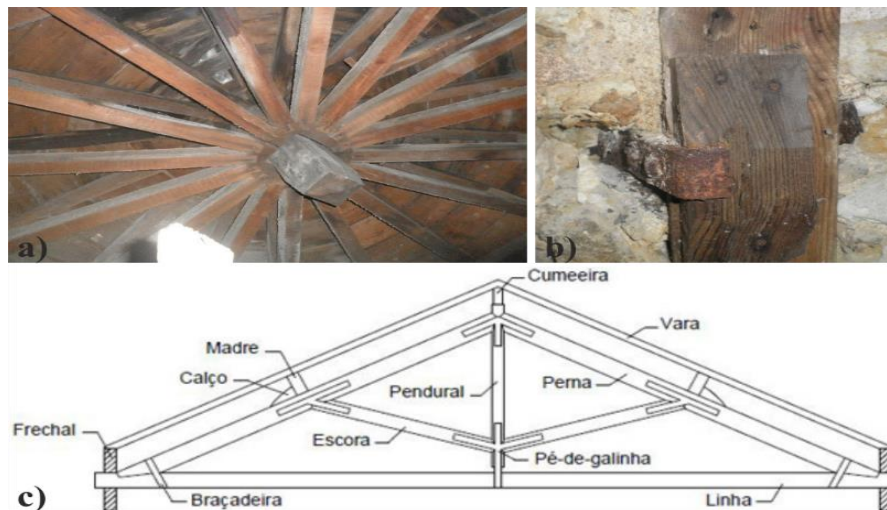


Figura 3.6 - a) Complexidade de cobertura em edifício nobre, Palacete Ribeiro da Cunha. (Príncipe Real, 1877); b) Ligação à parede. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877); c) Asna simples (<http://www.engenhariacivil.com>)

Na asna simples, a linha fica sempre em posição horizontal, as pernas assentes sobre a linha em posição inclinada para a formação das vertentes do telhado, o pendural fica apertado verticalmente no vértice do telhado pelas pernas e as escoras inclinadas, ligando as pernas ao pendural (Henriques, 2011). Os frechais, dispostos quase sempre já sobre as paredes, descarregam nas pontas das asnas, recebendo as pontas inferiores das varas, servindo apenas para fazer a ligação à parede.

É ainda de salientar que, sempre que as asnas se fixam diretamente na parede, tal como nos pavimentos, recorre-se a peças metálicas pregadas ou aparafusadas à linha das asnas e chumbadas na parede, devendo essa zona ser de pedra aparelhada. É de referir também o detalhe das ligações entre as diferentes peças, principalmente na época pombalina, em que se recorria a pregagens, peças auxiliares de ferro, sistemas de encaixe e de ensambladuras.

Quanto à madeira mais utilizada, a situação é idêntica à referida para os pavimentos, dependendo das condições geográficas e da importância do edifício (Appleton, 2011).

### 3.3.5 Escadas

As escadas nos edifícios antigos são normalmente em madeira, podendo, em edifícios mais nobres, ser em pedra. Também ao nível do piso térreo ou cobertura, onde o contacto com a água é esperado, as escadas são normalmente em pedra. Contudo, a construção comum inclui normalmente madeira em lanço único entre andares, de reduzida largura, por norma inferior a 1m, e com inclinação bastante acentuada, sendo normalmente colocadas numa das empenas do edifício (Appleton, 2011). A juntar à pequena largura e inclinação excessiva, existem os espelhos dos degraus que facilmente ultrapassam os 20 cm.

Pelo desconforto óbvio deste tipo de escadas, mais tarde, a partir do século XVIII, vulgarizam-se as escadas com dois lanços de degraus e patamares intermédios, com larguras superiores a 1 m. Também a localização das mesmas passou para o centro do edifício, tendo em vista a simetria estrutural e as vantagens desta, como por exemplo no que respeita à resistência aos sismos (Appleton, 2011).

Quanto à construção, as vigas que constituem a estrutura dos lanços dos degraus – as pernas – apoiam-se através de samblagens apropriadas, pregadas nas vigas dos pisos – cadeias – normalmente reforçadas para o efeito. Nas escadas ao centro do edifício existe uma estrutura intermédia em madeira, entre cada dois pisos sucessivos, apoiada nas paredes longitudinais da caixa de escada. Nos edifícios pombalinos, estas paredes são frontais com frechais intermédios ao nível do patamar, para apoio à estrutura da escada.



Figura 3.7 - a) Esquema de uma escada apoiada em frontal pombalino. Adaptado de Andrade, 2011, traduzido de Pena, 2008; b) Escada em frontal pombalino. Adaptado de Andrade, 2011, traduzido de Silva, 2007

As espécies de madeira mais utilizadas são as mesmas que para os pavimentos e cobertura, distinguindo-se normalmente os elementos estruturais dos de revestimento (Appleton, 2011).

## 4 Degradação por agentes biológicos

A madeira, como material natural que é, está sujeita ao ataque de diversos agentes biológicos. De facto, é esta a causa mais frequente de deterioração de estruturas deste material. Apresenta-se neste capítulo os principais organismos degradadores da madeira, as suas condições de atuação e alguns aspetos do seu ciclo de vida. Dá-se igualmente a conhecer o panorama normativo atual no que respeita às exigências de durabilidade da madeira estrutural.

### 4.1 Introdução

O fator tempo, por si só não produz depreciação das características da madeira (Cruz, 2001). De facto, existem exemplos de estruturas centenárias e até mesmo milenárias em perfeitas condições de serviço, por não terem sido expostas a condições ambientais que favorecessem a sua degradação.

Se por um lado, alterações relacionadas com agentes atmosféricos, como a luz solar ou a precipitação, provocam essencialmente alterações estéticas nas peças de madeira, por outro, o ataque de agentes biológicos, muitas vezes potenciado pela humidade, pode conduzir a perdas de massa irreversíveis e como consequência, à incapacidade estrutural dos elementos. Pode mesmo dizer-se que a humidade constitui o fator preponderante na degradação biológica da madeira em edifícios. Muitas vezes pela má conceção ou mau uso dos elementos construtivos, pela existência de fendas ou fissuras na envolvente, de telhas partidas na cobertura, canalizações danificadas entre outros casos, a humidade crónica numa estrutura de madeira pode conduzir a uma sucessão biológica, começando pelos simples bolores até à infestação total por térmitas (Henriques, 2011, citando Clausen & Vina, 2007).

Neste sentido, a melhor forma de combater o possível ataque biológico é a prevenção, começando por respeitar algumas regras simples de conceção em fase de projeto, nomeadamente ao nível da escolha das madeiras mais adequadas em função da classe de risco (assunto abordado em 4.5.1) e a aplicação de possíveis tratamentos preservadores quando necessário. Desta forma, se a madeira for devidamente preparada e utilizada, a probabilidade de surgirem casos graves de degradação biológica, quer causada por fungos e térmitas subterrâneas, quer por carunchos, é bastante reduzida (Cruz & Nunes, 2005). Deve-se simultaneamente criar a possibilidade de pontos de inspeção em zonas mais facilmente atacáveis, pelas vantagens que daí advêm através do conhecimento atempado de possíveis situações indesejáveis.

## 4.2 Fungos

Sendo um material orgânico, a madeira representa um meio excepcional para o estabelecimento de fungos, organismos heterotróficos que utilizam compostos orgânicos como fonte de energia. São constituídos por um corpo vegetativo – talo – composto por filamentos – hifas – que formam uma rede microscópica junto ao substrato – micélio – através da qual são absorvidos os nutrientes (Pala, 2007). Na fase reprodutiva produzem esporos que são difundidos através do ar, da água ou dos insetos.

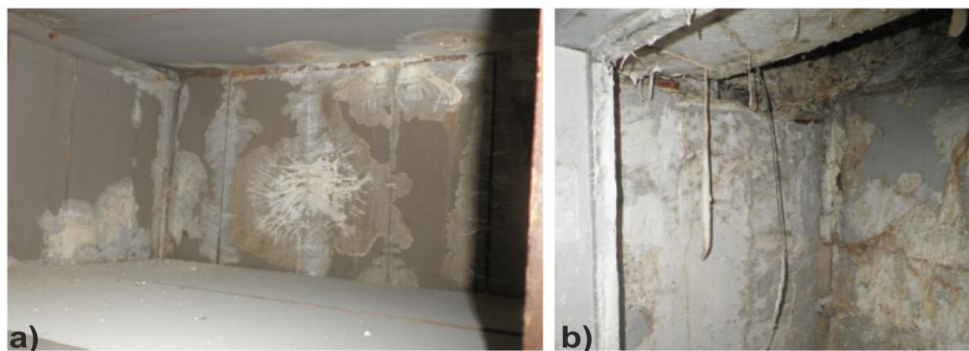


Figura 4.1 – a) Colónia de fungos num armário do piso térreo; b) Colónia de fungos num armário do primeiro piso. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)

Em função das consequências da sua ação, os fungos podem classificar-se em fungos de ação cromogénea e em fungos de ação destruidora. O primeiro grupo inclui os bolores e fungos de azulamento, os quais se alimentam de componentes não estruturais disponíveis nas células da madeira, não tendo efeito sobre as propriedades mecânicas desta. O segundo inclui os fungos de podridão, capazes de degradar os constituintes estruturais da madeira com consequente perda de resistência mecânica (Pala, 2007). Entre estes, deve ainda considerar-se os chamados micro-fungos, que provocam a podridão mole (fungos imperfeitos e alguns Ascomicetas), e os restantes, que provocam as podridões mais frequentes, do tipo branca ou castanha (fungos basidiomicetes) (Cruz & Nunes, 2005).

Como já mencionado, as infeções por fungos ocorrem facilmente desde que se estabeleçam as condições ecológicas requeridas para o seu desenvolvimento. É de referir que os fungos de podridão são muitas vezes impedidos de colonizar a madeira por competição com outros microorganismos, como os fungos de ação cromogénea. Estes últimos podem mesmo criar antibióticos que impeçam a colonização por fungos de podridão ou retardar a sua ação, iniciando-se esta apenas quando a ação dos fungos cromogéneos já não é possível. Desta forma, a deteção deste tipo de fungos pode ser um indicador do possível desenvolvimento de fungos de podridão, devendo neste caso tomar-se as medidas adequadas para o evitar (Pala, 2007).

### 4.2.1 Fungos de ação cromogénea

Como referido, a ação destes fungos não origina a degradação significativa da resistência mecânica da madeira e desenvolvem-se para teores em água superiores a 25 – 30 %, provocando a coloração da madeira. A forma mais eficaz de os eliminar é pela anulação das fontes de humidificação (Clausen, 2000).

### 4.2.2 Fungos de podridão

A ação destes organismos é geralmente fator de perda de resistência mecânica da madeira e acontece para teores em água superiores a 22% e à temperatura normal do ambiente, isto é, entre 10 e 30°C (Cruz & Nunes, 2005). Para temperaturas inferiores a 0°C e superiores a 45°C o crescimento cessa e os fungos ficam adormecidos. Acima de 60°C prevê-se a sua morte (Pala, 2007). É de mencionar que, embora o processo seja oxidativo, a concentração de oxigénio no meio raramente é um fator limitativo, sendo que a taxa de crescimento dos fungos só diminui para concentrações inferiores a 1 – 2%. Quando a madeira se encontra total e permanentemente imersa em água, o risco de ataque por fungos não existe, por não existir oxigénio disponível.

Os fungos que originam a podridão mole atacam a lenhinocelulose (Pala, 2007) e desenvolvem-se em ambientes húmidos, normalmente exteriores com teores em água superiores a 50% (Nunes, 2007). O ataque inicia-se da superfície para o interior da madeira sendo que, numa fase inicial, esta se apresenta mole por fora e resistente por dentro (Henriques, 2011, citando EN 1001-2:2005). Se a superfície estiver húmida é muito mole e descolorida, e depois de seca, facilmente se parte em fragmentos. Em casos de menores humidificações, os fungos de podridão mole podem ser rapidamente substituídos por fungos de podridão branca ou castanha (Pala, 2007).

Os fungos que originam a podridão branca tendem a atacar madeira dura, degradando celulose, hemicelulose e lenhina, em maior ou menor quantidade em função da espécie, e originando um branqueamento da madeira que justifica a sua designação (Pala, 2007). O material degradado adquire uma estrutura fibrosa como consequência da remoção da lenhina, não abrindo fendas nem encolhendo (Pala, 2007). Desenvolvem-se para teores em água superiores a 40% (Nunes, 2007) e a sua perda de resistência, comparativamente à podridão castanha, é lenta (Pala, 2007). É ainda de referir que a podridão branca é mais comum nas folhosas (Henriques, 2011, citando Mc Gill, 2002).

Os fungos que originam a podridão castanha são os que causam maior grau de destruição, pois degradam rapidamente a celulose e hemicelulose, deixando um resíduo de lenhina, castanho e com aparência oxidada (Pala, 2007). Numa fase avançada originam o aparecimento de fendas na madeira por planos aproximadamente ortogonais entre si (Nunes, 2007) que dão origem ao padrão característico da podridão castanha, os “cubos”. Dentro deste tipo de ataque, distinguem-se os fungos de podridão seca ou húmida.

A podridão seca, potenciada pelo fungo *Serpula lacrymans*, requer um teor em água relativamente baixo, cerca de 22%, para iniciar a sua ação (Nunes, 2007), não podendo sobreviver em climas quentes ou tropicais. A capacidade de propagação das suas hifas, em busca de água, fá-lo penetrar e espalhar através de outros materiais como alvenaria, tijolos e vigas de aço, o que o torna bastante perigoso. Já a podridão húmida, provocada por vários tipos de fungos, exige teores em água superiores e é comum em Portugal, atingindo tanto resinosas como folhosas, mas com maior incidência nas resinosas (Henriques, 2011).

#### **4.2.3 Patologias em edifícios**

A presença de fungos em edifícios verifica-se maioritariamente nos pisos térreos, em aros e guarnecimentos de portas ou janelas em contato com paredes húmidas, em madeiramentos em contato com o solo ou com massames que conduzem a humidade por capilaridade. É comum também em locais húmidos e mal arejados, junto a canalizações de água ou esgotos, em vigas de pavimentos e de coberturas, por infiltrações de água.

Numa fase inicial da obra, a colocação de madeira com teores em água não controlados e não adequados às condições de serviço, a aplicação junto a materiais como alvenarias, rebocos ou betonilhas antes da estabilização das condições ambientais, assim como inúmeras faltas de cuidado são ainda problemas frequentes que, além das anomalias dimensionais das peças, muitas vezes potenciam o aparecimento precoce de fungos (Cruz, *et al.*, 1994).

Outro fator preocupante é o facto da degradação por fungos ser apenas visível em estados muito avançados. Assim, indicadores como o cheiro a mofo, um som cavo quando a madeira é batida, o descasque da tinta, empenamento do tabuado ou de rodapés, o envelhecimento da madeira ou a humidade visível devem ser rapidamente combatidos por forma a evitar males maiores. Chama-se a atenção para o facto da ação de fungos de podridão associar-se a uma grande perda de características mecânicas, mesmo para pequenas perdas de massa (Henriques, 2011), podendo por isso ter consequências graves nas estruturas.

Muitos dos problemas de podridão localizada prendem-se com falta de manutenção da própria estrutura, nomeadamente com degradação da cobertura ou por infiltrações severas de águas da chuva ao nível do beiral, associadas à degradação de caleiras e algerozes do telhado. Neste sentido, a manutenção é fundamental para garantir a funcionalidade e segurança previstas para a vida útil da construção (Cruz, *et al.*, 1994).

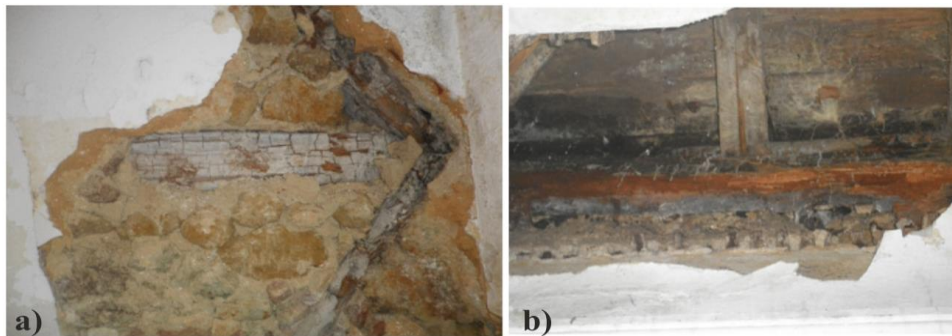


Figura 4.2 - a) Podridão cúbica em frontal pombalino; b) Podridão cúbica em vigas de pavimento, por rotura de canalizações. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)

Sempre que não seja possível garantir condições adequadas de bom funcionamento dos elementos de madeira é recomendável a adaptação de medidas complementares de proteção, como sejam disposições construtivas que reduzam a permanência da água na madeira (por ventilação), tratamentos preservadores e a escolha de espécies com durabilidade adequada para a função a desempenhar pelo elemento, tal como apresentado em 4.5.

### 4.3 Térmitas

As térmitas são insetos sociais com divisão de castas: as obreiras, causadoras dos maiores danos da madeira aplicada; os soldados, que têm um papel fundamental na defesa da colónia; os reprodutores alados, que surgem essencialmente na primavera e têm como função principal a dispersão das colónias (Nunes, 2006). No seu desenvolvimento, as diferentes castas sofrem uma metamorfose gradual, passando pelas fases de ovo, diversas fases de ninfas, até que atingem a idade adulta. Existem três grandes famílias de térmitas, as subterrâneas, as de madeira viva e as de madeira seca, totalizando cerca de 3000 espécies (Guerreiro, *et al.*, 2009). No entanto, apenas algumas são nefastas para as atividades humanas.

Em Portugal estão identificadas espécies de térmitas de madeira seca, como a *Kalotermes flviollis* (Fabricius) e *Cryptotermes brevis* (Walker), em algumas ilhas do arquipélago dos Açores e no arquipélago da Madeira, tendo sido recentemente identificadas também nas imediações do porto de Lisboa (Nunes, *et al.*, 2010).

As espécies de térmitas subterrâneas presentes em Portugal pertencem à espécie *Reticulitermes grassei* (Clément) e encontram-se largamente difundidas pelo território nacional (Nunes, 2006). De facto, por se alimentarem fundamentalmente de celulose, ocorrem nas raízes e cepos de árvores e arbustos, ou em qualquer outro material lenhoso existente no solo, desde que as condições ambientais assim o permitam, nomeadamente a existência de teores de humidade elevados (Cruz & Nunes, 2005), situando-se geralmente acima dos 20% (Cruz, 2001). Transitam frequentemente do seu *habitat* natural (ninho) para as construções, através do solo ou pelo interior

de tubos de terra por elas formados, deslocando-se em fila e sempre a coberto da luz (Henriques, 2011).

#### 4.3.1 Patologias em edifícios

Um ataque por térmitas só é detetável numa fase avançada da infestação, pelo aparecimento de galerias ou “tubos” característicos feitos de terra no exterior dos elementos atacados, pelo aparecimento dos seus excrementos ou pela deteção de madeira degradada. Um outro sinal de infestação é a ocorrência de enxameações, durante as quais centenas de insetos adultos alados saem por aberturas na madeira e voam para a luz, acasalando e perdendo as asas, podendo assim infestar outras madeiras que apresentem condições propícias (Cruz, 2001). Neste caso, o que normalmente se consegue detetar são apenas as asas dos alados, devendo-se desde logo tomar medidas adequadas. Podem ainda aparecer galerias com concreções terrosas, por vezes semelhantes a favos, nas zonas de contacto da madeira com as alvenarias ou no interior de tijolos (Cruz & Nunes, 2005). Além disso, a madeira atacada pode parecer sã até que se esboroa, pois, embora as térmitas consumam o interior da madeira, deixam a camada exterior intacta.

Este agente ataca com maior facilidade os pisos térreos, podendo no entanto atacar pisos elevados se o seu acesso for facilitado pela existência de terraços ajardinados, acumulação de terra e água em zonas de cobertura ou no caso de se processar pelo interior das alvenarias, por exemplo em edifícios com estrutura de gaiola em madeira (Nunes, *et al.*, 1990).

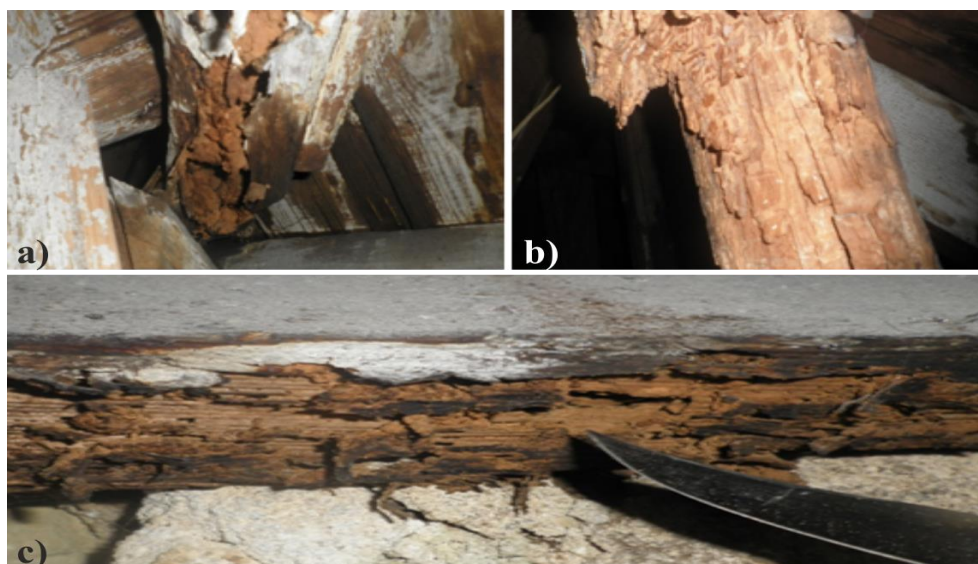


Figura 4.3 - a); b); c) Degradação por térmitas em estrutura da cobertura do Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)

Quando às peças destruídas, apresentam por norma um aspeto laminado pela degradação das camadas de primavera, sem que as camadas de outono sejam lesadas.

As questões de manutenção e inspeção são essenciais para combater o ataque destes agentes. Contudo, devido ao facto de aquando da construção não terem sido previstos, muitas vezes não

existem acessos fáceis a zonas de inspeção, pelo que a deteção de problemas só ocorre quando se verificam cedências da estrutura (Cruz, *et al.*, 1994).

Na construção, as madeiras nacionais usadas, em especial o Pinho bravo, são suscetíveis ao ataque de térmitas subterrâneas. Já as madeiras tropicais apresentam uma certa resistência, nomeadamente ao nível do cerne (Cruz & Nunes, 2005).

#### 4.4 Carunchos

Os carunchos, insetos de ciclo lavar completo, apresentam uma vasta diversidade de espécies. É no entanto de distinguir o *hylotrupes bajulus* L., o caruncho grande, cuja larva mede entre 10 e 30 mm e normalmente só ataca o borne de resinosas, e o caruncho pequeno, nomeadamente das espécies *Anobium punctatum* (De Geer), cuja larva mede entre 2 a 4 mm e só ataca o borne de folhosas e resinosas, e *Lyctus Brunneus* (Steph.), cuja larva mede entre 4 e 5 mm, só atacando o borne das folhosas ricas em amido (Henriques, 2011). O ataque de caruncho grande ocorre em madeiras secas e mantidas a temperaturas superiores a 10°C, sendo que as temperaturas ideais para o desenvolvimento desta espécie de caruncho situam-se entre os 28 e os 31°C (Henriques *et al.*, 2007, citando, Rasmussen, 1961). Por norma, a degradação dá-se em madeira seca, mas pode ocorrer para teores em água acima dos 18% (Nunes, 1997). É ainda de referir que o cerne é por norma durável relativamente ao ataque destes insetos, sendo o borne durável ou suscetível consoante a espécie, como exposto em 4.5.

Quanto ao seu ciclo de vida, são seres vivos de metamorfose completa, passando por quatro fases de desenvolvimento: ovo, larva, pupa e adulto. Os insetos adultos depositam os seus ovos em fendas ou juntas e a larva que daí nasce penetra a peça, abrindo galerias enquanto se desenvolve, pelo consumo do amido ou celulose da madeira, deixando um vestígio designado por serrim. Normalmente na primavera e verão, quando o período larvar se aproxima do fim, a larva desloca-se para perto da superfície da madeira e constrói o casulo, no interior do qual se encerra para se transformar em inseto perfeito, imergindo depois e deixando aberto o orifício de saída.

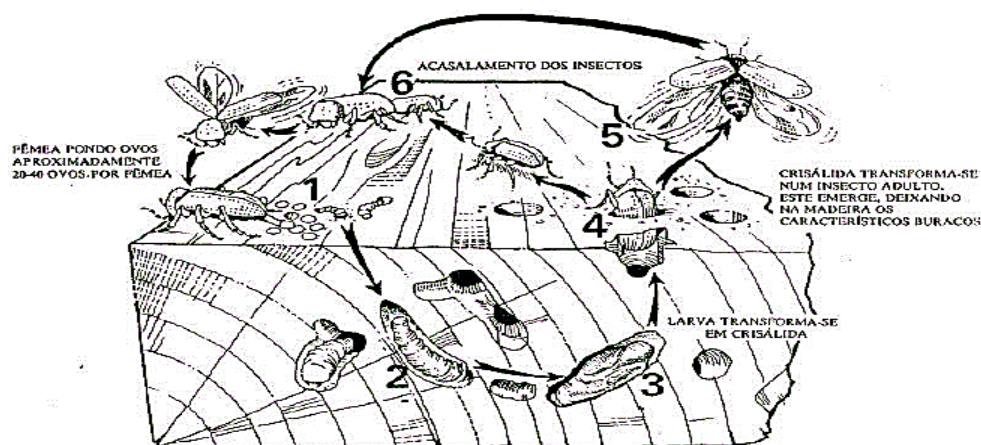


Figura 4.4 - Ciclo de vida do caruncho. (Henriques, 2011, adaptado de Berry, 1994)

Os carunchos adultos, que não se alimentam, voam e depositam os ovos depois de acasalar, espalhando assim a infestação (Henriques, *et al.*, 2007).

O tempo de vida destes organismos pode variar entre 2 e 11 anos para o caruncho grande e cerca de 2 anos para o caruncho pequeno, variando consoante a espécie, as disponibilidades alimentares, a humidade e a temperatura do ambiente.

#### 4.4.1 Patologias em edifícios

A degradação causada por caruncho associa-se a madeiras estruturais, pavimentos e coberturas, sendo característico do caruncho pequeno o ataque a mobiliário fixo e carpintaria de limpos (madeira à vista) (Cruz, *et al.*, 1994).

Muitas vezes, o orifício de saída é o único sinal visível do ataque. Contudo, a deteção de atividade larvar (ativa ou não) pode fazer-se também através do aparecimento de montículos de serrim ou pelo enrugamento das superfícies por elevação da película superficial em função da acumulação de serrim nas galerias. As larvas de caruncho grande podem ainda ser identificadas pelo ruído característico que produzem ao roerem a madeira (Henriques, *et al.*, 2007).

Na tabela seguinte identificam-se características dos ataques preconizados por cada uma das espécies mais comuns referidas em 4.4.

Inseto	Habitat	Sintomas		
		Orifícios de saída	Serrim	Outros
<i>Hylotrupes bajulus L</i>	Resinosas	Ovais com 6 a 10 mm	Serrim granuloso que surge junto dos orifícios de saída e galerias	Empolamento da superfície da madeira, particularmente quando existe um revestimento contínuo como uma tinta
<i>Anobium punctatum</i>	Resinosas e Folhosas	Circulares com 1 a 3 mm	Montículos de serrim formados por pequenos grânulos elipsoidais	Muitas vezes associado a madeiras mais velhas e já com ataques por fungos de podridão
<i>Lyctus Brunneus</i>	Folhosas ricas em amido	Circulares com 1 a 2 mm	Serrim muito fino, semelhante a farinha, que forma pequenos montículos	-

Tabela 4.1 - Características do ataque de carunchos. Adaptado de Cruz & Nunes, 2005

A presença de caruncho grande é muito menos visível do que a de caruncho pequeno, por os orifícios de saída não serem redondos, mas sim ranhuras oblíquas normalmente preenchidas por serrim da cor da madeira, e de este normalmente não ser empurrado para fora, mas permanecer

compacto no interior das galerias (Henriques, 2011, citando, LNEC, 1967). Quanto à degradação, as galerias de caruncho grande chegam a ser 4 vezes mais largas, sendo por isso o seu ataque, de uma forma geral, muito mais nocivo. Não parece haver, no entanto, uma relação clara entre a quantidade de orifícios de saída visíveis e as características mecânicas do elemento atacado (Cruz & Machado, 2013), sendo essencial conhecer o real estado de degradação.

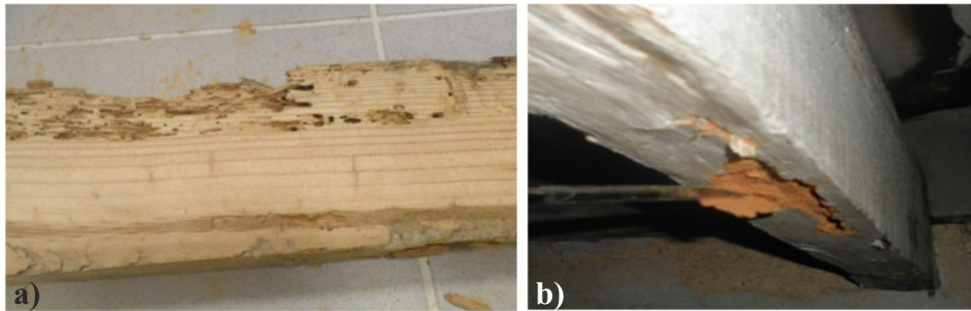


Figura 4.5 - a) Ataque de caruncho restrito ao borne da peça; b) Remoção da película superficial por objeto cortante e deteção de galerias preenchidas por serrim. Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)

Esta avaliação é possível através de um objeto cortante que desfaça a película superficial das peças atacadas. Desta forma, um dos utensílios utilizados numa primeira inspeção deve ser a faca ou objeto similar.

Como referido em 4.4, o ataque concentra-se na zona do borne, sendo por isso importante o seu tratamento quando o risco for elevado, principalmente se as peças apresentarem grande percentagem de borne.

#### 4.5 Durabilidade natural

Como se apresentou anteriormente, as madeiras não são todas afetadas de igual forma pela ação dos agentes biológicos, isto é, a eventual suscetibilidade ao seu ataque é uma característica intrínseca da espécie da madeira em causa (Cruz, 2001). A isto chama-se durabilidade natural e é definida pela norma NP EN 350-1:2008 – *Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Parte 1: Guia dos princípios de ensaio e classificação da durabilidade natural da madeira.*

Contudo, ainda que a madeira seja suscetível ao ataque de determinado agente, o mesmo só se verifica se existirem condições favoráveis ao seu desenvolvimento, como sejam temperatura ambiente, ar e humidade em quantidades adequadas a cada um deles. Neste sentido, é sempre necessário estimar os riscos a que a madeira vai ficar exposta na construção e definir a espécie mais adequada ao fim a que se destina.

Para o efeito, existem várias normativas europeias, algumas já transpostas para o panorama português (NP EN), das quais se destacam:

- NP EN 350-1:2008 – *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.* – Estabelece os diferentes sistemas de classificação para descrever a durabilidade natural da madeira;
- EN 350-2:1994 – *Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.* – Estabelece a durabilidade e tratamento de espécies de madeira de grande importância na Europa. Define a impregnabilidade para o cerne e o borne e apresenta a largura corrente do borne;
- EN 351-1:2007 – *Durability of wood and wood-based products. Preservative-treated solid wood. Part 1: Classification of preservative penetration and retention.* – Estabelece os sistemas utilizados para classificar a madeira tratada;
- EN 351-2:2007 – *Durability of wood and wood-based products. Preservative-treated solid wood. Part 2: Guidance on sampling for the analysis of preservative-treated wood.* – Estabelece os sistemas utilizados para classificar a madeira tratada de espécies de grande importância na Europa;
- NP EN 335-1: 2011 – *Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira. Definição das classes de risco. Parte 1: Generalidades.* – Estabelece a exigência de características particulares de durabilidade;
- NP EN 335-2: 2011 – *Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira. Definição das classes de risco. Parte 2: Aplicação à madeira maciça.* – Estabelece as classes de risco para madeira não tratada;
- NP EN 460: 1995 – *Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco.* – Fornece indicações para a escolha das espécies de madeira em função da classe de risco. Relaciona a durabilidade natural com a tempo de serviço esperado para os diferentes elementos de madeira na construção.

A durabilidade natural da madeira apresenta uma grande variedade em função da espécie em causa, e ainda entre o cerne e o borne, apresentando-se para todos os casos, maior na madeira de cerne do que na de borne (Henriques, 2011, citando, Nunes & Sousa, 1995).

Pode ainda considerar-se a aplicação de um tratamento correto por aplicação de produtos preservadores, por forma a obter o nível de retenção mínimo adequado ao risco (Cruz, *et al.*, 1994). Para tal, o produto escolhido deve seguir o estabelecido na EN 599-1:2009: *Durability of wood and wood-based products — Efficacy of preventive wood preservatives as determined by biological tests. Part 1: Specification according to use class.*

### **4.5.1 Classes de risco da madeira em edifícios**

Como referido, as normas NP EN 335-1:2011 e NP EN 335-2:2011 estabelecem as classes de risco e situações de serviço genéricas para elementos de madeira maciça não tratados, em função do risco de ataque de agentes biológicos e das suas consequências. Estabelecem-se então 5 classes de risco (Cruz & Nunes, 2005).

#### **4.5.1.1 Classe de risco 1**

Refere-se a madeira em ambientes interiores, permanentemente seca. Consideram-se teores de água inferiores a 20% em todo o elemento e ao longo do seu tempo de serviço, sendo insignificante o risco de instalação de bolores ou fungos. O ataque por caruncho ou térmitas da madeira seca é possível, em função da localização geográfica da construção.

#### **4.5.1.2 Classe de risco 2**

Trata de madeiras em ambientes interiores, geralmente seca mas podendo ultrapassar temporariamente 20% de teor em água. Existe assim risco de ataque por fungos de podridão castanha, fungos cromogéneos ou por bolores superficiais. Pode ocorrer ataque por caruncho, térmitas da madeira seca ou ainda térmitas subterrâneas.

#### **4.5.1.3 Classe de risco 3**

Refere-se a madeiras exteriores ou expostas a humedecimento, sem contacto com o solo e frequentemente com teores em água superiores a 20%. Esta classe divide-se em duas subclasses, 3.1 e 3.2, para madeiras protegidas ou não protegidas respetivamente, sendo que nesta última, a possibilidade de teores em água superiores a 20% é mais elevada. Existe possibilidade de ataque por bolores superficiais, fungos cromogéneos, fungos de podridão castanha ou branca e ainda um risco de ataque por insetos semelhante ao da classe 2.

#### **4.5.1.4 Classe de risco 4**

Para madeiras no exterior, em contacto com o solo ou com água doce. Também nesta classe existem duas subclasses, 4.1 e 4.2, sendo que a última refere-se a um contacto mais severo com o solo e/ou água, em que o teor em água está permanentemente acima dos 20%. Existe risco de ataque por caruncho e térmitas de madeira seca em zonas eventualmente acima do solo, e por fungos cromogéneos ou dos vários tipos de podridão e ainda por térmitas subterrâneas nas zonas permanentemente húmidas.

#### 4.5.1.5 Classe de risco 5

Trata de madeira em contacto com água salgada. Neste caso, o ataque por xilófagos marinhos é o principal risco, mas pode igualmente estar sujeita ao ataque de qualquer dos agentes referente à classe de risco 4

Como resumo, apresenta-se a tabela seguinte.

Classes de risco	Situações gerais de serviço	Exposição à humidade	Teor de água da madeira	Principais agentes biológicos
1	sem contacto com o solo, sob coberto (ex: pavimentos)	nenhuma	20% no máximo	carunchos térmitas
2	sem contacto com o solo, sob coberto mas com risco de humedificação (ex: estruturas de cobertura)	ocasional	ocasionalmente >20%	carunchos térmitas podridão castanha
3	sem contacto com o solo, não coberto (ex: caixilharia)	frequente	frequentemente >20%	carunchos térmitas podridão castanha podridão branca
4	em contacto com o solo ou água doce (ex: fundações)	permanente	Permanentemente >20%	carunchos térmitas podridão castanha podridão branca podridão mole
5	na água salgada (ex: pontões)	permanente	Permanentemente >20%	CR 4 + xilófagos marinhos

Tabela 4.2 - Resumo das classes de risco (Cruz & Nunes, 2005)

As diferentes classes de risco determinam exigências específicas quanto à durabilidade natural das madeiras a utilizar ou quanto ao eventual tratamento preservador a aplicar. Informação sobre este assunto pode ser encontrada nas normas europeias EN335-2:2011, EN460:1995 e EN 599-1:2009.

É de referir ainda que, se a classe de risco for convenientemente estimada e a madeira devidamente tratada e utilizada, sendo submetida a um tratamento preservador quando necessário, a possibilidade de casos graves de degradação biológica é bastante reduzida (Cruz & Nunes, 2005).

## 5 Técnicas de inspeção e diagnóstico, tratamento e consolidação

Pretende-se neste capítulo fazer uma apresentação das técnicas de inspeção e diagnóstico, expondo, de forma sintética, as várias etapas deste processo. Tem-se ainda como objetivo distinguir técnicas destrutivas (TD) e não destrutivas (TND), apresentando alguns exemplos destas, ao mesmo tempo que se explica os seus pressupostos. Fornece-se ainda informação quanto aos processos de tratamento e de consolidação de elementos mediantemente degradados por fungos, apresentando-se o processo utilizado no presente estudo.

### 5.1 Introdução

No sentido de conhecer as reais condições de serviço de um edifício com estrutura em madeira, é essencial a realização de campanhas de inspeção periódicas. Estas têm como objetivo avaliar o estado de conservação das madeiras e estabelecer ações de manutenção que permitam sustentar a progressão dos processos de deterioração em curso, bem como manter ou repor o nível de desempenho dos componentes e dos edifícios em geral (Cruz, et al., 1999). Estas campanhas devem recair sobre todas as peças da estrutura, com o objetivo de interpretar corretamente os sintomas, distinguir as anomalias reversíveis das irreversíveis e conferir a cada uma a sua efetiva importância, no sentido de reduzir os imprevistos e garantir o êxito da própria intervenção (Henriques, 2011).

É de referir que a rigorosa identificação do estado de conservação da estrutura obrigaria à utilização de técnicas destrutivas (TD) com a recolha de carotes para ensaios laboratoriais. Contudo, essa solução apresenta-se inadmissível na maioria dos casos e o recurso a inspeções visuais e a técnicas não destrutivas (TND) é a opção (Valle, et al., 2006; Tannert, et al., 2010). Também a procura de informação como a idade e a história do edifício poderão constituir uma ajuda preciosa na interpretação do funcionamento da estrutura, na caracterização dos materiais e avaliação da sua capacidade resistente (Cruz, 2011; Cruz, et al., 2013).

A inspeção visual toma especial importância, uma vez que permite ter uma noção geral do problema e estabelecer um plano de inspeção detalhado conseqüente, que seja adequado ao tipo de construção e ao seu estado geral. Em função desta primeira análise, que pode recorrer a instrumentos simples, como a uma faca ou formão para confirmar a existência de degradação, pode concluir-se sobre a necessidade do uso de técnicas complementares de diagnóstico por recurso a equipamentos mais sofisticados (Ramundo, et al., 2011). São exemplo destes equipamentos, o *Pilodyn*® de Görlacher (1987), o *Resistograph*® de Rinn (1994), e outros, assentes em tecnologias como a termografia, os ultra-sons, os raios-X, entre outras.

Contudo, nenhuma destas técnicas, embora bastante úteis, é capaz de substituir uma análise pessoal cuidada, já que cada uma delas se destina a avaliar apenas um determinado aspeto do material. Exigem normalmente uma calibração prévia para as espécies em estudo e para as condições particulares de utilização dos aparelhos (Cruz, 2011). Assim, é importante conhecer as espécies em estudo, através da história do edifício e processos construtivos da época ou, quando indispensável, por análise laboratorial. Pode então afirmar-se que um processo de avaliação eficaz recorre muitas vezes a técnicas que se complementam, e a uma correlação de dados adequada e objetiva (Ramundo, *et al.*, 2011; Jasienko, *et al.*, 2013; Machado, 2013).

É ainda de salientar que um grande número de danos em estruturas antigas de madeira ocorre após ações de restauro impróprias (Henriques, 2001, citando, Bonamini, 1995), muitas vezes por alterações do tipo e intensidade das cargas atuantes ou alterações microclimáticas do ambiente interior, por colocação de isolamentos ou instalações de ar condicionado, entre outros. Chama-se então a atenção para a necessidade de estimar os ambientes pós-intervenção, no sentido de não comprometer a mesma.

## 5.2 Metodologia a seguir

Com o objetivo de estabelecer a eventual necessidade de reforço e/ou tratamento dos elementos de madeira, assim como para definir o tipo de produtos de tratamento e os métodos adequados a cada situação, deve seguir-se a seguinte metodologia: 1) Inspeção visual; 2) Utilização de meios auxiliares de diagnóstico; 3) Tratamento de dados e decisão.

### 5.2.1 Inspeção visual

A inspeção visual tem início no exterior do edifício, com a pesquisa de possíveis situações responsáveis pela entrada de água e consequente degradação, como é o caso de fissuras, fendas, telhas partidas, rebocos desagregados, entre outros indícios como a presença de vegetação ou algerozes e caleiras danificadas ou entupidos (Cruz, *et al.*, 1999; Henriques, 2011).

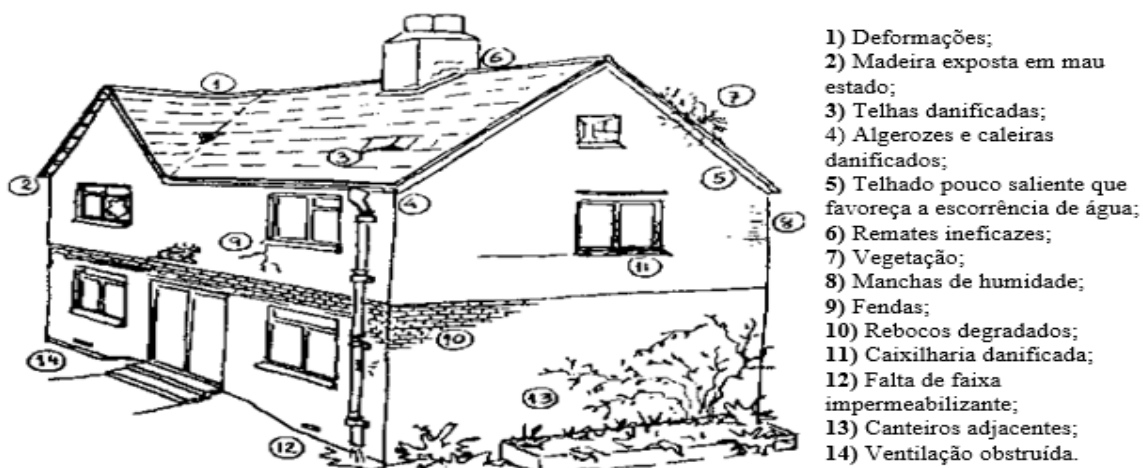


Figura 5.1 - Procura de anomalias no exterior. Adaptado de Cruz *et al.*, 1999

Os defeitos detetados no exterior do edifício, devem depois ser seguidos no interior para avaliar o seu verdadeiro significado e respetiva importância.

Deve ainda prestar-se especial atenção à madeira na proximidade de redes de água ou esgotos e locais mal ventiladas, assim como a paredes húmidas (Cruz, 2011) e a outros indícios como deformação excessiva de tetos ou pavimentos, manchas na madeira aplicada, presença de serrim, a existência de canais de terra sobre a madeira ou aderentes às alvenarias próximas, cheiro intenso a “mofo”, entre outros (Cruz, et al., 1999). Sempre que se revelem situações de risco, devem ser investigadas, mediante a realização de prospeções e, sempre que possível, de acesso direto aos elementos. De facto, o contacto direto, bem como a possibilidade de observação sob todos os ângulos, revela-se absolutamente necessário em algumas situações, como no caso da existência de sinais diferidos de degradação, o que pode implicar retirar todos os elementos que impossibilitem o acesso (Feio & Lourenço, 2005). Chama-se a atenção para intervenções em edifícios de interesse histórico ou artístico, os quais podem apresentar problemas acrescidos, quer pela necessária conservação do aspeto dos elementos ou de eventuais decorações, quer pelas sucessivas intervenções do passado.

Pode afirmar-se então que, a inspeção visual passa por uma análise direta da madeira, quer por observação, quer por auxílio de objeto cortante simples, consistindo num levantamento geral da estrutura e dos seus danos, que servirá de base para um plano de intervenção, onde se definem depois os meios auxiliares a utilizar caso se justifique.

### 5.2.2 Meios auxiliares de diagnóstico

Efetuada a inspeção visual é comum avaliar a extensão da zona afetada e estimar o nível de danos no sentido de definir a estratégia de reabilitação a adotar. Para isso recorre-se a equipamentos mais ou menos sofisticados para identificar defeitos ocultos ou alterações na estrutura em partes não visíveis, assim como para tentar estimar características físico-mecânicas (Ramundo, et al., 2011). Deste modo, existe um conjunto de técnicas, umas mais expeditas outras mais complexas, que permitem em muitos casos estimar ou conhecer as condições dos elementos de madeira.

Dentro destes ensaios, os não destrutivos, é comum fazer-se uma distinção em função do carácter mais ou menos global dos seus resultados. Assim, tem-se os métodos locais de ensaio (MLE), que auxiliam diretamente a inspeção visual, como é o caso do *Resistograph*® e do *Pilodyn*®, e os métodos globais de ensaio (MGE), que embora sejam difíceis de implantar *in situ*, apresentam a capacidade de avaliar globalmente as peças (Morales, et al., 2013). Neste grupo incluem-se os ultra-sons e outros métodos de propagação de ondas (Feio & Lourenço, 2005).

De seguida, faz-se uma breve apresentação dos métodos não destrutivos mais utilizados, começando-se pelo *Resistograph*®, que mede a resistência da madeira à perfuração por meio de uma broca. É bastante útil na deteção de defeitos internos ou degradação pela análise da variação

dos perfis de densidade dos elementos ensaiados, assim como na estimativa de propriedades físico-mecânicas, como é exemplo a massa volúmica (Campos, *et al.*, 2013; Morales, *et al.*, 2013). O seu funcionamento aproxima-se ao de um berbequim, com uma agulha de diâmetro máximo de 3 mm na ponta, e comprimento variável conforme o modelo comercial, não apresentando a sua ação qualquer efeito sobre a resistência dos elementos inspecionados. Em função da espécie e das condições de aplicação, é necessária uma calibração prévia do aparelho. Permite a leitura de perfis de densidade das peças atravessadas, sendo estes armazenados em memória interna ou impressos instantaneamente em tamanho real.

A resistência à perfuração é registada a cada 0,04 mm e o valor médio, excluindo 2 mm a partir de cada extremidade do gráfico para eliminar as perturbações, fornece a medida resistográfica, válida para madeira sã e isenta de defeitos, e dada pela seguinte expressão (Feio, 2006; Lourenço, *et al.*, 2007; Morales, *et al.*, 2013):

$$MR = \frac{\int_0^h Area}{h}$$

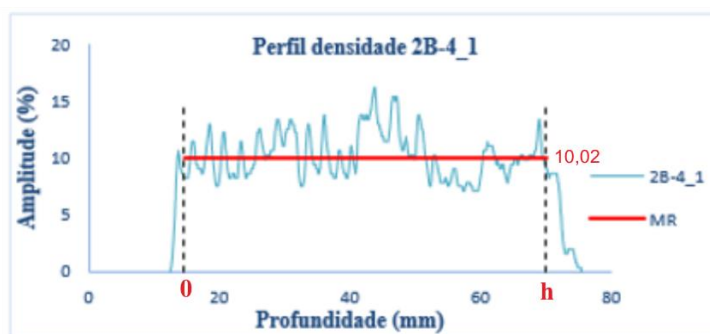


Figura 5.2 - Exemplo do tratamento de um perfil de densidade

A necessidade de colocar o aparelho perpendicular aos elementos em estudo, assim como o próprio procedimento de teste, com a utilização de ambas as mãos, pode constituir limitações ao seu uso (Feio & Lourenço, 2005).

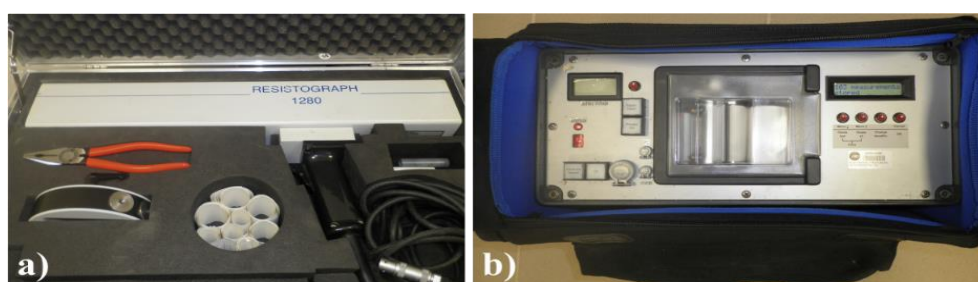


Figura 5.3 - Resistograph® IML- Resi-B-1280

Já o *Pilodyn*® consiste na introdução de um pino metálico na madeira por impacto com determinada energia, baseando-se o seu resultado na relação inversamente proporcional da penetração e dureza da madeira na direção transversal (Teles & Valle, 2001; Hasníková & Kuklík, 2013). A profundidade de penetração pode constituir uma medida da intensidade e profundidade da degradação devida a fungos de podridão ou outros agentes destruidores (Cruz, *et al.*, 1999), devendo fazer-se várias repetições do ensaio para representatividade dos resultados. Quanto ao

aparelho, existem várias versões, mas todas assentam na introdução de um pino metálico de 2,5 mm de diâmetro através da libertação de uma mola de rigidez conhecida que transforma a energia potencial elástica em energia de impacto (Jasienko, *et al.*, 2013). Vários estudos (Lladró, et al., 2006; Feio, 2006; Henriques, 2011; Gorlacher, 1987; Machado & Cruz, 1997) apontam para a possibilidade de correlações entre os resultados dos ensaios com *Resistograph*® e *Pilodyn*® e as propriedades mecânicas dos elementos.



Figura 5.4 - *Pilodyn*® 6J

Uma desvantagem real consiste em só medir as propriedades superficiais (até 40 mm). Além disso, a profundidade de penetração é significativamente afetada pela humidade, devendo por isso fazer-se um controlo desta variável, com recurso por exemplo a um higrómetro de superfície (Zombori, 2001).

Dentro dos métodos globais de ensaio destacam-se os ultra-sons, através de equipamentos como o *Sylvateste* ou o *Pundit plus*, que relacionam o tempo de propagação de uma onda ultra-sónica, entre topos ou faces opostas de um elemento, com uma estimativa do módulo de elasticidade dinâmico, que por sua vez se relaciona com o módulo de elasticidade estático (Cruz, et al., 1999; Hasníková & Kuklík, 2013). Para a madeira, as frequências utilizadas variam entre 20 e 500 KHz, em função das suas propriedades elásticas.

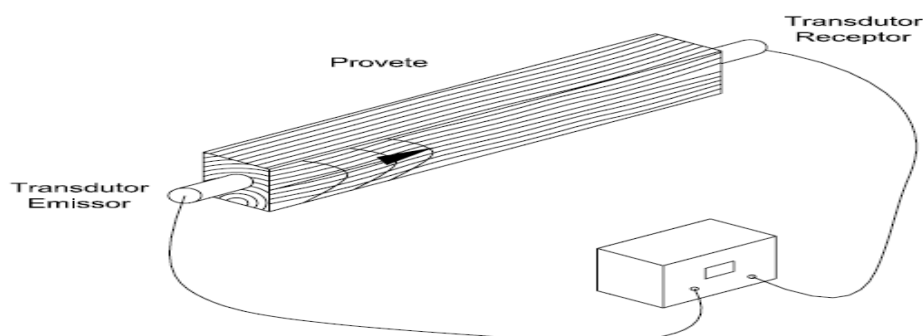


Figura 5.5 - Funcionamento de ultra-sons (Feio & Lourenço, 2005)

Outro exemplo, os raios-X, um dos primeiros métodos a ser estudado e aplicado, baseia-se no facto da penetração deste tipo de radiação ser dependente, entre outros fatores, da densidade e espessura do material, permitindo assim a identificação de ataques xilófagos por deteção de perdas de massa (Feio & Lourenço, 2005). Permite igualmente identificar fendas ou outras discontinuidades. Contudo, o custo elevado dos equipamentos e a perigosidade da radiação tem levado ao abandono deste tipo de técnica. Recentemente, desenvolveu-se um outro aparelho, o

RDS – *Radiological Density Scanning*, baseado em radiação gama, menos perigosa, e que permite igualmente determinar variações de densidade (Cruz, et al., 1999; Posta, et al., 2013).

Outras técnicas como a emissão acústica, que pretende relacionar o nível de emissão acústica com o número de agentes responsáveis pela degradação dos elementos, assim como a medição da frequência própria de vibração de elementos estruturais, por aplicação de um impacto e interpretação do funcionamento da estrutura, são novas alternativas entre os meios auxiliares de diagnóstico. No entanto, a realidade é que, embora existam inúmeras técnicas não destrutivas possíveis de utilizar, infelizmente nenhuma é capaz de fazer uma descrição completa dos elementos, devendo por isso ser utilizada mais do que uma técnica para avaliações *in situ*, no sentido de se complementarem (Jasienko, et al., 2013; Machado, 2013).

### **5.2.3 Tratamento de dados e decisão**

A inspeção visual e a utilização de meios auxiliares de diagnóstico devem permitir detetar eventuais problemas de degradação da madeira, identificar os agentes destruidores, a extensão e gravidade do ataque, assim como a possibilidade da sua irradiação. Neste sentido, após um processo de levantamento exaustivo, deve poder-se apontar um caminho a seguir no processo de reabilitação. É no entanto importante apresentar uma atitude crítica no que à reposição das condições originais diz respeito uma vez que, em algumas situações, existem erros de conceção estrutural que comprometem o funcionamento da estrutura, devendo estes ser igualmente corrigidos com a intervenção (Cruz, et al., 1999).

Pela estimativa das secções residuais resistentes e o conhecimento do estado das ligações existentes, torna-se possível tomar opções sobre a substituição integral de troços, a reparação de danos pouco profundos ou a consolidação de elementos, quando mediamente degradados (Henriques, 2011). A decisão pela reabilitação da estrutura ou de parte desta é frequentemente ditada por razões económicas, sendo porém, em algumas circunstâncias, a necessidade de preservar o património histórico ou cultural que impõe a recuperação da construção degradada, situação que geralmente determina o tipo de intervenção a realizar (Feio & Lourenço, 2005), nomeadamente pela preservação de elementos decorativos.

É de salientar que a falta de conhecimento nesta área conduz de forma tendenciosa à substituição de elementos por peças novas, uma vez que a interpretação correta dos sinais apresentados por uma estrutura de madeira só pode ser feita à luz da compreensão de todos os fenómenos que afetam este material, de forma a distinguir os efeitos reversíveis dos irreversíveis e aqueles de exclusiva importância estética dos que podem indicar degradação efetiva da segurança da construção.

### 5.3 Tratamento preservador

Como referido em 4.1, a madeira como material da construção, em virtude das suas características, está sujeita ao risco de degradação por diversos agentes biológicos. É então necessária uma atitude preventiva, por medidas que eliminem ou reduzam o risco de ataque, por colocação da madeira em condições naturais que impeçam o desenvolvimento dos agentes xilófagos, ou pela aplicação de tratamentos que se oponham às infestações prováveis (Cruz & Nunes, 2012).

Importa salientar que, sempre que se verifique o ataque biológico, as intervenções devem incluir medidas para evitar a progressão da degradação, sob pena de repetição das anomalias a curto prazo (Cruz, 2011; Noldt, 2007). Para o efeito, existem processos biológicos ou bioquímicos, como a introdução na madeira infestada de espécies inimigas, parasitas ou microorganismos, bem como o uso de feromonas. Existem também produtos químicos eficazes como é o caso dos fumigantes, os produtos absorsores de oxigénio, a modificação química e os preservadores líquidos, em pó ou em pasta.

No presente texto, e indo ao encontro dos estudos desenvolvidos por Henriques, 2011, apenas serão abordadas os produtos biocidas preservadores de madeira no estado líquido, aplicados como ação preventiva ou curativa, no caso de infestações em curso.

Este tipo de produtos, tendo em vista a sua possível utilização e eficácia, devem apresentar as seguintes propriedades: elevada toxicidade aos organismos xilófagos; baixa toxicidade ao homem e ao ambiente; elevado poder de penetração e permanência no interior da madeira; não alteração das características da madeira ou de outros elementos que com ela contactem; inodoro; de baixo custo e fácil aquisição (Clausen & Yang, 2007). Devido à dificuldade de reunir todas estas características num só produto, deve fazer-se uma seleção em função da situação de serviço do elemento a tratar, do tipo de madeira e natureza do tratamento, existindo produtos mais adequados que outros a determinado campo de aplicação. Torna-se assim imprescindível definir com clareza os objetivos e limitações na realização de um tratamento. Um fator preponderante para o conseguir é a correta determinação da classe de risco de aplicação de madeira maciça, conforme apresentado em 4.5.1. Se for bem determinada, pode prever-se a necessidade ou não de um tratamento preservador adequado às suas condições de utilização (Nunes, 2007).

É de referir que o emprego deste tipo de produtos, muitas vezes vistos como tóxicos, permitem prolongar a vida útil da madeira na construção, minimizando os custos das intervenções futuras e evitando o abate de novas árvores, assim como o desperdício de todos os recursos associados ao mesmo. Existe ainda, desde 1976, através da diretiva 76/769/CEE, um controlo das substâncias permitidas, assentes em questões ambientais. Atualmente, o DL 154/2012 de 16 de julho

estabelece a colocação no mercado dos produtos biocidas transpondo para o direito nacional a diretiva 98/8/CE do parlamento europeu e do conselho de 16 de Fevereiro de 1998 (Nunes, 2010). Quanto aos edifícios antigos, contendo muitas vezes madeiras não tratadas, nomeadamente de Pinho bravo e Casquinha, consideradas como não duráveis a pouco duráveis pela norma NP EN 350-2:2008, deverão estas ser submetidas a uma ação de tratamento, preventiva ou curativa, sempre que adequada, contribuindo assim para o prolongamento da vida útil do edifício. Este procedimento ganha especial importância em edifícios de valor histórico ou artístico, em que a substituição ou alteração de elementos pode conduzir à perda de património não recuperável. Nestes casos, as madeiras têm de ser tratadas *in situ* por processos manuais, normalmente de pincelagem ou aspersão, sendo necessário saber se o elemento terá sido tratado anteriormente e, se assim for, com que produto ou produtos (Henriques, 2011). Deve-se assim procurar conhecer a possível compatibilidade do produto a aplicar com a história dos elementos e a possibilidade da aplicação de um consolidante caso a peça se encontre já degradada e a sua recuperação seja viável. Foi neste âmbito que se desenvolveu o trabalho de Henriques, 2011, que ao estudar uma série de produtos preservadores de desenvolvimento recente, através de ensaios laboratoriais e *in situ*, concluiu pela eficaz penetração de um produto com base em boro, o Bora-Care, e ainda a sua possível aplicação em harmonia com um consolidante, o EPO 155, assunto que será abordado em 5.5. De facto, o boro apresenta-se como um excelente produto de tratamento, aliando propriedades fungicidas com boas características inseticidas, não apresentando grande perigo para o homem e para o ambiente, tendo por isso sido bastante utilizado sempre que o risco de deslavragem não seja um fator condicionante (Ramos, et al., 2005; Caldeira, 2010).

### 5.3.1 Bora-Care

Trata-se de um produto comercializado pela *Nisus Corporation* e fornecido numa concentração de 40% de DOT (Octaborato Dissódico Tetra-hidratado), necessitando por isso de diluição em água para ser utilizado. Segundo recomendação do fabricante, para madeira degradada por fungos, com espessura igual ou superior a 50 mm, a relação volumétrica deve ser de 1:1. Apresenta como características a reduzida toxicidade para mamíferos, bom poder fungicida e inseticida, promoção do aumento de resistência ao fogo da madeira, baixo custo e fácil manipulação. É indicado para o tratamento de madeira sujeita às classes de risco 1 e 2 definidas de acordo com a norma NP EN 335-1:2011 e apresentadas em 4.5.1, sendo que Henriques, 2011, ensaia a sua aplicação nesta vertente. Deve no entanto tomar-se em consideração, por ser um produto de base aquosa, o aumento do teor de água dos elementos a tratar, sendo aconselhada a ventilação das peças intervencionadas e o controlo desta propriedade, até à sua estabilização.

## 5.4 Consolidantes

O termo consolidação é definido na língua portuguesa como o processo de tornar mais sólido, firme ou estável, de solidificar, unir ou combinar.

Atualmente, como já referido, pretende-se conservar sempre que possível a madeira original nos edifícios. Para tal, existem diversas técnicas e produtos, sendo os consolidantes por impregnação, principalmente com base em produtos poliméricos, um grande contributo (Reinprecht, *et al.*, 2009).

Há autores, como Weaver, 1997, e Reinprecht, 2008, que defendem uma divisão entre as técnicas de consolidação, atribuindo ao restabelecimento das características físicas e mecânicas da madeira degradada a técnica de consolidação por impregnação. Esta recorre maioritariamente a produtos poliméricos de impregnação, que preenchem a zona degradada embebendo as células e espaços livres entre elas. Pretende-se assim conseguir características próximas das da madeira original após polimerização e ainda o estabelecimento de ligações com a madeira sã (Unger, *et al.*, 2001). Chama-se a atenção para o facto da consolidação da madeira por intermédio de produtos de impregnação ser uma técnica largamente aplicada a nível da conservação e restauro de obras de arte (Duarte, 2001), mas pouco aprofundada ao nível da engenharia civil (Henriques, *et al.*, 2010). Contudo, Reinprecht, 2008, e Henriques, 2011, defendem que as técnicas pertencentes a esta área podem e devem também ser aplicadas em elementos de edifícios.

Mais uma vez se refere que qualquer intervenção deve ser realizada em função das condições e necessidades do presente, mas respeitando os valores estéticos e históricos do edifício. Neste sentido caminha-se para, sempre que possível, as intervenções sejam realizadas *in situ*, com vista à conservação do património, simplicidade de execução e à economia da intervenção (Cruz, *et al.*, 1994; Piazza, 2003; Appleton, 2003).

É por este motivo que grande parte das intervenções em edifícios históricos são realizadas com o auxílio de produtos poliméricos (Cruz, *et al.*, 2000). De facto, vários estudos têm apontado para o seu bom desempenho e compatibilidade com a madeira (Reinprecht, *et al.*, 2009), sendo certo que mesmo que a experiência ainda não possa fornecer resultados a longo prazo, o estado de conservação dos produtos aplicados é em geral bom (Berti & Pizzo, 2004; Custódio, *et al.*, 2008).

### 5.4.1 Produtos Poliméricos

É então importante conhecer o que são polímeros e como se classificam. São macromoléculas constituídas pela repetição de pequenas e simples unidades químicas, os monómeros. Os materiais poliméricos por sua vez são um conjunto de polímeros cujos monómeros têm a capacidade de se ligar quimicamente entre si, formando uma cadeia sólida (Smith, 1998).

Pela diversidade estrutural que estas macromoléculas podem apresentar, nem sempre é fácil classificá-las. Contudo, uma classificação usual divide-as em três grandes grupos. Os polímeros naturais, semi-sintéticos e sintéticos, sendo que os polímeros sintéticos subdividem-se ainda em elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis (Smith, 1998).

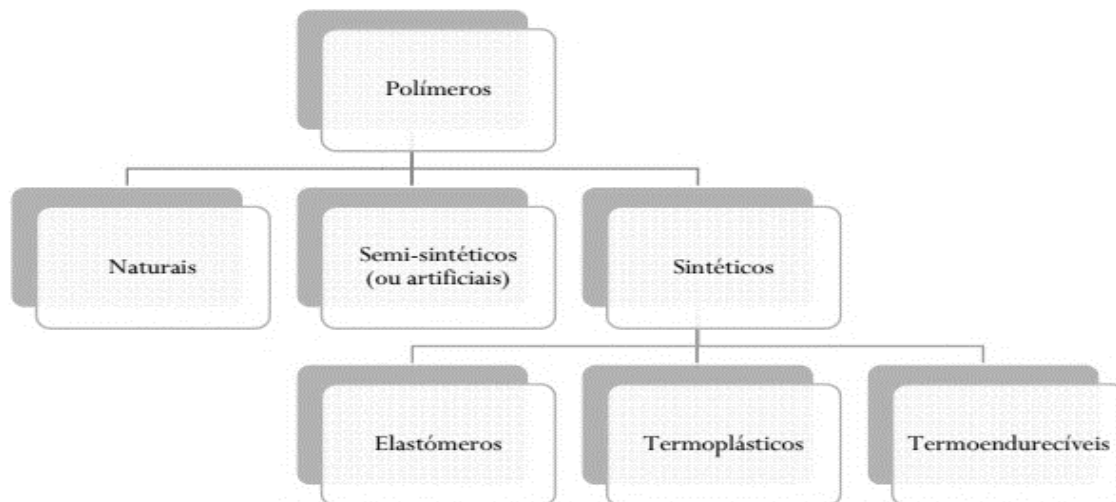


Figura 5.6 - Classificação dos polímeros. Adaptado de Anon., 2008

Quanto à sua forma de obtenção, os polímeros semi-sintéticos obtêm-se pela manufatura dos polímeros naturais e os polímeros sintéticos são produzidos por ação humana através de processos químicos adequados.

Dentro dos polímeros sintéticos, aqueles que detêm importância estrutural, os elastómeros apresentam-se como compostos de elevado grau de elasticidade, sofrendo grandes deformações por aplicação de tensões e restabelecendo as suas características iniciais quando removida a tensão. Já os termoplásticos e termoendurecíveis, os mais utilizados na conservação e reparação da madeira (Reinprecht, *et al.*, 2009), distinguem-se pela capacidade de serem fundidos e solidificados repetidamente, com ou sem perda das suas propriedades fundamentais, isto é, os termoplásticos suportam vários ciclos térmicos sem perda suas características, sendo que os termoendurecíveis apresentam-se na sua forma definitiva após sofrerem um ciclo térmico, não podendo ser aquecidos posteriormente sem deterioração permanente das suas propriedades iniciais (Anon., 2008). Esta distinção relaciona-se com a forma estrutural dos polímeros e das ligações intermoleculares, fracas no caso dos termoplásticos e fortes nos termoendurecíveis.

Sendo os polímeros plásticos (termoplásticos e termoendurecíveis) os mais utilizados na conservação e reparação de madeiras, é de referir que os consolidantes de características termoplásticas mais comuns são os baseados em resinas acrílicas, sendo as resinas epoxídicas, as mais comuns entre os materiais termoendurecíveis (Henriques, 2011).

As resinas acrílicas apresentam-se normalmente sob a forma de grânulos ou grãos que se dissolvem facilmente em solventes orgânicos, possibilitando posteriormente a sua aplicação em

madeiras. Quanto aos produtos epoxídicos destinados ao mesmo fim, são normalmente comercializados em sistemas bi-componentes de resina e endurecedor, podendo ainda ser adicionados solventes com o objetivo de diminuir a viscosidade do conjunto, melhorando desta forma a penetração na madeira. Estes produtos são correntemente considerados os mais adequados para as ações de intervenção da madeira de edifícios *in situ*, pela sua durabilidade, cura à temperatura ambiente, muito pequena ou nenhuma retração durante a cura, estabilidade dimensional após endurecimento, boa compatibilidade com outros materiais, excelente resistência mecânica e resistência a produtos químicos e água (Custódio, *et al.*, 2008; Duarte, 2001). Henriques, 2011, afirma mesmo que a madeira consolidada com produtos epoxídicos apresenta uma melhoria do comportamento mecânico.

De facto, alguns grupos de investigação têm-se dedicado a esta temática nos últimos anos. É exemplo o caso do LNEC, que juntamente com o IST e o ISA, que tendo como base a madeira de Pinho bravo degradada por fungos, levou a cabo uma investigação intitulada “validação dos materiais e sistemas de colagem / impregnação na recuperação de estruturas de madeira” (Henriques, 2011). Neste estudo, onde foi estudada a correlação entre a perda de massa e o ganho de resistência mecânica de madeiras tratadas com um polímero epoxídico e uma solução acrílica desenvolvida pelos autores, concluiu-se algum efeito de consolidação, deixando caminho para a realização de estudos futuros.

Mais tarde, Henriques, 2011, ao estudar uma série de sete consolidantes, entre epoxídicos e acrílicos, aplicados em conjunto com produtos de tratamento, concluiu a real eficácia de um produto epoxídico, o EPO 155, no ganho de resistência mecânica de madeira mediamente degradada por fungos.

#### **5.4.2 Consolidante EPO155**

De acordo com a informação do fabricante, este consolidante é um *“produto à base de resinas epoxídicas fluidas sem solvente, reticuláveis a frio sob ação de um endurecedor. Da mistura dos dois produtos numa relação de 2:1 em massa resulta uma massa adesiva de elevada flexibilidade e resistência mecânica, com resistência à tração superior a 30 MPa, resistência à compressão superior a 50 MPa e módulo de elasticidade superior a 1800 MPa”*.

De facto, com a realização de diversos ensaios, Henriques, 2011, verificou um conjunto de promissoras propriedades deste produto, quer aplicado em madeira não tratada, quer em madeira previamente tratada com biocidas selecionados. A baixa viscosidade e a constância de volume durante a cura, não variando significativamente, mesmo com o aumento da humidade, sugerem desde logo a sua aptidão para aplicação em obra. Após o tratamento de madeira com o consolidante, por imersão durante 15 minutos, outros resultados vieram confirmar a sua possível utilização em estruturas deste material. O EPO155 apresentou desde logo uma grande capacidade

de penetrar na madeira, a qual, associada à sua capacidade de retenção, isto é, de permanência após a cura, não deixou dúvidas quanto à sua eficácia, apresentando mesmo uma relação percentual entre quantidade absorvida e retida de cerca de 98,1%. Também no que à absorção de humidade da madeira após a aplicação do consolidante diz respeito, os resultados foram muito satisfatórios. O EPO155 permitiu que a madeira promovesse trocas gasosas com o meio em que se inseria, não favorecendo no entanto a absorção de água. De facto, o incremento máximo de teor de água foi de apenas 1.09% para os provetes tratados com este consolidante e submetidos a um ambiente controlado no interior de um exsiccador sob elevadas condições de humidade, durante 17 semanas. Após a mistura da resina com o endurecedor, tem início uma reação exotérmica que vai aumentando a viscosidade da mistura, apresentando a 25°C um *pot life* de 30 minutos, que diminui com o aumento da temperatura. Desta forma, só se deve preparar a mistura imediatamente antes da sua aplicação e sempre que possível mantê-la a uma baixa temperatura.

Pelos promissores resultados fornecidos, o EPO 155 foi o consolidante eleito para a campanha experimental da presente tese.

## 5.5 Compatibilidade do Bora-Care e EPO155

Como anteriormente referido, Henriques, 2011, estudou a compatibilidade entre sete produtos consolidantes acrílicos e poliméricos e três produtos preservadores líquidos aplicados previamente na madeira, tendo concluído que o par de melhor desempenho, para um tratamento prévio da madeira e uma posterior consolidação é Bora-Care, utilizado como preservador e EPO 155 como consolidante.

Embora se tenha verificado um pequeno decréscimo da capacidade consolidante do EPO 155 quando aplicado posteriormente ao Bora-Care, o desempenho do conjunto manteve-se bastante satisfatório, tendo-se destacado nos ensaios de compressão, dureza estática e flexão. De facto, o par evidenciou o melhor desempenho mecânico de entre as várias possibilidades estudados, sendo a variação das propriedades físico-mecânicas dos provetes degradados, tratados e consolidados, a apresentada na tabela seguinte.

Ensaio físico-mecânico Par de produtos	Absorção de água	Massa volumica	Compressão axial para <i>p.m.</i> =20%	Dureza estática para <i>p.m.</i> =20%	Flexão estática para <i>p.r.</i> =70%
BC-E	-8,1%*	35%	38,9%	107,7%	77,5%

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios laboratoriais do par de produtos (Henriques, 2011)

Henriques, 2011, desenvolveu ainda uma campanha experimental num edifício antigo, em diferentes elementos estruturais, com a realização de ensaios *in situ*, apresentando-se os resultados na tabela 5.2, sendo os mesmos coerentes com a campanha laboratorial.

Elemento \ Ensaio físico-mecânico	Teor de água superficial	Resistência à perfuração com <i>Resistograph</i>	Resistência ao impacto com <i>Pilodyn</i>
Viga de pavimento 1	0%	2,6%	7,6%
Viga de pavimento 2	-8,4%	35,6%	21,7%
Vara de cobertura	-5,3%	18,3%	4,7%

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios *in situ* do par de produtos (Henriques, 2011)

Desta forma, os estudos a efetuar irão utilizar este par de produtos no tratamento e consolidação de madeira mediantemente degradada por fungos.



## 6 Verificação das propriedades da madeira por ensaios laboratoriais

O presente capítulo pretende estabelecer uma série de correlações entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira estudada, *Pinus pinaster* Ait. e *Pinus sylvestris* L., tendo por base a realização de uma campanha laboratorial por ensaios destrutivos e não destrutivos, sobre provetes de 30 x 60 x 180 mm de madeira de Pinho bravo e Casquinha, recolhida de vários edifícios e com idades compreendidas entre 100 e 200 anos. Pretende ainda justificar a utilização do processo de tratamento e consolidação abordado nesta tese, através de ensaios laboratoriais que sustentem a sua adequabilidade.

### 6.1 Introdução

São utilizadas neste estudo madeiras de edifícios diversificados, com idades e história de carga diferentes, no sentido de abranger um grande número de situações existentes na cidade de Lisboa. Vários autores afirmam no entanto, que a idade e a história de carga por si só não originam perda significativa de propriedades mecânicas (Cruz, 2001; Cruz & Nunes, 2005; Eaton & Hale, 1993; Highley, 1999), considerando-se assim possível a realização desta campanha com madeiras estruturais de edifícios antigos no sentido de uma aproximação à realidade instalada.

Como referido, considera-se essencial conhecer as reais condições de serviço da madeira presente nos edifícios, não só por questões de segurança, mas pela incontornável necessidade de preservar o património histórico ou artístico de um país, conservando técnicas construtivas e elementos decorativos não mais recuperáveis.

É neste sentido que vários estudos têm vindo a ser publicados (Henriques, 2011; Machado & Cruz, 1997; Gorlacher, 1987; Branco, *et al.*, 2010; Lladro, *et al.*, 2006; Reinprecht, 2010; Nunes, *et al.*, 2005), caminhando-se para a obtenção do maior número de informação conseguida por técnicas não destrutivas

É com base neste pressuposto que se desenvolveu o trabalho laboratorial apresentado, pretendendo-se contribuir para o aumento da quantidade de informação recolhida *in situ*, pela simples aplicação de técnicas não destrutivas com os equipamentos *Resistograph*® e *Pilodyn*®. Pretendeu-se ainda testar o método de tratamento e consolidação apresentado em 5.5, fazendo a avaliação da sua eficácia através destes mesmos equipamentos.

É então, no sentido de se atingir os objetivos propostos, que se realizou a seguinte campanha de ensaio, dividida em três fases:

- Medição da massa volúmica, da resistência à compressão axial, da resistência à indentação, da resistência ao impacto com *Pilodyn*® e da resistência à perfuração com *Resistograph*® em 46 provetes sãos com borne e cerne;
- Medição da perda de massa após degradação, da resistência à compressão axial, da resistência à indentação, da resistência ao impacto com *Pilodyn*® e da resistência à perfuração com *Resistograph*® em 34 provetes de borne, degradados laboratorialmente por fungos de podridão;
- Tratamento e consolidação dos provetes degradados laboratorialmente por fungos e repetição dos ensaios realizados, no sentido de testar a eficácia do método de tratamento e consolidação abordado.

Os trabalhos foram levados a cabo entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), principalmente ao nível da degradação e aplicação do tratamento e consolidação, e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), sendo que todos os ensaios mecânicos foram realizados nesta última instituição pela sua experiência e capacidade logística.

## 6.2 Material e métodos

### 6.2.1 Provetes

Como referido, utilizaram-se provetes com 30 x 60 x 180 mm, de borne e de borne e cerne de *Pinus pinaster Ait.* e *Pinus sylvestris L.*, isentos de defeitos. A escolha destas dimensões seguiu trabalhos realizados por Henriques, 2011, que apresenta a seguinte justificação:

- 60 mm, de forma a possibilitar o ensaio com o *Resistograph*®, numa extensão considerada representativa;
- 30 mm, de forma a possibilitar o ensaio com o *Pilodyn*®;
- 180 mm, seis vezes a largura mínima da peça, por exigência da norma EN 408:2010.

Tentou-se sempre obter provetes com as fibras paralelas ao eixo da peça e os topos planos e perfeitamente perpendiculares às faces. Quanto à amostra, como referido, foi obtida em vários locais para aumentar o espetro de massas volúmicas e idades, tentando assim representar a madeira existente nas construções lisboetas da época Pombalina e pós-Pombalina.

Após estabilização a 12% de teor de água, conseguida por permanência em sala acondicionada, e confirmação desta de acordo com a norma NP-614:1973, registaram-se as três dimensões dos provetes com craveira manual. Pela posterior medição da massa, obtiveram-se as massas volúmicas, situando-se estas entre 400 kg/m<sup>3</sup> e 700 kg/m<sup>3</sup>, conforme se pode verificar nos anexos 6.1 e 6.6.

Resumidamente, pode então dizer-se que o processo de obtenção das amostras passou por três fases distintas, iniciando-se com a recolha de elementos estruturais de edifícios antigos e a sua preparação para o corte, com a respetiva limpeza e identificação de pregos. Seguiu-se o corte e posterior seleção dos provetes isentos de defeitos e com capacidade para serem ensaiados. Por fim, teve lugar a identificação dos provetes, com o respetivo registo das dimensões e pesagens, e a sua posterior colocação em sala acondicionada.



Figura 6.1 - a) Elementos originais; b) Após o corte; c) Após identificação; d) Colocação em sala acondicionada

Para conseguir correlacionar valores, formaram-se então pares de massas volúmicas semelhantes nos provetes de borne e cerne, ensaiando-se um elemento à compressão e o outro com o *Pilodyn*® e *Resistograph*®, sendo este ainda posteriormente ensaiado à dureza estática. No caso dos provetes de borne, postos a degradar de acordo com 6.2.4, estabeleceram-se grupos de ensaio para valores de massa volúmica inicial de  $495 \pm 26 \text{ kg/m}^3$ , para a realização dos ensaios de compressão e de  $434 \pm 14 \text{ kg/m}^3$  para a realização dos restantes ensaios.

#### 6.2.1.1 Medição do teor em água

Conforme referido em 2.2.1, a madeira apresentará um teor em água próximo de 12%, para condições ambientais de humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  e temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Uma vez que a maioria das normas tem este valor como referência, foram estas as condições da sala de acondicionamento.

Pela aplicação da norma NP-614:1973, que implica a secagem em estufa dos provetes, determinou-se a real percentagem de humidade relativa, tendo-se iniciado os ensaios quando as condições eram já muito próximas dos 12% de humidade relativa.

Uma outra forma, mais expedita, é o recurso ao higrómetro de superfície, o qual confirmou o valor de 12% requerido. No caso dos provetes degradados, o uso deste aparelho mostrou-se inadequado pela existência de pequenas fendas e rugosidades, resultantes da própria degradação.



Figura 6.2 - a) Provetes na estufa; b) Temperatura; c) Balança digital; d) Exsicadores; d) Higrómetro

## 6.2.2 Ensaios não destrutivos

### 6.2.2.1 Resistograph®

No presente estudo utilizou-se o equipamento IML Resi-B-1280, regulado para uma velocidade de penetração de 20 cm/min, isto é, na velocidade 4 segundo o manual do equipamento. Realizaram-se dois furos em cada provete, sendo a média destes o valor utilizado para estabelecer as correlações apresentadas ao longo deste capítulo. Todos os valores das medições são discriminados nos anexos 6.2, 6.7 e 6.10. Pretendeu-se com isto a obtenção de dados mais fidedignos, uma vez que a realização de duas medições permitiu a identificação de situações anómalas pela possível presença de algum defeito não identificável à partida.

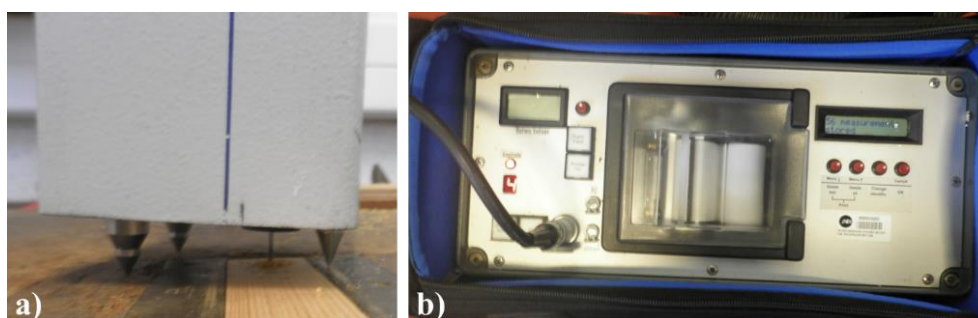


Figura 6.3 - a) Realização do ensaio; b) Unidade móvel do Resistograph®

Desta forma, obtiveram-se perfis de densidade com cerca de 60 mm de extensão, na direção ortogonal às fibras. Conforme apresentado em 5.2.2, o valor médio, excluindo 2 mm a partir de cada extremidade do gráfico, fornece a medida resistográfica, MR (Feio, 2006; Lourenço, et al., 2007; Morales, et al., 2013).

No caso dos provetes degradados, por se ter verificado que a degradação é mais significativa na zona superficial e seguindo estudos de Henriques, 2011, o valor de MR apresentado é o valor médio das medidas obtidas em 15 mm a partir de cada extremidade do perfil resistográfico, excluindo igualmente os 2 mm iniciais.

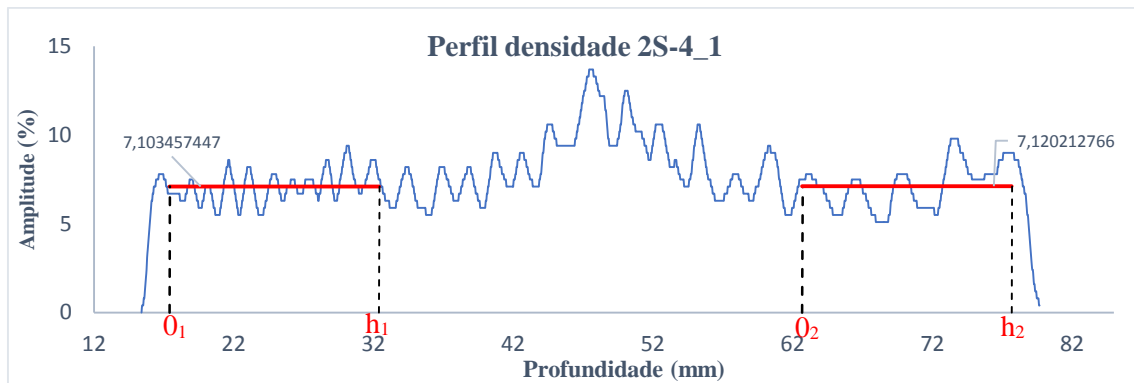


Figura 6.4 - Tratamento de perfis resistográficos de provetes degradados

O valor desta medida depende do tipo de aparelho, da sua calibração e do teor de água da madeira, pelo que deve ser interpretado por comparação com valores obtidos em condições idênticas (Machado & Cruz, 1997).

### 6.2.2.2 Pilodyn®

O equipamento utilizado foi o *Pilodyn*® 6J, tendo sido realizados quatro furos por cada provete, dois em cada direção, para representatividade dos resultados. O valor determinado é então a média desses 4 ensaios conforme se encontra nos anexos 6.2, 6.7 e 6.10.

O funcionamento do aparelho, como referido em 5.2.2, consiste na introdução de um pino metálico na madeira através da libertação de uma mola de rigidez conhecida que transforma a energia potencial elástica em energia de impacto (Feio & Lourenço, 2005). O resultado é lido no mostrador do aparelho enquanto este se encontra premido contra a madeira, sendo a escala de leitura de 0 a 40 mm, sem décimas.

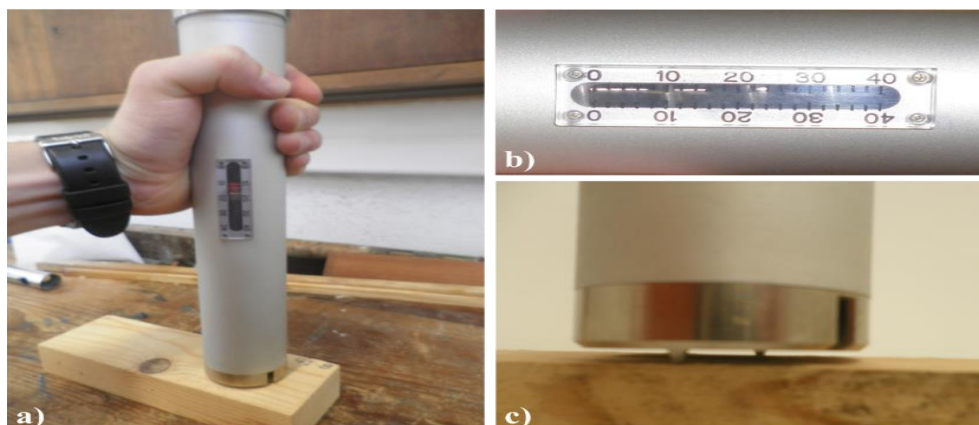


Figura 6.5 - a) Realização do ensaio; b) Escala de leitura; c) Posicionamento do *Pilodyn*®

À semelhança do que acontece com o *Resistograph*®, o resultado depende de alguns fatores, como o teor em água e as condições de atuação, pelo que as conclusões devem ser alcançadas por comparação com valores obtidos em situações idênticas.

### 6.2.3 Ensaios destrutivos

#### 6.2.3.1 Ensaio de dureza estática

Ainda nos mesmos provetes onde se realizaram os ensaios não destrutivos, realizou-se também um ensaio de dureza estática de acordo com a norma ISSO 3350:1975 – *Bois. Détermination de la dureté statique*. O grande objetivo deste ensaio passa pela determinação da resistência da madeira à cravação de uma semi-esfera na direção perpendicular às fibras.

O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal AMSLER de 4000 kg de capacidade, tendo sido utilizada uma esfera de raio igual a  $5,64 \pm 1$  mm, cravada a uma velocidade constante de 3 a 6 mm/min, sob carga progressivamente crescente. Uma vez que as condições de velocidade exigidas pela norma são as apresentadas, cada ensaio teve uma duração aproximada de 1 minuto.

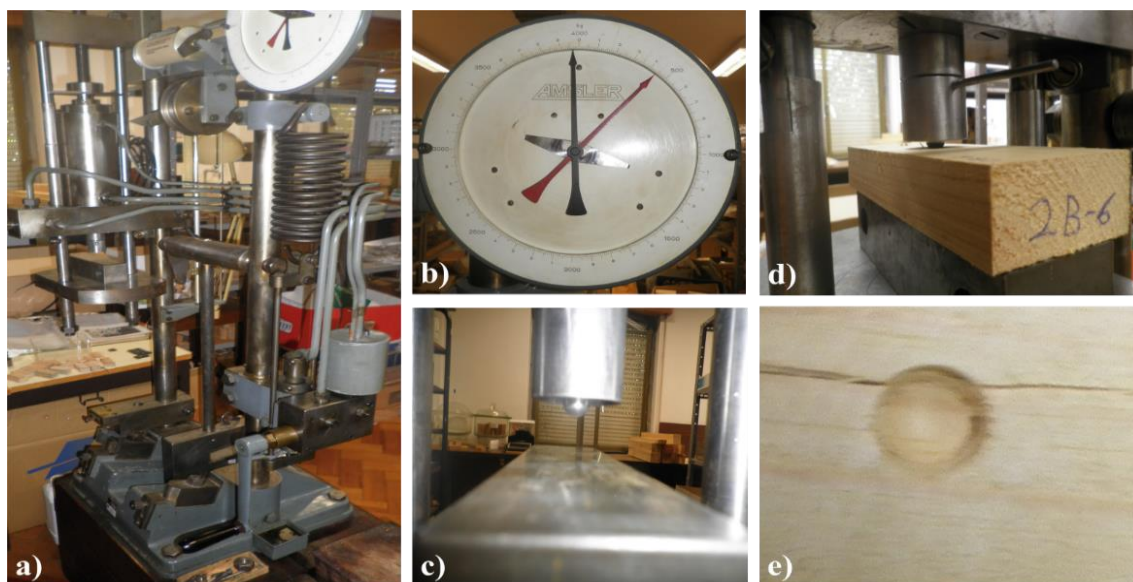


Figura 6.6- Máquina de ensaio universal AMSLER; b) Escala de medição; c) Esfera de ensaio; d) Realização do ensaio; e) Após o ensaio

O nível de resistência da madeira à indentação ou carga pontual, promovida no sentido perpendicular às fibras, é calculado depois pela seguinte equação:

$$H_{c,12\%} = K \times F_{m\acute{a}x}(N)$$

Em que:

- $H_{c,12\%}$  é a força de rotura em N, a 12% de teor em água;
- $K$  é o coeficiente que é tomado igual a 1 ou a  $4/3$ , consoante a profundidade de embebição da esfera seja 5,64 mm ou 2,82 mm, respetivamente;
- $F_{m\acute{a}x}$  é a força máxima de rotura, em N.

Foram realizados dois ensaios em cada provete, sendo o valor considerado, a média desses mesmos ensaios, conforme se pode consultar nos anexos 6.3, 6.8 e 6.11.

### 6.2.3.2 Ensaio de compressão axial

No par de provetes de massa volúmica semelhante, assim como no grupo de provetes degradados, que previamente se tinha estabelecido, foram então realizados ensaios de compressão axial segundo a norma NP618:1973, pela aplicação de forças progressivamente crescentes a um ritmo constante, até atingir a rotura ao fim de cerca de 3 minutos. Os ensaios foram realizados na máquina universal *Schimatzu*, sendo os dados tratados pelo programa *Trapezium2®* e apresentados nos anexos 6.3, 6.8 e 6.11.

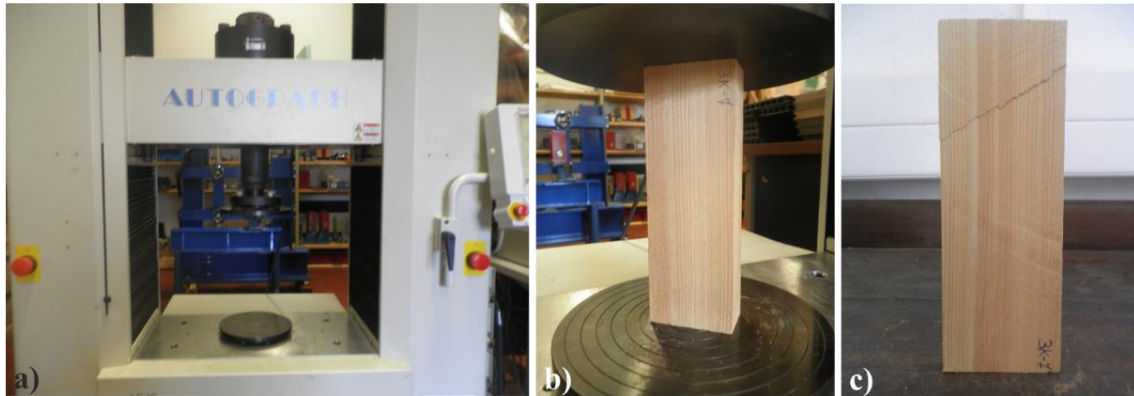


Figura 6.7 - a) Máquina de ensaio *Schimatzu*; b) Realização do ensaio; c) Após o ensaio

A tensão de rotura por compressão axial a 12% de teor de água é depois calculada pelas seguintes fórmulas:

$$f_{c,0, H(\%)} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{b \times h} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad ; \quad f_{c,0 12\%} = f_{c,0, H(\%)} * (1 + k_1(H - 12)) \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Em que:

- $f_{c,0}$  é a tensão de rotura paralela às fibras, em N/mm<sup>2</sup>;
- $F_{m\acute{a}x}$  é a força máxima de rotura, em N;
- $b$  e  $h$  são as dimensões da secção do provete, em mm;
- $H$  é o teor de água do provete, em %;
- $K_1$  é um coeficiente de correção, geralmente considerado igual a 0,05.

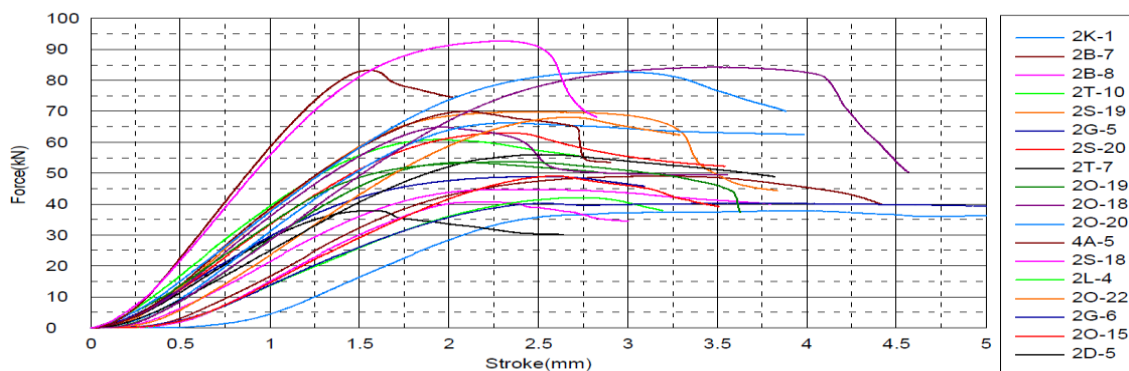


Figura 6.8 - Gráfico resultante do ensaio de compressão (*Trapezium2®*)

Com este ensaio pretendeu-se conhecer a capacidade resistente da madeira no sentido paralelo às fibras.

#### **6.2.4 Degradação em meio natural**

Para a segunda fase da campanha experimental, que envolveu provetes de borne degradados por fungos, foi necessário criar condições para a sua degradação. Neste sentido, recorreu-se a uma mistura de solos selecionados, tendo os provetes ficado envolvidos por essa mistura numa sala acondicionada a  $80 \pm 5\%$  HR e  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , até atingir o nível de degradação desejada, abaixo de 20% de perda de massa, de acordo com o exposto no capítulo 1.

A preparação do solo seguiu recomendações da norma DD CEN/TS 15083-2:2005, a qual aconselha a utilizar, para promover a degradação da madeira por fungos, um solo natural ou um solo argiloso, desde que não contenha produtos químicos e apresente uma capacidade de retenção de água WHC (water Holding Capacity), entre 25 e 60% em massa. A opção por esta metodologia prendeu-se com o facto de este processo permitir a coexistência de diversos tipos de fungos, aproximando-se assim das situações reais de degradação (Edlund & Nilsson, 1998).

A escolha da composição do solo seguiu trabalhos realizados por Henriques, 2011, que ensaiou diversas misturas de teste no laboratório de solos do núcleo de Barragens e Obras de Aterro do Departamento de Geotecnia (NBOA-DG) do LNEC e apontou a mistura ideal, contendo terra de jardim, turfa comercial e areia calibrada, num traço mássico de 40/40/20.

Realizou-se então uma mistura experimental no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do ISEL, com terra de jardim, turfa comercial e areia calibrada (250  $\mu\text{m}$  a 2 mm), tendo-se determinado, segunda a norma, a quantidade de água a adicionar à mistura para garantir o WHC desejado.

Ao preparar a mistura de terra com as quantidades determinadas, verificou-se que a mesma se apresentava mais líquida do que o desejado, provavelmente pela terra de jardim adicionada ser diferente, tendo-se optado por adicionar argila expandida do tipo Leca à mistura, com a finalidade de absorver água e de promover a oxigenação permanente do solo. A composição utilizada foi assim a apresentada na tabela abaixo.

Mistura de Terra	
Componente	% em massa
Terra de jardim	32,47
Turfa comercial	32,47
Areia Calibrada (250µm a 2mm)	16,24
“Leca”	3,69
Água	15,13
Total	100

Tabela 6.1 – Composição da mistura de terra utilizada

#### 6.2.4.1 Exposição ao meio

Como referido, o procedimento de ensaio seguiu uma adaptação da norma DD CEN/TS 15083-2:2005, resumindo-se da seguinte forma:

- Medição das massas e dimensões dos provetes com craveira manual, após estabilização do teor em água em sala acondicionada a  $65 \pm 5\%$  HR e  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- Humedecimento dos provetes, por imersão durante duas horas, segundo exigência da norma;
- Preparação da mistura de terra de acordo com as quantidades determinadas;
- Distribuição dos provetes em contentores, através de uma estrutura auxiliar que garanta uma distância mínima de 20 mm entre si, às paredes e ao fundo do contentor, conforme requisito da norma;
- Registo da posição de cada provete e aplicação de uma tampa ventilada sobre cada contentor;
- Manutenção dos contentores em câmara acondicionada a  $80 \pm 5\%$  HR e  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- Controlo semanal da humidade do solo à superfície, humedecendo-o uniformemente quando necessário;
- Verificação da degradação dos provetes, por contacto direto com os mesmos, e retirada destes ao fim de 8 meses de exposição.

Paralelamente foram inoculados fungos de podridão castanha para adicionar aos contentores e promoverem a degradação cúbica dos provetes. Contudo, o fungo usado, *Postia Placenta*, só esteve disponível ao fim de 5 meses de degradação dos provetes, altura em que foi colocado nos contentores.

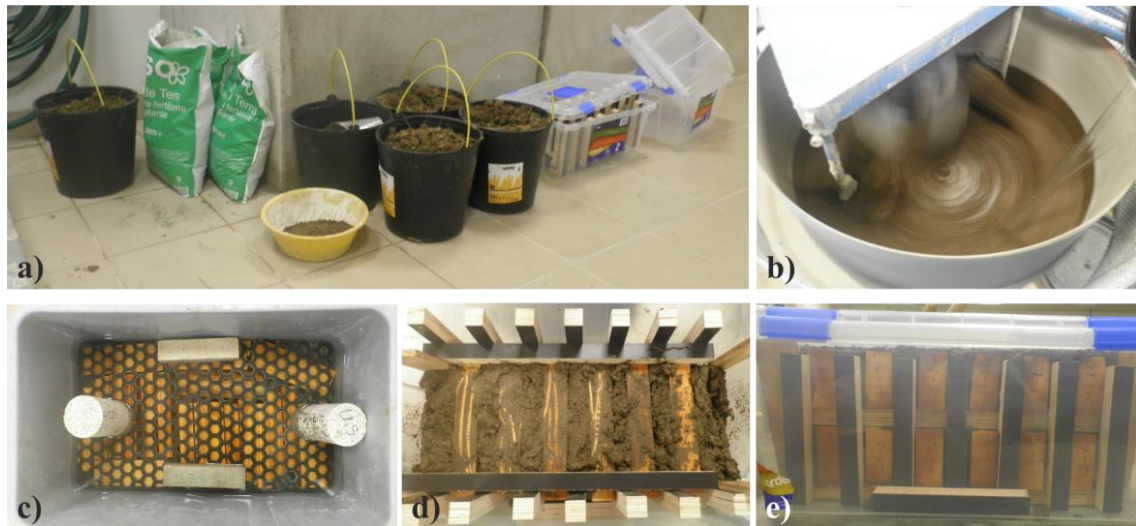


Figura 6.9- a) Componentes da mistura; b) Realização da mistura de solo; c) Imersão dos provetes em água; d) Colocação dos provetes nas caixas de degradação; e) Vista lateral da caixa de degradação

#### 6.2.4.2 Perda de massa teórica

Após o período de exposição ao meio, os provetes foram limpos e pesados, registando-se a massa húmida à saída,  $m_s$ . Foram posteriormente acondicionados a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  HR até à estabilização da sua massa, que se verificou ao fim de duas semanas, tendo-se adotado a designação de massa húmida final,  $m_{f,H\%}$ , para esse valor.

No sentido de se poder estabelecer uma comparação com os restantes provetes ensaiados calculou-se a perda de massa teórica de cada um dos provetes degradados, sendo esse valor correspondente ao estado anidro. Este processo envolve duas etapas, começando pelo cálculo de  $m_{i,0\%}$  teórica e  $m_{f,0\%}$  teórica, respetivamente para o período antes e após a degradação, sendo estes valores determinados pelas seguintes expressões.

$$m_{i,0\%} \text{ teórica} = \frac{m_{i,H\%}}{1 + \frac{H\%}{100}} \quad ; \quad m_{f,0\%} \text{ teórica} = \frac{m_{f,H\%}}{1 + \frac{H\%}{100}}$$

Em que:

- $m_{i,H\%}$  é a massa húmida inicial;
- $m_{f,H\%}$  é a massa húmida final;
- $H\%$  é o teor de água da série de controlo, obtida na mesma data.

Na situação inicial, o teor de água registado para os provetes estabilizados foi de  $10,5 \pm 1,7\%$ , sendo para a final de  $13,4 \pm 0,6\%$ .

Conhecendo então os valores teóricos, calculou-se o valor da perda de massa pela expressão seguinte.

$$pm = \frac{m_{i,0\% \text{ teórica}} - m_{f,0\% \text{ teórica}}}{m_{i,0\% \text{ teórica}}} \times 100$$

Em que:

- $pm$  é a perda de massa percentual;
- $m_{i,0\% \text{ teórica}}$  é a massa teórica seca inicial;
- $m_{f,0\% \text{ teórica}}$  é a massa teórica seca final.

Determinou-se desta forma o nível de degradação de cada provete, variando os valores de perda de massa entre 5 e 11%, podendo todos os valores de cálculo ser consultados no anexo 6.6.

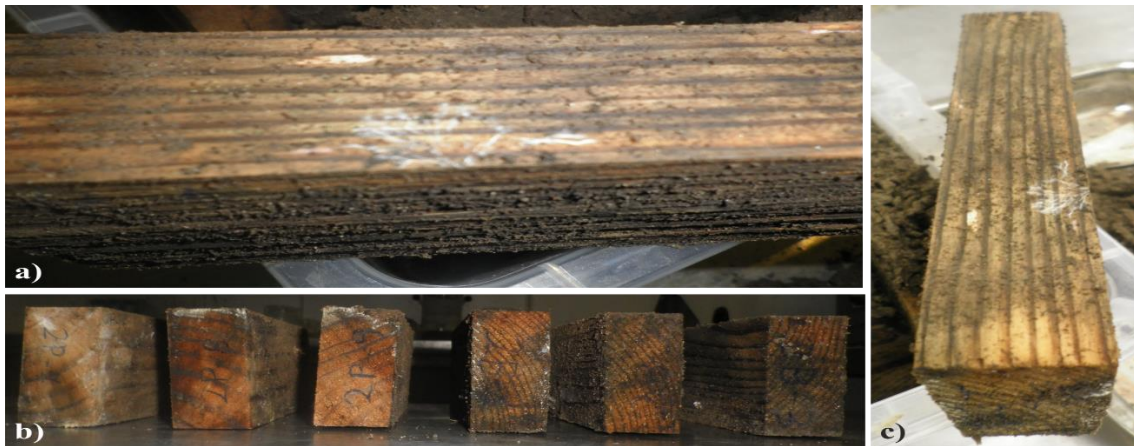


Figura 6.10 - a) Provete após degradação; b) Grupo de provetes degradados; c) Presença de ramificações de fungos em provete degradado

Como esperado, pelo reduzido tempo de exposição ao meio e grande dimensão dos provetes, os níveis de degradação não foram elevados. Contudo, inferiores ao inicialmente pensado.

### 6.2.5 Tratamento e consolidação

Conforme exposto em 5.5, o processo de tratamento e consolidação a estudar na presente tese envolveu a aplicação de um preservador líquido, o Bora-Care, seguido da aplicação de um consolidante, o EPO 155.

No sentido de conhecer o real efeito do método estudado realizaram-se ensaios de resistência mecânica para confirmar as conclusões de Henriques, 2011, justificando desta forma a aplicação do tratamento e consolidação no caso de estudo apresentado no capítulo 7. Assim, desenvolveu-se uma série de ensaios de compressão, dureza estática, resistência ao impacto com *Pilodyn*® e resistência à perfuração com *Resistograph*®, para avaliar a eficácia do método ao nível destas características mecânicas.

Procedeu-se à limpeza dos provetes a tratar, retirando material desagregável, poeiras e ramificações de fungos, resultantes do período de degradação. De seguida, após a dissolução do Bora-Care em água, pela relação volumétrica de 1:1 por indicação do fabricante, aplicou-se o produto de tratamento à trincha em toda a secção, de forma lenta e cuidada, com a finalidade de

promover a melhor penetração possível do mesmo. Pelo acréscimo do teor de água, próprio de um hidrossolúvel, após a aplicação existiu um controlo regular do teor em água dos provetes, até à sua estabilização para os valores inicialmente registados, o que aconteceu ao fim de 11 dias.



Figura 6.11 - a) Bora-Care; b) Resina (EPO155) mais endurecedor (K156); c) Preparação da mistura; d) Mistura

Foi nesta altura que se aplicou o consolidante EPO 155, após preparação da mistura com o endurecedor K 156, numa relação de 2:1 em massa. O reduzido *pot life* da mistura obrigou à manutenção desta junto a uma placa de congelação para assegurar uma temperatura baixa e retardar a reação exotérmica que conduz à inutilização do conjunto. Recorreu-se mais uma vez à trincha para aplicação do produto, tendo este sido aplicado em camadas sucessivas até a madeira deixar de ter capacidade de absorção.

### 6.3 Análise de resultados e discussão

Conforme referido em 6.1, o objetivo do trabalho passa pelo estabelecimento de correlações entre as propriedades da madeira estudadas. Para tal, irá recorrer-se a gráficos de dispersão, apresentando a correlação que se estabelece a cada duas variáveis, assim como as equações das retas de tendência e o seu valor de  $R^2$ , o qual irá ditar a significância ou não dos resultados encontrados.

Pretende-se então, indo ao encontro do estudado por outros autores (Lladro, et al., 2006; Feio, 2006; Henriques, 2011; Gorchacher, 1987; Machado & Cruz, 1997; Jasienko, et al., 2013), estabelecer as seguintes correlações:

- Com a massa volúmica,  $\rho$ : resistência à compressão,  $f_{c,o}$ ; resistência à indentação,  $H_{c,12\%}$ ; medida resistográfica, MR; profundidade com o *Pilodyn*®;
- Com a resistência à compressão,  $f_{c,o}$ : resistência à indentação,  $H_{c,12\%}$ ; medida resistográfica, MR; profundidade com o *Pilodyn*®;
- Com a resistência à indentação,  $H_{c,12\%}$ : medida resistográfica, MR; profundidade com o *Pilodyn*®;
- Com a medida resistográfica, MR: profundidade com o *Pilodyn*®;

- Com a perda de massa, *p.m.*: resistência à compressão,  $f_{c,o}$ ; resistência à indentação,  $H_{c,12\%}$ ; medida resistográfica, MR; profundidade com o *Pilodyn*®.

No anexo 6.4, 6.9 e 6.12 encontram-se os resultados dos vários ensaios realizados.

### 6.3.1 Correlações com a massa volúmica, $\rho$

Tal como apresentado em 2.2.2, a massa volúmica é uma medida de concentração de substância por unidade de volume, intimamente relacionada com a sua resistência mecânica, podendo mesmo constituir um indicador de qualidade, já que a uma maior massa volúmica corresponde, muitas vezes, uma maior resistência mecânica (Júnior, 2006; Cruz, et al., 1994).

Contudo, vários autores alertam para a não linearidade desta afirmação, uma vez que a heterogeneidade da madeira é uma constante em elementos estruturais (Brites, et al., 2006; Lourenço, et al., 2007) e a existência de descontinuidades ou defeitos influencia em muito as propriedades mecânicas.

Pretende-se então, com os ensaios realizados, encontrar a possível correlação existente entre as variáveis medidas, chamando a atenção para a heterogeneidade da amostra estudada, com origens e histórias bastante distintas e massas volúmicas que variam entre  $400 \text{ kg/m}^3$  e  $700 \text{ kg/m}^3$ . Com isto, espera-se sair do típico controlo laboratorial, tentando-se uma aproximação com os valores reais dos elementos de madeira aplicados *in situ*.

#### 6.3.1.1 Resistência à compressão, $f_{c,o}$

De facto, se fatores como o teor em água ou a existência de defeitos fazem variar esta propriedade, a realidade é que existe, mesmo dentro de cada espécie, um coeficiente de variação de valores de resistência à compressão. Lourenço *et al.*, 2007, apontam mesmo um coeficiente entre 20% e 40% em função da espécie. Já green *et al.*, 1999, indicam um coeficiente de 18%, mais baixo, mas igualmente representativo da variabilidade desta propriedade.

Quanto à correlação com a massa volúmica, Feio, 2005, encontra, para madeira de castanho (*Castanea sativa Mill.*), uma boa relação entre estas variáveis. Mais tarde, Henriques, 2011, ao estudar um grupo de madeira de Pinho bravo e Casquinha, concluiu que 75% da resistência à compressão dos provetes é explicada pela massa volúmica. Este resultado, bastante promissor, apontou para a realização de mais ensaios que o viessem confirmar.

No presente estudo, os valores obtidos para cada ensaio encontram-se no anexo 6.4, apresentando-se na figura 6.12 o gráfico que correlaciona as variáveis em estudo.

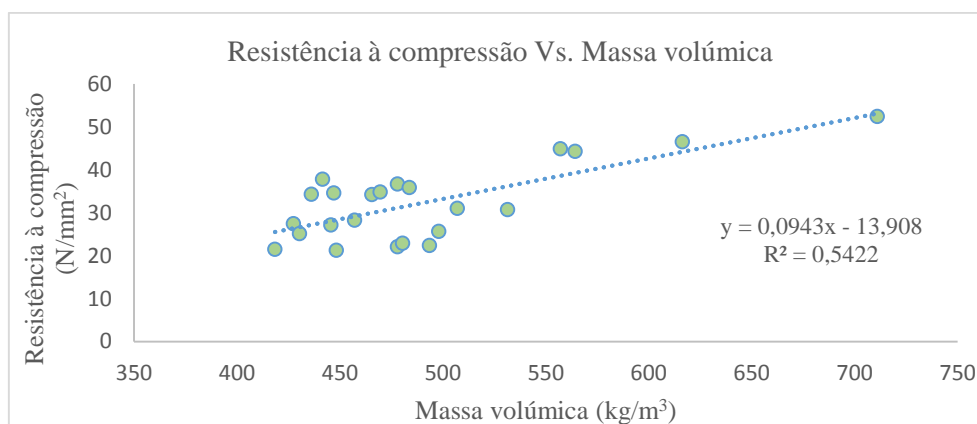


Figura 6.12 – Gráfico Resistência à compressão Vs. Massa volúmica

Pela grande variedade da origem da madeira ensaiada, os valores de resistência à compressão registados variam entre os 20 N/mm<sup>2</sup> e os 50 N/mm<sup>2</sup>, sendo que, pela análise do gráfico, vê-se a existência de uma correlação moderada entre a massa volúmica e a resistência à compressão, com um fator de determinação,  $R^2=0,54$ .

Contudo, em linha de conta com Brites, *et al.*, 2006, a grande heterogeneidade característica da madeira não permite estabelecer relações claras entre a massa volúmica e a resistência à compressão. Fica no entanto a ideia que existe uma relação, justificando-se estudos futuros.

### 6.3.1.2 Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$

A resistência à indentação, avaliada pelo ensaio de dureza estática, depende de fatores como a anisotropia, heterogeneidade e higroscopicidade (Riggio & Piazza, 2011). Teve-se então atenção para realizar o ensaio nas zonas mais homogêneas dos provetes.

Em 2003, Machado *et al.*, ao estudar o Pinho bravo, verificaram que 65% da resistência à indentação é explicada pela massa volúmica, considerando a existência de uma boa correlação. Também Branco, 2010, afirma existir uma correlação positiva entre a resistência à indentação e a massa volúmica.

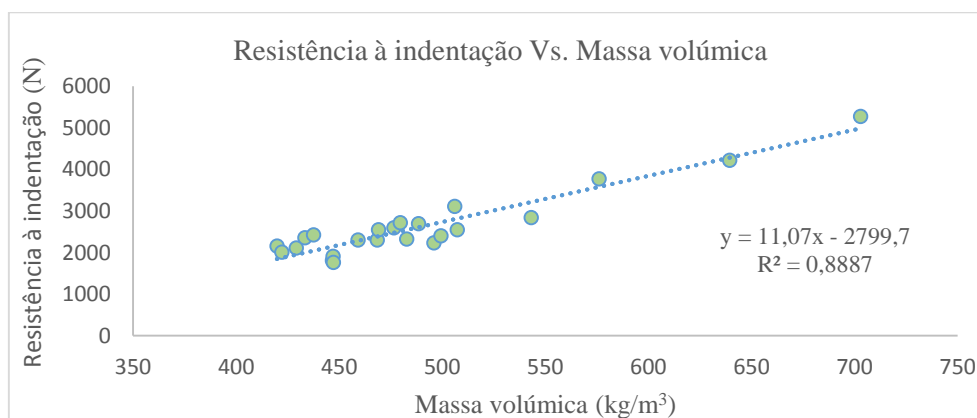


Figura 6.13 - Gráfico Resistência à indentação Vs. Massa volúmica

No presente estudo, verificou-se igualmente uma excelente correlação entre estas variáveis, com um  $R^2=0.89$  e uma distribuição muito regular, conforme se pode observar pelo gráfico da figura 6.13.

Pode assim afirmar-se que a resistência à indentação parece não ser influenciada pela heterogeneidade da amostra, sendo o ensaio de dureza estática um bom indicador da massa volúmica.

### 6.3.1.3 Medida resistográfica, MR

Lladro *et al.*, 2006, após realizarem uma longa campanha experimental em 100 vigas de *Pinus radiata* espanhol, afirmam ser possível recorrer ao *Resistograph*® para conhecer *in situ* o valor da massa volúmica com alguma fiabilidade. Por outro lado, Feio, 2006, verifica uma grande dispersão de resultados, afirmando não existir correlação entre a medida resistográfica e a massa volúmica. Também Riggio & Piazza, 2011, ao estudarem várias espécies de madeira, indicam não ser possível estabelecer uma correlação direta entre estas variáveis, a não ser que os elementos apresentem perfis resistográficos semelhantes nas diferentes secções em estudo.

Já Machado & Cruz, 1997, ao estudarem madeira de Pinho bravo, afirmam que, embora o *Resistograph*® não permita estimar com rigor a massa volúmica de elementos estruturais, para alguns casos fornece uma aproximação significativa. Num estudo semelhante, Henriques, 2011, após ensaiar um grupo de 67 provetes, concluiu existir uma boa correlação entre estas variáveis, apresentando um valor de  $R^2=0,87$  que faz crer na possibilidade de estimar, com alguma precisão, a massa volúmica de elementos através de ensaios com *Resistograph*®.

Os resultados obtidos com o presente trabalho não foram tão significativos, contudo, apontam igualmente para a existência de correlação entre as variáveis, conforme se verifica na figura 6.14.

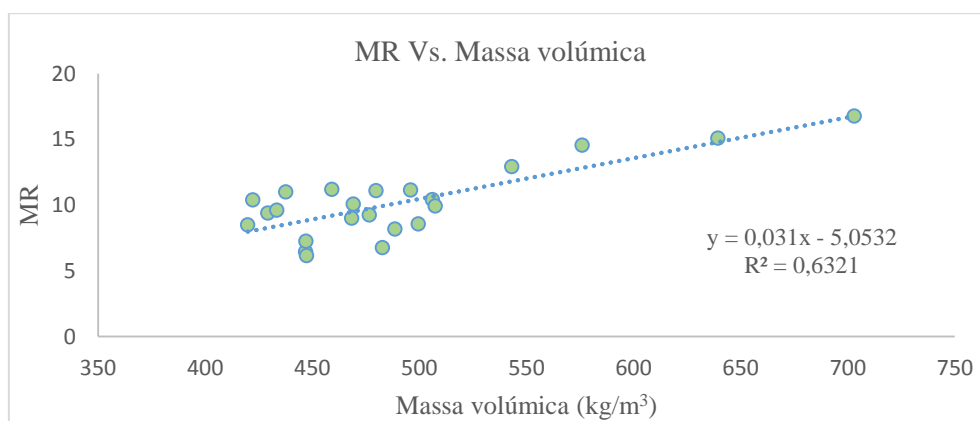


Figura 6.14 - Gráfico MR Vs. Massa volúmica

A enorme diversidade da amostra, que é tida como um fator depreciativo nos resultados obtidos, vem desta vez fortalecer a ideia de correlação, uma vez que, mesmo com a heterogeneidade apresentada se conseguiu um resultado satisfatório comparativamente a outros estudos.

### 6.3.1.4 Profundidade com o *Pilodyn*®

A correlação existente entre a profundidade atingida com o *Pilodyn*® é mais unânime. Feio, 2006, afirma existir correlação para a madeira de Castanho, apresentando valores de  $R^2$  próximos de 0,8. Também Henriques, 2011, encontrou uma correlação com  $R^2=0,8$  para madeira de Pinho bravo e Casquinha. Gortlacher, já em 1987, encontrou excelentes correlações entre estas variáveis, com  $R^2$  entre 0,74 e 0,92, em função da espécie e do número de medições. Mais recentemente, Giuriani *et al.*, 2013, ao estudarem a madeira de Castanho, encontraram também correlações bastante significativas, com  $R^2$  próximo de 0,8.

Também Branco *et al.*, 2010, apesar de terem chegado a um coeficiente de apenas 0,5 ao estudar asnas de madeira, afirmam parecer adequada uma correlação entre estas variáveis. Contudo, a correlação obtida no presente estudo apresenta um  $R^2=0,54$ , claramente baixo comparativamente a valores obtidos por outros autores.

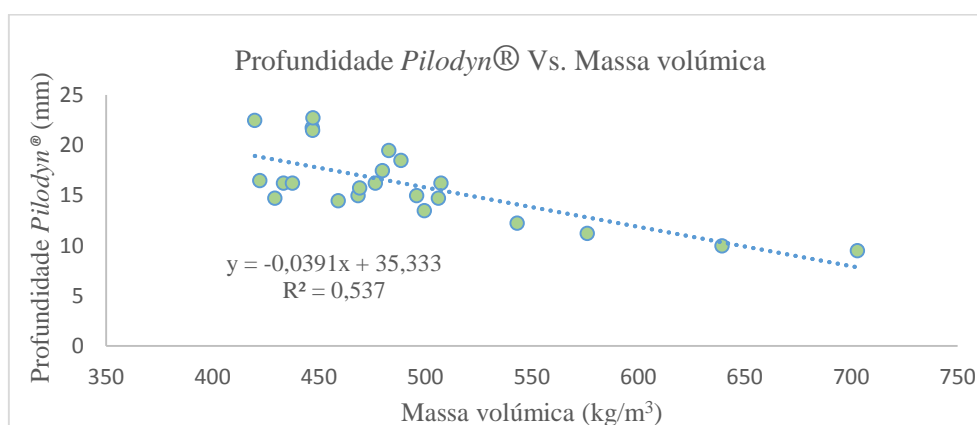


Figura 6.15 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. Massa volúmica

Chama-se no entanto a atenção para os valores de penetração conseguidos, em média na ordem de 16 mm, conforme se pode verificar no anexo 6.4, e por isso muito sensíveis a pequenas variações de superfície. A grande variabilidade da amostra poderá justificar o valor encontrado.

### 6.3.1.5 Comparação de resultados

A fim de avaliar os desvios das correlações encontradas para a massa volúmica e o seu valor real, fez-se uma comparação dos resultados espectáveis de acordo com as equações das retas de tendência encontradas.

Neste sentido, ao analisar os pares de provetes estabelecidos, em função das retas de tendência dos vários ensaios, e conhecendo a massa volúmica real, é possível constatar que os valores espectáveis para as massas volúmicas apresentam em média, face às massas volúmicas reais, a variação descrita na tabela 6.2. No anexo 6.5 pode consultar-se os desvios para cada um dos provetes.

Propriedade	Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência			
	Resistência à compressão, $f_{c,o}$	Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$	$Mr$ médio (20cm/min)	Profundidade média <i>Pilodyn</i> ® (mm)
Reta de tendência	$Y=0,0943X-13,908$	$Y=11,07X-2799,7$	$Y=0,031X-5,0532$	$Y=-0,0391X+35,333$
Média e desvio padrão da variação entre o valor real e o obtido pela reta de tendência ( $kg/m^3$ )	$53,1 \pm 31,5$	$21,5 \pm 10,9$	$43,7 \pm 28,4$	$54,8 \pm 31,6$
Média e desvio padrão da massa volúmica obtida pela reta de tendência ( $kg/m^3$ )	$490,4 \pm 92,8$	$490,4 \pm 73,5$	$491,1 \pm 87,2$	$490,3 \pm 94,5$
Valor médio real e desvio padrão das massas volúmicas ( $kg/m^3$ )	$490,7 \pm 68,4$	$490,3 \pm 69,3$	$490,3 \pm 69,3$	$490,3 \pm 69,3$

Tabela 6.2 - Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência

Estes resultados demonstram bem que, embora seja possível fazer uma estimativa da massa volúmica a partir dos ensaios realizados, a transposição dessas relações para aplicações *in situ* tem de ser feita com extremo cuidado, uma vez que, como demonstrado pela tabela 6.2, existem desvios face aos valores reais.

### 6.3.2 Correlações com a resistência à compressão, $f_{c,o}$

Apresentam-se neste ponto as correlações encontradas entre o valor da resistência à compressão paralela às fibras e os valores obtidos nos ensaios destrutivos e não destrutivos realizados no seu par, de massa volúmica semelhante.

A grande ambição deste estudo passa pela possibilidade, de um dia estimar a resistência à compressão de peças ensaiadas *in situ* por ensaios não destrutivos. Chama-se no entanto a atenção para o facto de os provetes ensaiados serem isentos de defeitos, situação essa que não se encontra em madeira aplicada em edifícios, devendo por isso ter-se atenção na extrapolação dos resultados para essa vertente (Lladró, et al., 2006; Feio, 2006).

#### 6.3.2.1 Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$

Em 2003, Machado *et al.*, ao estudar o Pinho bravo, concluíram que não existia correlação entre a resistência à compressão e a resistência à indentação, justificando-o com a diferença existente ao nível dos mecanismos de rotura.

Contudo, os dados resultantes deste estudo apontam para a existência de correlação entre estas duas variáveis, conforme se pode observar pela análise do gráfico da figura 6.16.

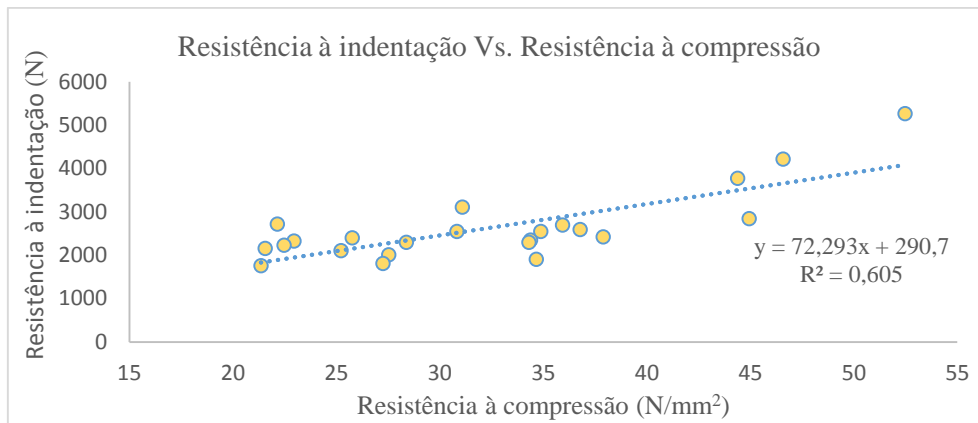


Figura 6.16 - Gráfico Resistência à indentação Vs. Resistência à compressão

De facto, 60% dos valores de uma variável são explicados pela outra, ficando a ideia da existência de correlação.

### 6.3.2.2 Medida resistográfica, MR

Machado *et al.*, 2000, indicam ser possível, pela utilização do *Resistograph*®, usar a medida resistográfica como indicativo para aferir a resistência à compressão da madeira sã, desde que seja por comparação.

Também Feio, 2006, ao estudar a correlação destas duas variáveis para a madeira de Castanho, obteve uma correlação moderada. Contudo, chama a atenção para a variação que se verifica em função da orientação da carga e da idade da madeira. Mais tarde, Henriques, 2011, ao estudar provetes de Pinho bravo e Casquinha chega a um  $R^2=0,69$ , apontando para a existência de correlação.

No presente estudo, encontrou-se uma correlação com  $R^2=0,53$ . Este valor não é elevado mas demonstra a existência de uma tendência, onde 53% dos valores de uma variável são explicados pela outra.

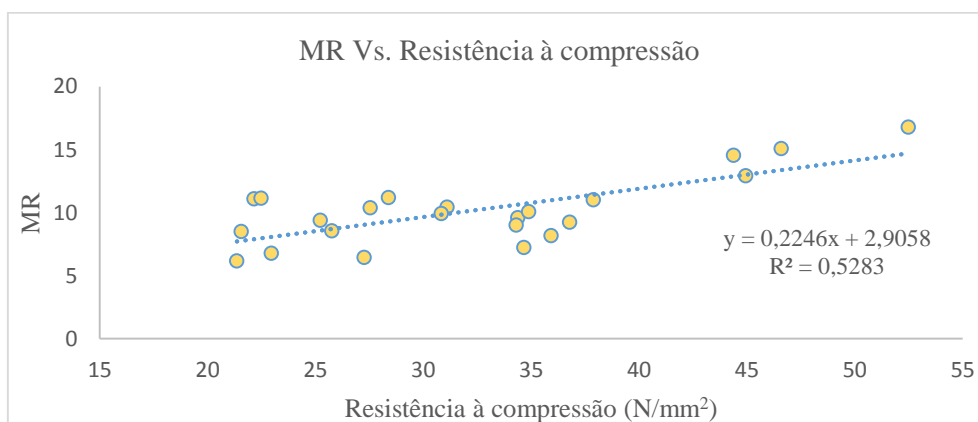


Figura 6.17 - Gráfico MR Vs. Resistência à compressão

A grande heterogeneidade da amostra é a razão deste baixo valor, acreditando-se que para uma amostra mais homogénea a correlação seria bastante mais representativa. Desta forma, pensa-se existir uma relação entre estas variáveis, justificando-se estudos futuros.

### 6.3.2.3 Profundidade com o *Pilodyn*®

Feio, em 2006, ao estudar madeira de Castanho, não encontrou correlação entre a resistência à compressão e a profundidade registada com o ensaio do *Pilodyn*®, afirmando mesmo que não se deve considerar o valor do *Pilodyn*® como indicador quantitativo da resistência à compressão.

Por outro lado, Henriques, 2011, encontrou uma correlação moderada entre estas variáveis, onde cerca de 60% dos valores de uma variável são explicados pela outra, justificando assim novas investigações

Neste estudo, embora se verifique uma tendência, representada no gráfico da figura 6.18, não é possível estabelecer uma correlação.

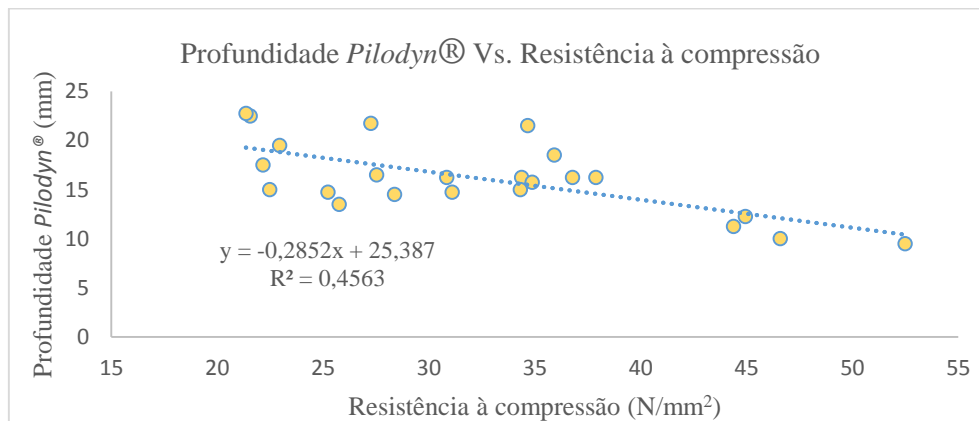


Figura 6.18 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. Resistência à compressão

De facto, não é possível estimar a resistência à compressão unicamente com o valor do ensaio do *Pilodyn*®. Chama-se no entanto a atenção para a sensibilidade deste aparelho a pequenas variações de superfície, que aliado à heterogeneidade da amostra justifica o valor encontrado.

### 6.3.3 Correlações com a resistência à indentação, $H_{c,12\%}$

Apresentam-se neste ponto as correlações testadas entre a resistência à indentação, avaliada pelo ensaio de dureza estática, e a resistência à perfuração e à penetração, avaliada pelos ensaios não destrutivos com o *Resistograph*® e o *Pilodyn*®, respetivamente. Os valores conseguidos para ambos os ensaios, conforme indicado em 6.2.3.1, referem-se ao mesmo provete, que após ser ensaiado por meios não destrutivos, foi ensaiado à dureza estática, numa zona não perturbada.

### 6.3.3.1 Medida resistográfica, MR

Apresenta-se então o resultado obtido no gráfico da figura 6.19, onde se verifica a existência de correlação entre a medida resistográfica e a dureza estática, com um  $R^2=0,74$ .

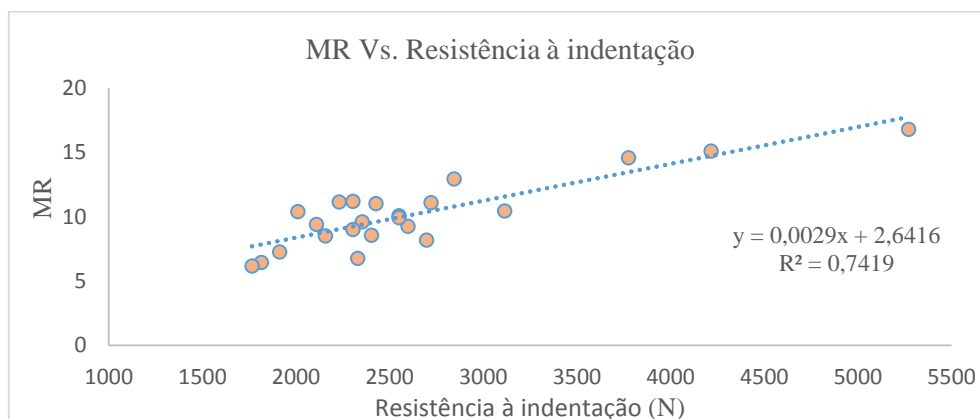


Figura 6.19 – Gráfico MR Vs. Resistência à indentação

A comparação destas duas variáveis só é válida para peças isentas de defeitos, chamando-se a atenção para a variabilidade possível de resultados, caso esse fator não seja garantido. Desta forma, a extrapolação para valores *in situ*, deve ser bastante cuidada.

### 6.3.3.2 Profundidade com o Pilodyn®

No gráfico da figura 6.20 apresenta-se a correlação entre a profundidade de penetração do Pilodyn® e a resistência à indentação, existindo uma correlação moderada entre as variáveis, com um valor de  $R^2=0,57$ .

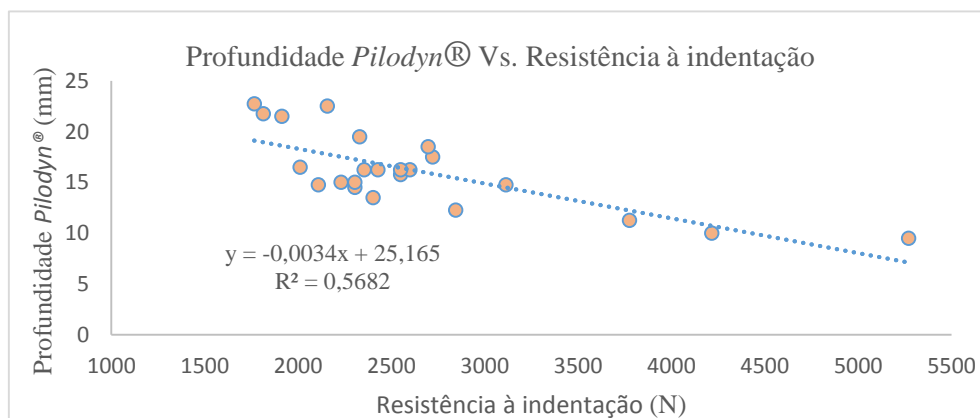


Figura 6.20 – Gráfico Profundidade Pilodyn® Vs. Resistência à indentação

Chama-se ainda a atenção para o facto de a profundidade atingida ser baixa e por isso, muito sensível a pequenas alterações de superfície, devendo assim ter-se cuidado na extrapolação destes dados para madeira aplicada em edifícios. No entanto, uma vez que ambos os ensaios medem a dureza superficial da madeira, e sendo um, um ensaio laboratorial destrutivo e o outro, um ensaio não destrutivo de aplicação *in situ*, será lógica a sua comparação.

### 6.3.4 Correlação entre medida resistográfica, MR, e profundidade com o *Pilodyn*®

Pretende-se neste ponto avaliar a relação existente entre os ensaios não destrutivos realizados, chamando-se desde logo a atenção para a diferença de profundidades atingida pelos mesmos, sendo por isso a sua comparação apenas válida para madeira isenta de defeitos.

Henriques, 2011, ao estabelecer a mesma comparação para madeira de Pinho bravo e Casquinha, chegou a um valor de  $R^2=0,74$ . No presente estudo, chegou-se um valor ligeiramente superior,  $R^2=0,76$ , e para uma amostra muito mais heterogénea, o que se considera bastante promissor.

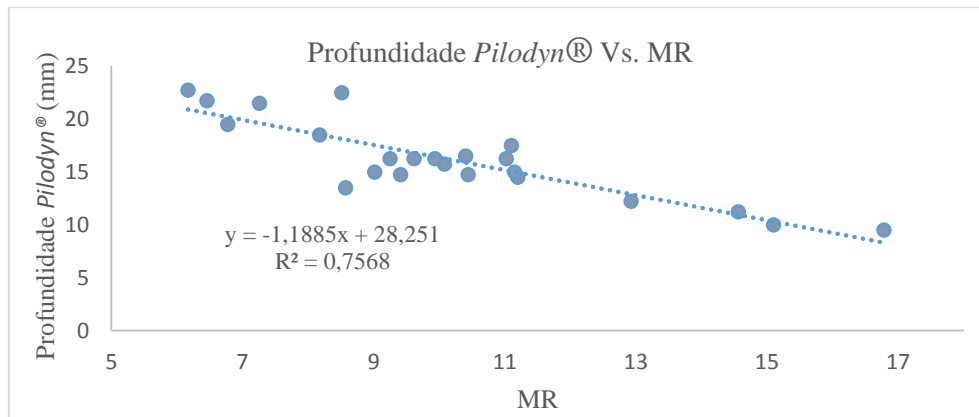


Figura 6.21 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. MR

Neste sentido, pela variabilidade da amostra não proporcionar uma correlação mais baixa, pensa-se existir um elevado grau de confiança nos resultados apresentados.

### 6.3.5 Correlações com a perda de massa

Como referido em 6.1 existiu uma segunda fase laboratorial com o objetivo de estabelecer correlações com a perda de massa resultante do processo de degradação exposto em 6.2.4. Pretendeu-se assim simular situações reais de degradação e avaliar a utilidade dos ensaios estudados para conhecer esta variável.

#### 6.3.5.1 Resistência à compressão, $f_{c,0}$

Como apresentado por alguns autores, a uma pequena perda de massa corresponde normalmente uma elevada perda de resistência mecânica. De facto, Curlin *et al.*, 2002, apresentam um estudo com três tipos de fungos, tendo a ação de todos eles conduzido a grandes perdas de resistência mecânica, mesmo para pequenas perdas de massa. Também Nunes *et al.*, 2005, ao estudar madeira de Pinho bravo degradada pelo fungo *Coniophora puteana*, concluíram igualmente que pequenas perdas de massa (10%) podem conduzir a grandes perdas de resistência à compressão (50%). Também Henriques, 2011, ao utilizar as mesmas condições de ensaio, chegou a conclusões semelhantes para grupos distintos de massas volúmicas. Existe assim uma tendência verificada para os efeitos da perda de massa na resistência à compressão.

No presente estudo encontrou-se igualmente uma relação semelhante, contudo assente numa amostra reduzida.

Chama-se a atenção para o facto de as correlações encontradas serem normalmente exponenciais, no sentido de representar o efeito descrito. Contudo, pelo reduzido número de provetes ensaiados neste estudo, assim como pela proximidade de valores das suas perdas de massa, a relação encontrada aproxima-se da linearidade, apresentando-se na figura 6.22 as equações das retas de tendência para ambas as situações.

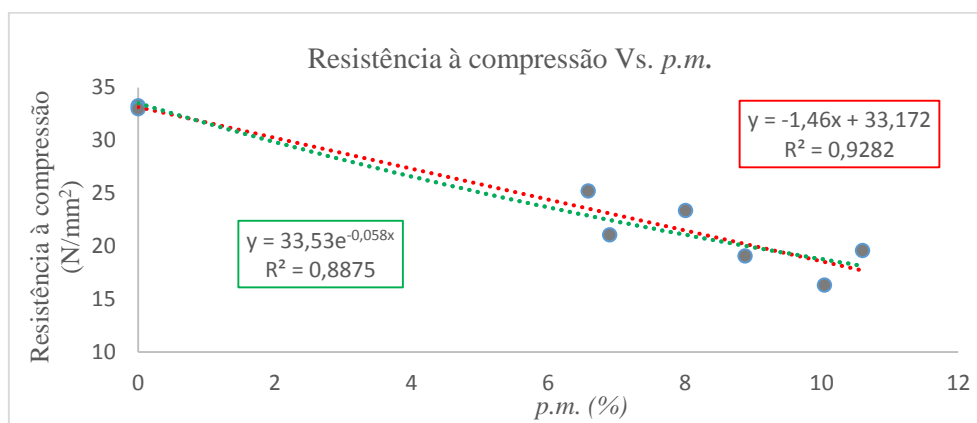


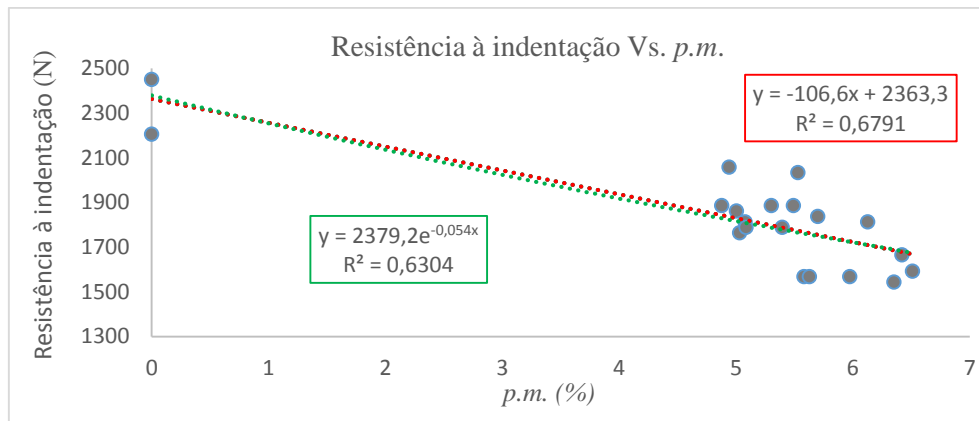
Figura 6.22 - Gráfico Resistência à compressão Vs. p.m.

Com base nos estudos desenvolvidos e na relação aqui encontrada, acredita-se que o aumento da amostra demonstre resultados semelhantes. Pretende-se num estudo futuro ensaiar provetes com níveis de degradação superiores, que se encontram atualmente em degradação, e acrescentá-los a esta amostra no sentido de comprovar a tendência apresentada.

### 6.3.5.2 Resistência à indentação, $H_c$ , H%

Ao nível da resistência à indentação, Nunes *et al.*, 2005, verificaram que uma reduzida perda de massa conduz a uma grande perda de resistência, encontrando um fator de determinação de  $R^2=0,78$ . Também Henriques, 2011, obteve um  $R^2=0,87$  para a relação exponencial entre estas duas variáveis.

Contudo, no presente estudo não foi possível encontrar uma correlação tão significativa, apresentando-se um  $R^2=0,63$  para uma correlação exponencial. Mais uma vez, a relação encontrada aproxima-se da linearidade, sendo mesmo o fator de determinação obtido por esta análise, superior, conforme se pode verificar na figura 6.23.

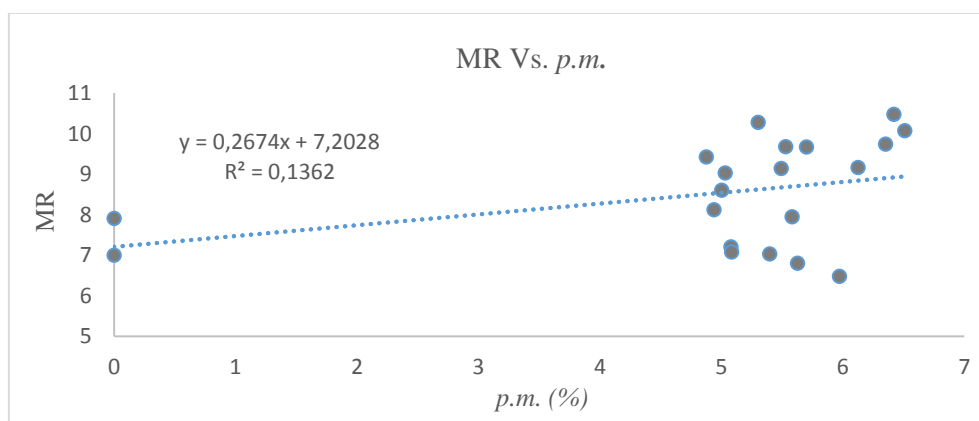
Figura 6.23 - Gráfico Resistência à indentação Vs. *p.m.*

A gama reduzida de perdas de massa aliada à dimensão dos provetes e à não uniformidade da degradação superficial pode justificar este resultado.

### 6.3.5.3 Medida resistográfica, MR

Pela perda de resistência mecânica que uma pequena perda de massa provoca, como é exemplo o que acontece com a resistência à compressão, esperava-se encontrar uma correlação entre esta variável e a medida resistográfica, onde a uma maior perda de massa correspondesse um menor valor de MR. De facto, foi esse o resultado a que chegou Henriques, 2011, embora tenha apontado para a reduzida sensibilidade que este método de ensaio apresenta para valores de pequena degradação.

No entanto, no presente estudo não se encontrou correlação alguma entre estas duas variáveis, sendo ainda o comportamento da reta de tendência contrário ao que seria de esperar, apresentando uma inclinação positiva.

Figura 6.24- Gráfico MR Vs. *p.m.*

Mais uma vez, a reduzida gama de perdas de massa e a não uniformidade da degradação obtida, pode justificar os resultados alcançados, não parecendo este método de ensaio adequado para estimar a perda de massa.

### 6.3.5.4 Profundidade com o *Pilodyn*®

A reduzida profundidade que este ensaio apresenta, aliada ao carácter pouco profundo da degradação obtida, fazia crer numa maior sensibilidade perante os valores de perda de massa registados. De facto, Henriques, 2011, apresenta uma correlação destas variáveis com valor de  $R^2=0,86$ , o que é um resultado bastante promissor.

Contudo, o presente estudo não corrobora a sua conclusão. Como se pode analisar na figura 6.25, os resultados obtidos originaram uma grande dispersão de valores de profundidades para valores relativamente próximos de perda de massa.

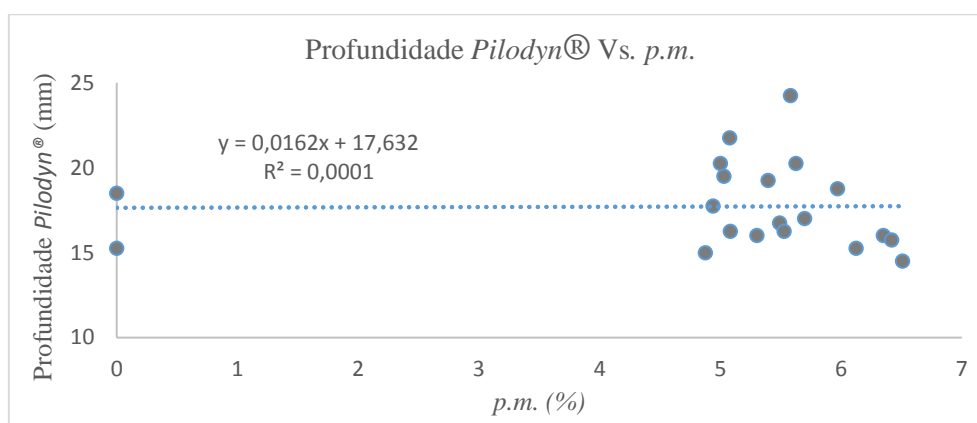


Figura 6.25 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. p.m.

A dimensão dos provetes e a heterogeneidade da degradação pode ser novamente responsável pelos resultados alcançados.

### 6.3.6 Avaliação do método de tratamento e consolidação

Conforme apresentado em 6.1. e 6.2.5, tentou-se comprovar laboratorialmente a real eficácia do tratamento e consolidação exposto ao longo da presente tese. Assim, apresenta-se neste ponto o resultado dos vários ensaios realizados após a aplicação do método, sempre numa vertente comparativa com os resultados obtidos para a madeira degradada, não tratada e consolidada.

#### 6.3.6.1 Resistência à compressão, $f_{c,0}$

Em virtude de ser um ensaio destrutivo, o resultado apresentado refere-se a provetes diferentes, mas com massas volúmicas iniciais e perdas de massa semelhantes, acreditando-se por isso na comparação apresentada.

Pela análise da figura 6.26, é possível verificar que existe um aumento do valor da resistência à compressão para os provetes tratados e consolidados, sendo este aumento mais significativo nos provetes mais degradados.

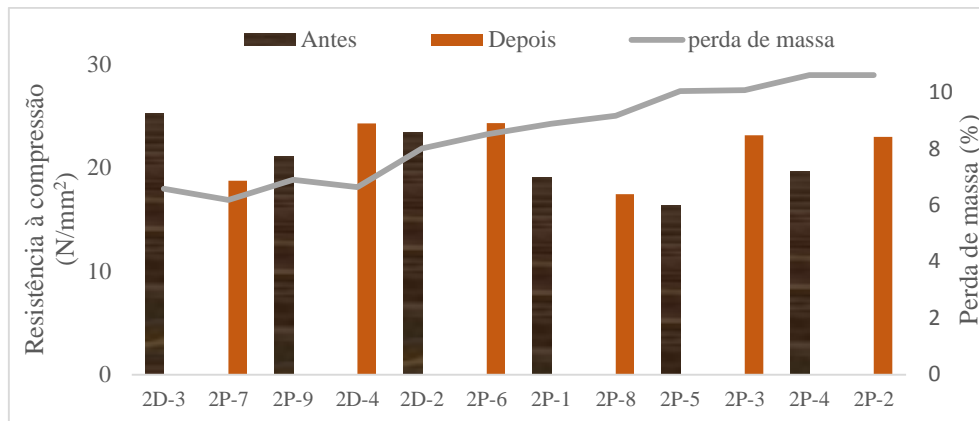


Figura 6.26 - Gráfico dos valores registados para a resistência à compressão, antes e após o tratamento e consolidação

De facto, como referido em 5.4, os produtos poliméricos de impregnação preenchem a zona degradada embebendo as células e espaços livres entre elas (Unger, et al., 2001), justificando-se assim a melhoria do seu comportamento em madeiras mais degradadas, que por consequência apresentam maiores espaços intercelulares.

Parece então que o método testado é mais eficaz para perdas de massa mais elevadas, chamando-se no entanto a atenção que, embora não seja possível de verificar no presente estudo, para valores acima dos 20% não se considera adequada a sua utilização, conforme exposto no capítulo 1.

### 6.3.6.2 Resistência à indentação, $H_c$ ,H%

O ensaio de dureza estática veio igualmente confirmar a eficácia do método, sendo que à exceção dos provetes sãos, 2S-17 e 2T-9, verificou-se um ganho de resistência mecânica para a grande maioria das amostras testadas, tal como apresentado na figura 6.27.

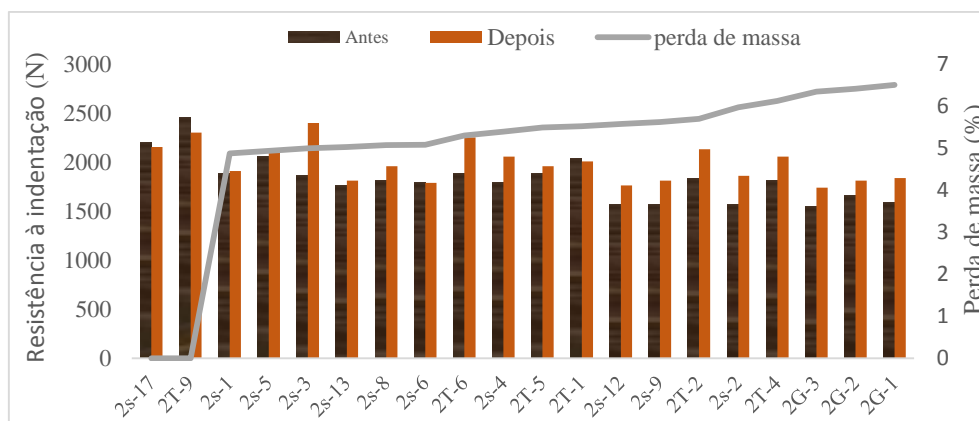


Figura 6.27 - Gráfico dos valores registados para a resistência à indentação, antes e após o tratamento e consolidação

Verificou-se ainda, que o aumento de resistência é mais regular para perdas de massa acima dos 6%, o que mais uma vez remete para a melhoria do comportamento da madeira tratada e consolidada para gamas de degradação superiores.

### 6.3.6.3 Medida resistográfica, MR

O ensaio com *Resistograph*®, à semelhança do que se verificou em 6.3.5.3, apresenta-se mais uma vez como pouco sensível a pequenas alterações superficiais. De facto, pela observação da figura 6.28, verifica-se pouca consistência nos resultados apresentados para valores de perda de massa inferiores a 6%. A partir deste valor verifica-se um ligeiro efeito no aumento da resistência mecânica dos provetes tratados e consolidados, em linha de conta com o verificado para o ensaio de dureza estática.

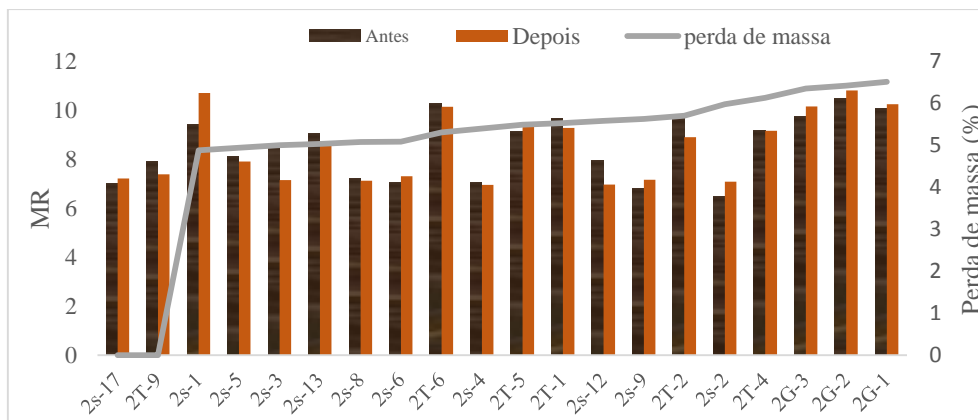


Figura 6.28 - Gráfico dos valores registados para a medida resistográfica, antes e após o tratamento e consolidação

Chama-se no entanto, mais vez a atenção para o facto das reduzidas perdas de massa dos provetes, aliadas à heterogeneidade da degradação, poderem justificar os resultados aqui apresentados.

### 6.3.6.4 Profundidade com o *Pilodyn*®

O *Pilodyn*®, à semelhança do que se verificou em 6.3.5.4, conduziu mais uma vez a resultados pouco esperados. De facto, a reduzida profundidade deste ensaio fazia crer numa maior sensibilidade na avaliação do efeito do tratamento e consolidação. Verificou-se no entanto uma grande dispersão nos resultados obtidos.

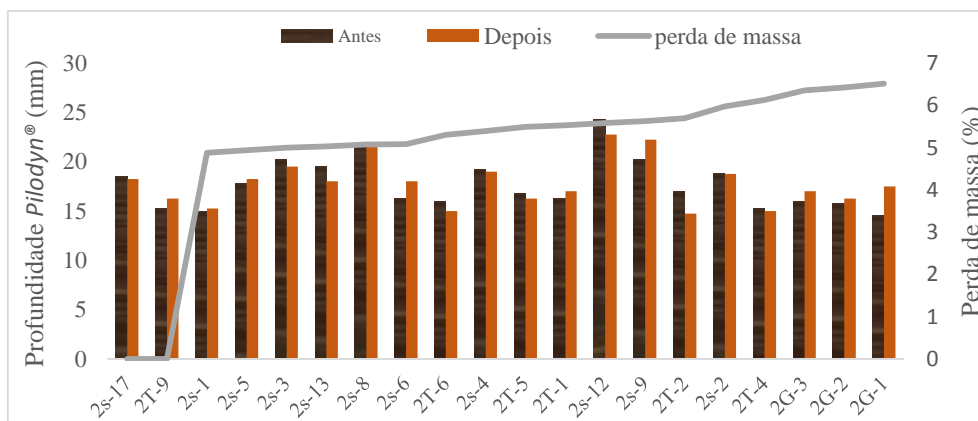


Figura 6.29 - Gráfico dos valores registados para a Profundidade com *Pilodyn*®, antes e após o tratamento e consolidação

Note-se que, mesmo para degradações superiores a 6% de perda de massa, os resultados apresentados não parecem estar em linha com o aumento de resistência mecânica verificado pelos restantes ensaios.

Considera-se, portanto, que o *Pilodyn*® não apresenta sensibilidade para a avaliação pretendida. É de notar mais uma vez que, a grande heterogeneidade da degradação dos provetes e as reduzidas perdas de massa, podem justificar estes resultados.

#### 6.4 Conclusão do capítulo

Estudou-se neste capítulo um conjunto de várias correlações para duas das espécies mais utilizadas na construção lisboeta, o Pinho bravo, *Pinus pinaster Ait.* e a Casquinha, *Pinus sylvestris L.* A amostra estudada apresenta grande heterogeneidade, pretendendo-se com isso representar a diversidade construtiva existente nas construções em madeira da cidade. É certo que o aumento da variabilidade da amostra é fator condicionante numa avaliação precisa das propriedades estudadas, contudo, o estudo pretende ser representativo da construção lisboeta em geral.

Com base nas correlações encontradas para a madeira sã, com valores de  $R^2$  situados entre 0,5 e 0,6 para a maioria dos casos testados, pode afirmar-se que tanto o *Resistograph*® como o *Pilodyn*® parecem ser úteis na estimativa da massa volúmica, resistência à compressão e resistência à indentação. O ensaio de dureza estática revelou-se ser o menos afetado pela heterogeneidade da amostra, apresentando-se por isso como um bom indicador da massa volúmica e das propriedades mecânicas da madeira. Parece ainda existir uma correlação forte entre os resultados dos ensaios com o *Resistograph*® e com o *Pilodyn*®, pensando-se assim que estes se possam complementar num processo de avaliação e diagnóstico.

No caso da madeira degradada, a grande dimensão dos provetes, a heterogeneidade da degradação obtida e as perdas de massa bastante próximas, conduziram a resultados menos satisfatórios do que o esperado. De facto, apenas para a resistência à compressão se conseguiu uma boa correlação com a perda de massa, onde um baixo incremento desta variável, conduz a uma significativa redução da resistência à compressão. Já a correlação estabelecida com a dureza superficial, embora exista, é menos significativa do que a de outros estudos. Quanto ao *Resistograph*® e ao *Pilodyn*®, apresentam-se pouco adequados para estimar o valor médio de pequenas degradações.

Após a aplicação do tratamento e consolidação aos provetes degradados e a repetição dos ensaios nestas novas condições, verificou-se um ganho de resistência mecânica através dos ensaios de compressão e dureza estática. No entanto, o método só parece surtir o efeito desejado para valores de perda de massa superiores a 6%. Também nesta avaliação, o *Resistograph*® e o *Pilodyn*® apresentaram-se pouco sensíveis, acreditando-se que a justificação esteja mais uma vez na

proximidade dos reduzidos valores de perdas de massa e na heterogeneidade da degradação dos provetes. No que respeita ao limite máximo de perda de massa para o qual o método é eficaz, o mesmo não foi possível de verificar neste estudo, ficando por isso a indicação de 20% para esse valor, pelas razões apontadas no capítulo 1.

Chama-se por fim a atenção para o ambiente controlado em que os ensaios se realizaram, em peças isentas de defeitos e com teor de água próximo dos 12%. Desta forma, a extrapolação destes dados para situações reais, onde não é possível um controlo rigoroso de defeitos, não se apresenta ainda como uma solução eficaz, mas justifica estudos futuros.

## 7 Caso de estudo: Palacete Ribeiro da Cunha

Apresenta-se neste capítulo a aplicação *in situ* do método de tratamento e consolidação estudado ao longo da presente tese. Escolheram-se 3 pontos de estudo distintos, entre elementos estruturais e não estruturais mediantemente degradados por fungos, com mediana perda de massa, considerados relevantes para o conhecimento da real eficácia do método nestas duas vertentes. Apresenta-se também uma estimativa das propriedades mecânicas dos elementos intervencionados, com base nos resultados dos ensaios não destrutivos realizados e nas correlações encontradas no capítulo 6.

### 7.1 Introdução

O estudo foi realizado num edifício nobre, datado de 1877 e com características construtivas típicas de um edifício pombalino, embora a sua data de construção já pertença ao período gaioleiro, segundo classificação de Oliveira & Cabrita, 1985. Quanto à madeira existente, pelo aspeto e período construtivo, é maioritariamente Pinho, parecendo pertencer às espécies *Pinus sylvestris L.* e *Pinus pinaster Ait.*, coincidindo assim com as espécies de madeira tratadas nesta tese.

De facto, como já referido em 5.1, o recurso a inspeções visuais e a técnicas não destrutivas (TND) é muitas vezes a única opção possível num processo de inspeção e diagnóstico (Henriques, 2011; Tannert, *et al.*, 2010), principalmente se existirem elementos de valor histórico ou artístico a conservar, como é o caso de tetos e estuques de valor patrimonial, presentes no edifício em análise. É neste sentido, que o carácter pouco invasivo do *Resistograph*® e do *Pilodyn*® leva à sua escolha para o auxílio à inspeção visual da estrutura (Pérez, 2011), ao mesmo tempo que a procura de mais informação direta ou indiretamente associada aos seus resultados, justifica o presente estudo.

Procedeu-se então de acordo com a seguinte metodologia:

- Seleção dos elementos a ensaiar por análise visual e instrumento cortante simples;
- Dentro de cada elemento a ensaiar, determinação de três pontos de ensaio, respetivamente em madeira sã, mediantemente degradada por fungos e completamente degradada por fungos;
- Limpeza e preparação dos elementos escolhidos;
- Ensaios com *Resistograph*® e *Pilodyn*® nos pontos de ensaio determinados;
- Aplicação do método de tratamento e de consolidação estudado;
- Nova análise com *Resistograph*® e *Pilodyn*®, para reconhecimento do efeito da consolidação.

No decorrer de todo o processo existiu um registo da temperatura do ar e dos teores de humidade, tendo sido os ensaios levados a cabo aquando da estabilização da última propriedade. Entre a

aplicação do tratamento com Bora-Care e a estabilização do teor em água decorreram 11 dias, tempo de espera necessário antes da aplicação do consolidante, o EPO1 55. Todos os registos efetuados podem ser consultados nos anexos do presente capítulo (anexos 7).

## 7.2 Apresentação do edifício

O edifício situa-se na Rua da Escola Politécnica, com a sua fachada principal virada para a Praça do Príncipe Real, no coração de Lisboa. Construído no ano de 1877, com projeto arquitetónico de Henrique Carlos Afonso, é um edifício original em estilo neo-árabe (Braga, 2013). Foi construído para residência de José Ribeiro da Cunha, um industrial que fez fortuna no Brasil, tendo sido mantido na família até 1901, ano em que terá sido vendido à família Seixas que o habitou por duas décadas, até vendê-lo novamente em 1920 a Manuel Coraça, que o terá deixado para a filha, chegando por casamento às mãos do médico Lopo de Carvalho (Anon., 2010). No ano de 1980, à exceção do último piso, que continuou a ser habitado pela família do médico, o palacete foi arrendado à Universidade Nova de Lisboa, que aí instalou os serviços de reitoria. Encontrando-se devoluto desde 2005, contando apenas com alguns alugueres de curta duração, foi recentemente adquirido pela empresa Eastbanc que o tornou num centro comercial e de *life style* (aberto em Setembro de 2013), considerado um projeto central para a valorização e elevação de charme da zona do Príncipe Real.



Figura 7.1 - a) Localização do Palacete; b) Fachada do Palacete Ribeiro da Cunha

Quanto à constituição do edifício, a mesma conta com uma área de construção de 2500 m<sup>2</sup> distribuída por quatro pisos, entre eles três andares abertos para um pátio interior e uma cave que se liga a um jardim com dois hectares de área. Apresenta duas fachadas principais de arquitetura semelhante, uma virada para a Praça do Príncipe Real, onde se encontra a entrada principal, e outra para a calçada da Patriarcal. A tardoz encontra-se o acesso ao jardim, que por sua vez faz fronteira com o Jardim Botânico de Lisboa.

O piso térreo foi inicialmente pensado para espaço de serviços, sendo o r/c e o 1º andar os espaços nobres do edifício, com pés direitos de 4 m, um átrio central de uma imponência extraordinária,

uma entrada principal ampla aliada a uma escada de grandes dimensões, tetos e paredes com estuques de valor único, além de todos os pormenores, também esses de um extraordinário nível de qualidade. O último piso destinava-se aos serviçais, apresentando por isso características menos nobres, como pés direitos baixos e irregulares, assim como acabamentos simples. O telhado é constituído por quatro cúpulas, por baixo das quais se encontram salas circulares de utilização diversa, e ainda por uma claraboia que ilumina todo o pátio interior, dando um brilho especial ao palacete.

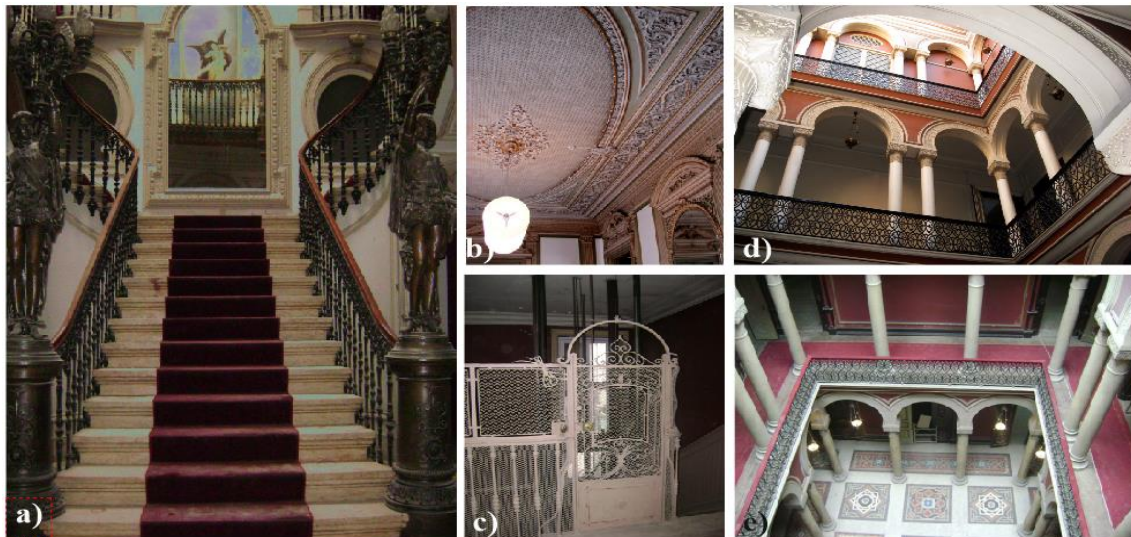


Figura 7.2 - a) Escadaria principal; b) Estuque de valor patrimonial; c) Elevador; d) Iluminação natural do átrio; e) Átrio central

O edifício apresenta a madeira como material de excelência, com a estrutura em gaiola pombalina, proporcionando assim um excelente comportamento antissísmico. De facto, desde a estrutura dos pavimentos, cobertura e escadas, às paredes mestras em frontal e aos tabiques, a madeira é o material utilizado.

O estado de conservação é em geral bom, existindo no entanto alguns locais onde se verificou, no passado, a entrada de água, quer por situações de fendilhação e descolamento de rebocos da fachada, por danos na caleira da cobertura ou ainda pela rotura de canalizações. Desta forma, encontram-se algumas situações de degradação, principalmente junto a janelas, na estrutura de cobertura e ainda junto a instalações sanitárias. Quanto ao tipo de degradação dos elementos de madeira, após uma inspeção visual cuidada, verificou-se ser a podridão por fungos o mais comum, nomeadamente fungos de podridão castanha do tipo húmida, resultantes de situações de humedificação frequente pelas razões acima descritas.

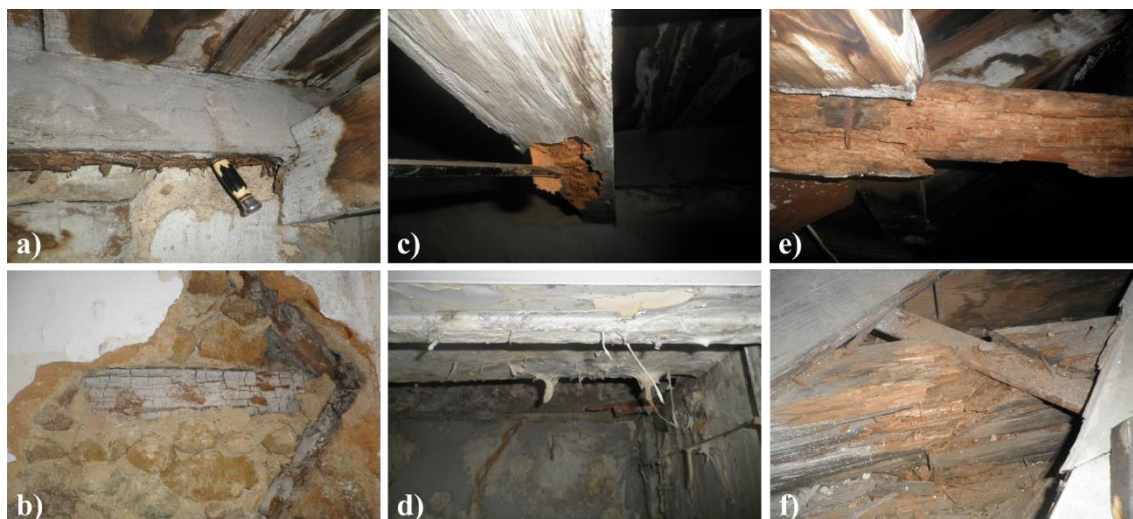


Figura 7.3 - a) Utilização da faca na inspeção visual; b) Podridão cúbica; c) Degradação por caruncho; d) Fungos de podridão; e) Degradação por térmitas; f) Podridão na viga da cobertura

Principalmente ao nível do último piso, que contacta com a cobertura, verificou-se também a existência de ataque por térmitas e ainda por caruncho grande e pequeno, um pouco por todos os madeiramentos.

### 7.3 Pontos de ensaio

Os pontos de ensaio escolhidos situaram-se na cobertura do edifício, por ser o local com um nível de degradação adequado ao estudo e por os andares mais nobres já estarem a sofrer intervenções por parte do seu proprietário. Optou-se por escolher uma costaneira de uma parede de tabique, um troço de uma escada e uma viga de pavimento pois, como referido, o grande objetivo passa por avaliar a eficácia do método de tratamento e consolidação de madeira mediantemente degradada por fungos, estudado ao longo da presente tese, tanto ao nível de elementos estruturais como não estruturais. Dentro de cada elemento em estudo, identificou-se uma zona mediantemente degradada por fungos, (estima-se que terá uma perda de massa abaixo de 20%, sendo a escolha deste valor justificada em 1), zona A, uma zona bastante degradada para comparação, zona B, e uma zona sã para controlo, zona C. A localização em planta dos elementos escolhidos pode ser consultada no anexo 7.4.



Figura 7.4 - a) Costaneira; b) Escadas; c) Vigas do pavimento

Conforme se verifica pelas imagens apresentadas, a intervenção foi realizada numa reduzida extensão, uma vez que a degradação existente tem um carácter local. Contudo, a curta extensão da intervenção em nada compromete os resultados dos ensaios.

Como referido, todos os elementos escolhidos se encontram no último piso do edifício, pertencendo por isso à classe de risco 2 de acordo com a norma NP EN 335-1:2011. Elementos desta classe estão sujeitos, como indicado em 4.5.1.2, a ataque por fungos de podridão, térmitas ou caruncho, tendo-se encontrado de facto todos estes tipos de degradação na inspeção visual realizada neste piso.

### 7.3.1 Costaneira

A parede de tabique com tábuas costaneiras localiza-se no tardoz do edifício, voltado a NE, por baixo de uma das cúpulas da cobertura. O espaço parece ter apresentado um uso diversificado ao longo dos tempos, pensando-se ter passado por arrumos, quarto de brinquedos e ainda por cozinha de serviçais. É como consequência desta última utilização que a degradação da costaneira tem lugar, pois imediatamente por cima da mesma existe a passagem de canalização, que promoveu a presença de água por rotura ou por má vedação de juntas. Também a orientação do local, que recebe pouca radiação solar, pode ter contribuído para o aumento do tempo de humidificação.

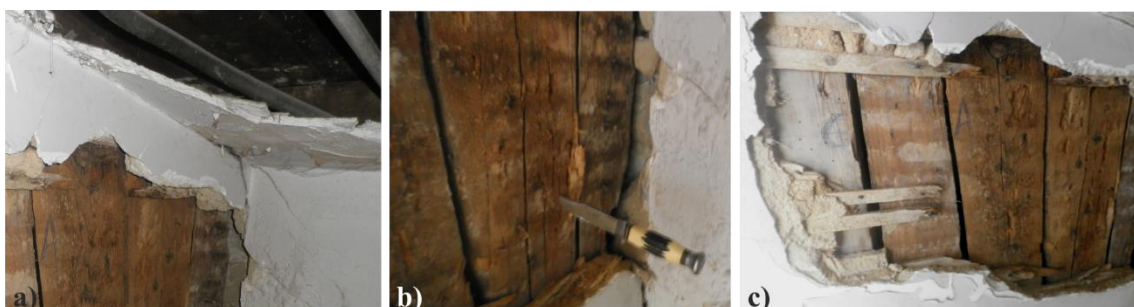


Figura 7.5 - a) Origem da degradação (canalização); b) Zona B (mais degradada); c) Zona A, B e C

O problema na canalização deve ter sido reparado mais tarde, pois o teor em água da costaneira encontrava-se estável à altura da intervenção. Contudo, a exposição prolongada à humidade conduziu ao aparecimento de fungos de podridão castanha, identificáveis pelas fendas em planos ortogonais que originam os característicos cubos. Pelo carácter não homogéneo da degradação foi possível identificar três tábuas costaneiras nas condições requeridas: são, mediantemente degradada e muito degradada.

### 7.3.2 Escadas

As escadas encontram-se voltadas a SE e situadas junto a uma janela, facilitando o acesso à mesma. Por baixo da janela encontra-se a caleira que circunda toda a cobertura, pensando-se que a causa para a entrada de água tenha sido alguma deficiência ao nível do material de revestimento dessa mesma caleira. Também neste caso o problema se encontra resolvido, contudo a existência de fungos de podridão foi uma realidade que degradou parte das tábuas constituintes das escadas.



Figura 7.6 - a) Zona A, B e C; b) Zona B, mais degradada

Foi igualmente possível distinguir neste elemento três partes com diferentes estados de degradação, indo ao encontro do pretendido.

### 7.3.3 Vigas do pavimento

As vigas do pavimento estudadas localizam-se numa arrecadação voltada a SW, com acesso através de uma sala redonda situada por baixo da cúpula principal. Este local encontra-se junto da caleira da cobertura, devendo a degradação encontrada ter resultado de alguma infiltração por este elemento. O soalho encontrava-se degradado por fungos de podridão, sendo que após se levantarem algumas tábuas se verificou a persistência do problema nas vigas do pavimento. Encontrou-se uma viga são, uma mediantemente degradada, principalmente na face superior, e uma terceira bastante degradada, tanto na face superior como nas laterais, evidenciando mesmo uma certa perda de secção.

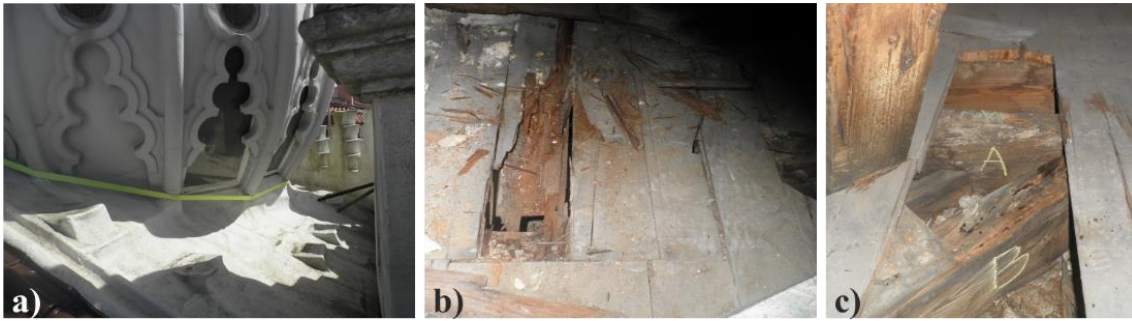


Figura 7.7 - a) Origem do problema (caleira); b) Identificação da degradação; c) Zona A e B

Mais uma vez os problemas de infiltração estavam resolvidos, confirmado pelos baixos teores de humidade apresentados pelas vigas.

#### 7.4 Tratamento e consolidação

Como exposto em 5.5, o processo de tratamento envolve duas partes. Uma primeira etapa, onde se aplica o produto de tratamento, o Bora-Care, e uma segunda, onde é aplicado o consolidante, o EPO 155, seguindo a metodologia apresentada em 6.2.5. O tratamento foi aplicado em todas as zonas em estudo, contudo, o consolidante apenas se aplicou nas zonas A, mediantemente degradadas. Esta opção deve-se ao facto de, nas zonas B, muito degradadas, e C, sãs, não se esperar à partida conseguir um aumento de resistência, conforme justificado em 6.3.6.

Procedeu-se então à limpeza das secções a tratar e aplicou-se o produto de tratamento à trincha em toda a secção, de forma lenta e cuidada, tendo-se recorrido a injeções sempre que se justificou, com a finalidade de promover a melhor penetração possível do produto. O acréscimo do teor de água que este hidrossolúvel promove conduziu ao controlo regular desta variável até à sua estabilização para os valores inicialmente registados, que aconteceu 11 dias depois, à semelhança do que se verificou laboratorialmente.



Figura 7.8 - Aplicação do consolidante a) Costaneira; b) Escadas; c) Vigas do pavimento

Aplicou-se então o consolidante EPO 155, após preparação *in situ* da mistura com o endurecedor K 156, a qual foi mantida junto a uma placa de congelação para assegurar uma temperatura baixa

e retardar a reação exotérmica que se produz. Também nesta fase se recorreu à trincha para aplicação do produto em camadas sucessivas até a madeira deixar de ter capacidade de absorção.

## 7.5 Ensaios não destrutivos

Ao longo da campanha experimental no edifício recorreu-se a três aparelhos, o higrómetro de superfície, o *Pilodyn*® e o *Resistograph*®.

O higrómetro de superfície para medição do teor em água, tendo sido utilizado, após a limpeza dos elementos, antes e depois da aplicação do produto de tratamento e após a aplicação do consolidante, tendo sido os seus resultados determinantes para a possibilidade ou não de se prosseguir na campanha. De facto, a estabilização desta propriedade foi um fator condicionante, com prejuízo de resultados falseosos com base em teores de água não controlados.

A avaliação da resistência ao impacto com o *Pilodyn*®, e da resistência à perfuração com o *Resistograph*® foi realizada em todas as partes dos elementos estudados, tendo sido os seus pontos de ensaio próximos e relacionáveis. Realizaram-se mais ensaios com o *Pilodyn*®, para representatividade dos resultados, uma vez que a sua medição é bastante superficial.

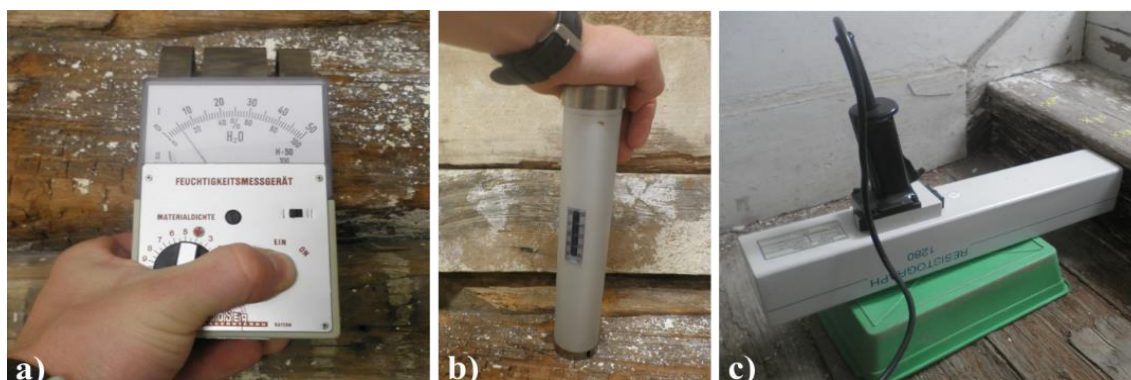


Figura 7.9 - a) Higrómetro de superfície; b) *Pilodyn*®; c) *Resistograph*®

Os ensaios com estes aparelhos foram realizados antes e depois da aplicação do tratamento e consolidação, para condições de humidade estáveis e semelhantes, tendo sido os pontos de ensaio identificados para uma comparação de resultados fidedigna.

## 7.6 Análise de resultados e discussão

Apresenta-se neste subcapítulo os resultados obtidos com os ensaios realizados, fazendo-se a comparação dos pontos identificados como A, mediamente degradados por fungos, antes e após o seu tratamento e consolidação. Como referido em 7.3, a zona B, muito degradada por fungos, foi utilizada para comparação e a zona C, sã, para referência, não tendo sido aplicado o consolidante em nenhuma destas situações.

Os valores aqui apresentados são valores médios assentes num tratamento estatístico realizado entre todas as medições efetuadas. No caso do *Pilodyn*®, o valor lido no equipamento é o valor dessa medição, sendo, para o *Resistograph*®, necessário um tratamento dos resultados para se ter o valor do ensaio. Neste caso, conforme referido em 5.2.2, o valor médio, excluindo 2 mm a partir de cada extremidade do gráfico, fornece a medida resistográfica. Pelo verificado por Henriques, 2011, a influência do produto consolidante apresenta uma extensão de cerca de 10 mm. Como o objetivo passa por avaliar o efeito do tratamento e consolidação, optou-se por determinar a medida resistográfica numa extensão de 10 mm para os elementos não estruturais, de espessura menor, e 15 mm para as vigas, rejeitando sempre os 2 mm iniciais, considerados como zona de perturbação.



Figura 7.10 – Exemplo de um perfil resistográfico e da extensão considerada para avaliar o efeito do consolidante

Todos os valores registados ao longo da campanha experimental apresentam-se nos anexos do capítulo (anexos 7).

### 7.6.1 Costaneira

A costaneira encontra-se por baixo de uma das cúpulas do edifício, a fazer divisão com uma zona inabitável onde, ao longo da campanha experimental, se verificou uma certa corrente de ar. Esta pode justificar os baixos teores de água das zonas A e B, associando-se o seu valor à perda de secção e à abertura de fendas, resultantes da degradação por fungos de podridão, que terá facilitado a secagem dos mesmos comparativamente à zona C. Também o funcionamento do próprio higrómetro, baseado no facto da condutibilidade elétrica da madeira aumentar com o seu teor em água, perde bastante rigor com a existência de pequenas fendas, típicas de situações de degradação.

Quanto ao efeito da aplicação do tratamento e consolidação, este parece ter potenciado o ganho de resistência, conforme se pode verificar pela análise dos valores apresentados na tabela 7.1. De facto, existe um aumento de resistência comprovado pela medida resistográfica, que sobe cerca de 1 valor após a aplicação do tratamento e consolidação.

Costaneira				
Propriedades – valores médios	A		B	C
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	4	5	2	12
Medida resistográfica Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	8,5	9,2	6,3	13,1
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	-	-	-	12,3

Tabela 7.1 - Quadro resumo dos ensaios na costaneira

Tal como esperado, a costaneira não chega a atingir valores atribuíveis a um elemento são, mas existe uma melhoria significativa que aponta para a manutenção *in situ* dos elementos tratados e consolidados.

O *Pilodyn*® apenas foi possível de utilizar na zona C, pois era a única tábua costaneira contraventada. A zona A e B não permitiram assim o ensaio com este equipamento, não podendo por isso estabelecer-se a comparação.

Fazendo referência ao capítulo 6.3.1.3 e ao gráfico da figura 6.14, é possível estimar a massa volumica para a zona C, uma vez que o seu teor em água é de 12%. Este assunto será abordado em 7.6.5.

## 7.6.2 Escadas

A escada apresenta um teor de água não muito variável entre as zonas identificadas, sendo no entanto a zona B, mais degradada, aquela onde o teor de água é inferior.

Quanto à aplicação do *Resistograph*®, além de confirmar a escolha devida dos locais de ensaio, demonstra um ganho real da resistência à perfuração após a aplicação do tratamento e consolidação. Como se pode observar na tabela 7.2, embora o valor registado seja inferior ao da zona sã, houve um ganho substancial de resistência.

Escada				
Propriedades – valores médios	A		B	C
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	10	10	7	9
Medida resistográfica Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	6,4	8,7	1,0	11,6
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	14,1	11,4	17,8	11,4

Tabela 7.2 - Quadro resumo dos ensaios nas escadas

O mesmo se verificou com a utilização do *Pilodyn*®, em que a penetração na zona A, após o tratamento e consolidação, aproximou-se bastante da registada para a madeira sã da zona C, fazendo crer na eficácia do método aplicado e apontando para a grande dureza superficial que o consolidante estudado promove.

### 7.6.3 Vigas do Pavimento

Nas vigas de pavimento, o único elemento estrutural em estudo, verificou-se que o teor em água da viga B era mais uma vez francamente inferior ao registado na viga A e C.

Os ensaios com o *Resistograph*® e *Pilodyn*® demonstram um ganho extraordinário de resistência após a aplicação do tratamento e consolidação, o qual se pode verificar pelos valores apresentado na tabela 7.3. De facto, houve um aumento elevado da medida resistográfica e uma diminuição da penetração com o *Pilodyn*®.

Vigas do Pavimento				
Propriedades – valores médios	A		B	C
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	7	8	3	7
Medida resistográfica $M_{r_{\text{médio}}}$ (20cm/min)	11,8	15,6	7,0	12,8
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	14,8	13,9	21,3	16,2

Tabela 7.3 - Quadro resumo dos ensaios nas vigas do pavimento

Quanto à viga C, sã e de referência, parece que a escolha da mesma não foi a mais adequada, deixando a ideia de se tratar de uma madeira diferente das restantes. De facto, tanto o *Resistograph*® como o *Pilodyn*® apresentaram melhores resultados para a viga A, tratada e consolidada, do que para a viga C, sã, o que não faria muito sentido caso se tratasse da mesma madeira.



Figura 7.11 - Posição das vigas A, B e C

Também a posição e a espessura da viga C, não alinhada com as vigas A e B, vem fortalecer esta ideia.

### 7.6.4 Efeito da consolidação

Com base nos pressupostos apresentados para fundamentar a presente tese e no exposto em 6.3.6, esperava-se um ganho de resistência após a aplicação do tratamento e consolidação estudado. Esperava-se igualmente concluir sobre as diferenças existentes aquando da aplicação em elementos estruturais ou não estruturais e pretendia-se ainda a avaliação da sua eficácia pelo

recurso a ensaios não destrutivos, uma vez que todo o trabalho desenvolvido é voltado para a conservação do património e intervenções pouco invasivas.

Neste sentido, e com base nos resultados apresentados nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, pode verificar-se que a consolidação promoveu um ganho de resistência em todos os elementos estudados.

#### 7.6.4.1 Medições com o *Resistograph*®

Analisando dois perfis de densidade comparáveis, referentes à situação antes e após o tratamento e consolidação, é possível verificar que realmente existiu um ganho de resistência mecânica junto à superfície de aplicação.

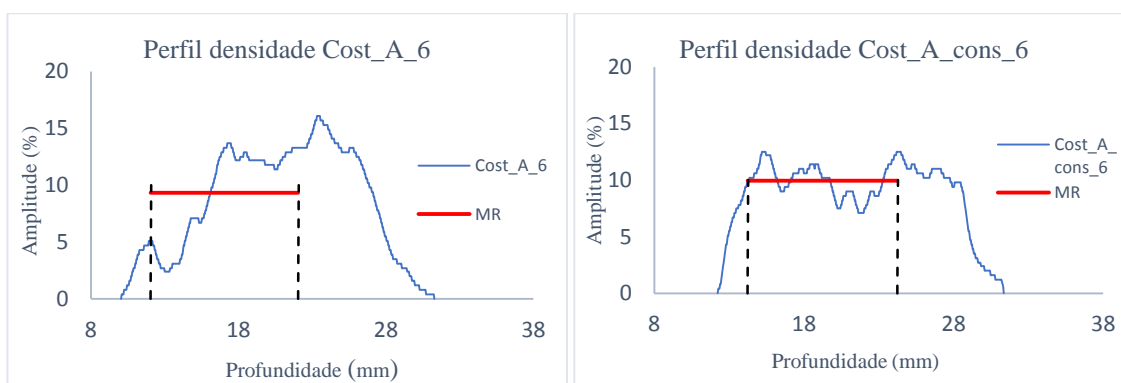
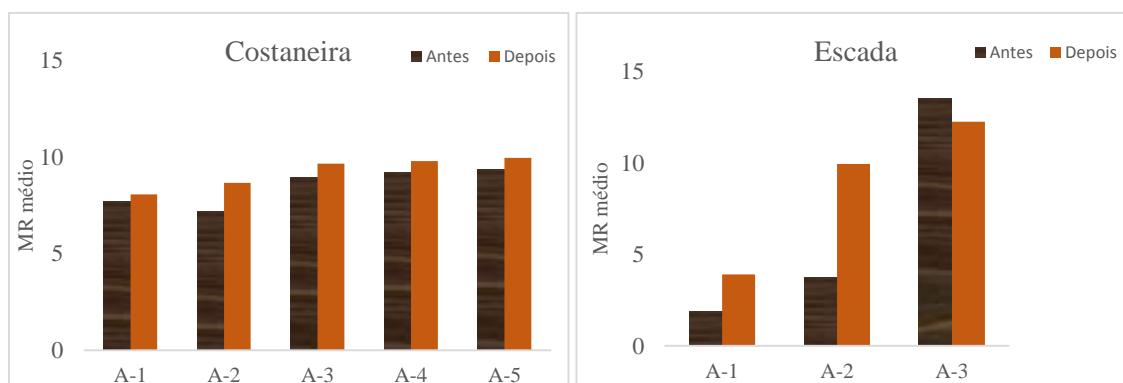


Figura 7.12 – Análise de perfis resistográficos comparáveis com verificação do ganho de resistência

Também pela observação individual dos valores registados pelo *Resistograph*®, resumidos na figura 7.13, é possível constatar, que para a quase totalidade dos pontos de ensaio, existiu um aumento de resistência após a aplicação do tratamento e consolidação. É ainda de salientar que o tratamento parece ter sido mais eficaz em zonas que inicialmente apresentavam mais degradação e como consequência, maior espaço intercelular para o consolidante fluir (Nunes, *et al.*, 2005), como é exemplo o ensaio A-2 e A-3 do gráfico do pavimento.



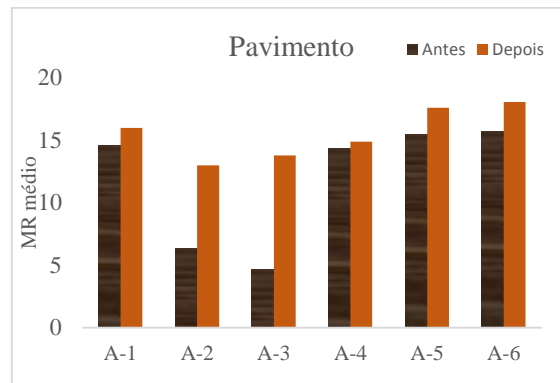


Figura 7.13 – Gráficos dos valores registados pelo *Resistograph*® antes e após o tratamento e consolidação

Apenas para o ensaio A-3 da escada se verificou um efeito contrário. Contudo, como se pode ver pela análise do gráfico, este ensaio, realizado antes da aplicação do tratamento e consolidação, apresenta um valor bastante superior aos restantes, deixando a ideia de uma zona menos degradada ou com a presença de algum defeito que possa ter influenciado o registo do *Resistograph*®.

#### 7.6.4.2 Medições com o *Pilodyn*®

Também pela análise dos valores da profundidade registada com o *Pilodyn*®, facilmente se verifica uma diminuição da penetração deste equipamento, associando-se esta ao ganho de resistência e à eficácia do processo de tratamento e consolidação.

Como referido anteriormente, o ensaio com este equipamento não foi possível para a costaneira, uma vez que não existia contraventamento, o que iria influenciar o resultado. Na figura 7.14 apresenta-se o resumo dos valores obtidos para a escada e para o pavimento, antes e após a aplicação do tratamento e consolidação.

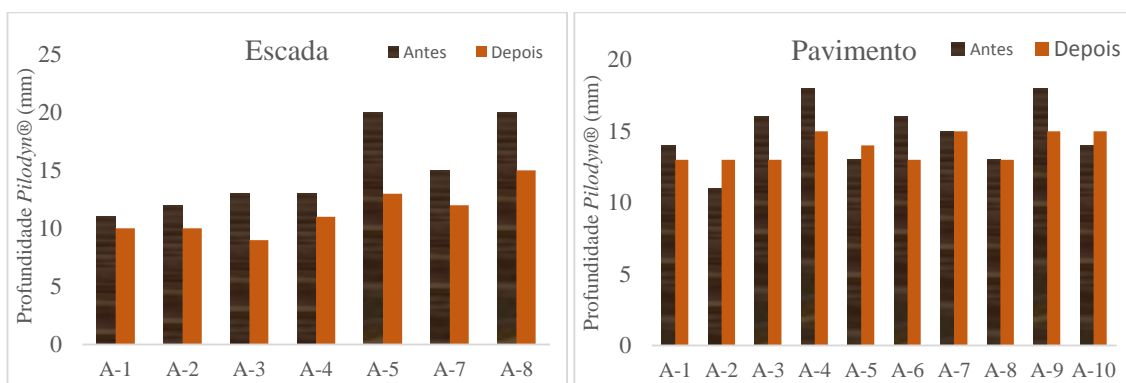


Figura 7.14 – Gráficos dos valores registados pelo *Pilodyn*® antes e após o tratamento e consolidação

Como se verifica, para a escada existe sempre uma diminuição da profundidade atingida, evidenciando isso excelentes resultados. Quanto ao pavimento, a tendência é sem dúvida para o ganho de resistência após a aplicação do método estudado, contudo existem alguns ensaios que não evidenciam esse fenómeno. Nos ensaios A-2, A-5 e A-10, existiu mesmo um aumento de

penetração após o tratamento e consolidação, associando-se este a uma zona onde a consolidação não terá sido eficaz, ou simplesmente a um erro experimental.

Um outro fator importante é a média dos valores registados com este ensaio, comparativamente à zona C, sã e de referência. De facto, conforme apresentado na tabela 7.2, o valor médio da penetração na zona A após o tratamento e consolidação (11,38 mm) chega a ser ligeiramente inferior ao registado na zona C (11,40 mm), madeira sã, o que evidencia a grande dureza superficial que este método potencia.

### 7.6.5 Estimar propriedades físico-mecânicas *in situ*

Como referido no capítulo 1, um dos grandes objetivos deste estudo é caminhar no sentido de conseguir obter o maior número de informação por técnicas não destrutivas. Pretende-se assim que, em harmonia com a procura de informação como a idade e a história do edifício, seja possível fazer uma caracterização aproximada do estado de conservação do elemento avaliado através de técnicas não destrutivas, nomeadamente através de ensaios com *Resistograph*® e *Pilodyn*®. De facto, esse é o caminho, mas a realidade é que a grande heterogeneidade e variabilidade da madeira ainda não o permite fazer com rigor.

Contudo, apresenta-se neste tópico uma estimativa para as propriedades dos elementos são analisados, com base nas correlações encontradas no capítulo 6, como resultado da realização de ensaios destrutivos e não destrutivos, levados a cabo na campanha laboratorial desenvolvida nesta tese.

Propriedade	Mr médio (20cm/min) <i>in situ</i>	Resistência à compressão, $f_{c,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$ (N)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Reta de tendência	-	$y = 0,2246x + 2,9058$	$y = 0,0029x + 2,6416$	$y = 0,031x - 5,0532$
Costaneira	13,1	45,5	3611	586,0
Escadas	11,6	38,8	3094	537,6
Pavimento	12,8	44,0	3499	575,6

Tabela 7.4 - Estimativa das características em função da medida resistográfica

Chama-se a atenção para o facto das equações das retas de tendência serem estabelecidas para teores em água de 12%. Desta forma, existe ainda um erro acrescido nos valores apresentados em função das diferenças dos teores de água, pela influência que este fator apresenta (Machado, 2013). De facto, apenas na costaneira se verificou um teor de água de 12% na zona C, sendo por isso os valores apresentados para este elemento os mais próximos da realidade. Assim, com base no valor médio de MR e na equação da reta de tendência da correlação, a massa volúmica deste elemento seria de aproximadamente 586 kg/m<sup>3</sup>, sendo este um valor aceitável para madeira de Pinho bravo de acordo com a ficha técnica M2 do LNEC (Cruz, et al., 1997). Através deste exemplo de aplicação, facilmente se depreende as inúmeras vantagens que as correlações de

resultados podem trazer. De facto, se através de ensaios não destrutivos se conseguir fazer uma boa aproximação dos valores das propriedades físico-mecânicas dos elementos avaliados, estamos perante um grande passo no que à conservação e reabilitação de madeira diz respeito, principalmente em edifícios de valor histórico ou artístico.

Na tabela 7.5 apresenta-se uma estimativa das propriedades dos elementos sãos em função do ensaio com o *Pilodyn*®.

Propriedade	<i>Pilodyn</i> ® (mm) <i>in situ</i>	Resistência à compressão, $f_{c,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$ (N)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Reta de tendência	-	$y = -0,2852x + 25,387$	$y = -0,0034x + 25,165$	$y = -0,0391x + 35,333$
Costaneira	12	45,8	3774	588,2
Escadas	11	49,0	4049	612,1
Pavimento	16	32,3	2646	490,2

Tabela 7.5 - Estimativa das características em função da profundidade com *Pilodyn*®

Conclui-se que, para a costaneira, a correlação encontrada através do ensaio com *Pilodyn*® conduziu a um valor semelhante de massa volúmica ao obtido com o *Resistograph*®. De facto, mesmo as estimativas das outras propriedades para este elemento, são bastante semelhantes das conseguidas através do ensaio com *Resistograph*®. Conseguem-se assim alguma confiança nos resultados apresentados para teores em água próximos dos 12%.

Alerta-se no entanto mais uma vez, para o facto da extrapolação de dados laboratoriais para situações reais ainda não ser um processo seguro, e por isso ter de ser feito com extremo cuidado. Desta forma, em linha com outros autores (Lladró, *et al.*, 2006; Branco, *et al.*, 2010; Henriques, 2011; Jasienco, *et al.*, 2013), aconselha-se uma aplicação cautelosa deste método e dos seus resultados, uma vez que *in situ*, a limitação de defeitos é bastante difícil. Numa futura investigação, por se considerar relevante a validação dos dados apresentados, serão realizados ensaios laboratoriais em vigas retiradas do edifício estudado, caminhando-se assim para o conhecimento das reais condições de serviços dos elementos estruturais de madeira, pela aplicação *in situ* de técnicas não destrutivas.

## 7.7 Conclusões do capítulo

Esta campanha experimental tinha como objetivo concluir sobre a eficiência do *Pilodyn*® e do *Resistograph*® na avaliação do estado de conservação dos elementos a intervir, assim como conhecer a real eficácia da aplicação *in situ* do método de tratamento e consolidação de elementos mediantemente degradados por fungos, apresentado na presente tese. Pretendia-se ainda estimar as propriedades físico-mecânicas dos elementos intervir com base na campanha laboratorial desenvolvida no capítulo 6.

Quanto à utilização dos equipamentos mencionados, conclui-se o seu excelente desempenho como meio auxiliar de diagnóstico, permitindo concluir em situações dúbias de degradação e fornecer resultados de fácil leitura e interpretação. Chama-se no entanto a atenção para a sua não aplicabilidade em locais de reduzidas dimensões e difícil acesso, pela sua própria geometria. O *Resistograph*®, comparativamente ao *Pilodyn*®, embora não forneça dados de forma direta, apresenta-se como um equipamento mais completo para a utilização pretendida.

Pela realização destes ensaios não destrutivos, antes e após a aplicação do método de tratamento e consolidação estudado, conclui-se a sua eficácia. É de notar que, no capítulo 6, os resultados destes ensaios não o permitiram fazer, contudo, as perdas de massa que os elementos *in situ* apresentavam eram francamente superiores, possibilitando por isso um maior efeito de consolidação e a sua deteção por estes ensaios. De facto, para a grande maioria das situações foi promovido o ganho de resistência dos elementos intervencionados. Desta forma, afirma-se que este método pode e deve ser utilizado em situações de reabilitação de elementos estruturais ou não estruturais, que pelo seu valor histórico ou artístico devem ser conservados.

Quanto à estimativa das propriedades dos elementos intervencionados, com base nas correlações encontradas no capítulo 6, parecem fornecer valores aceitáveis para teores de humidade próximos dos 12%. Contudo, embora este seja o caminho a seguir, a realidade é que a grande heterogeneidade e variabilidade da madeira ainda não o permite fazer com rigor. Deve assim continuar-se a investigação neste campo, com vista a que um dia seja possível, através de simples ensaios não destrutivos, conseguir estimar *in situ* as propriedades físico-mecânicas da madeira.

## 8 Considerações finais e áreas de desenvolvimento futuro

Pretende-se neste capítulo concluir sobre todo o trabalho realizado ao longo da presente tese, fazendo considerações no âmbito dos seus objetivos e indicando depois áreas de desenvolvimento futuro.

### **8.1 Considerações finais**

Como referido no capítulo 1, o estudo trata madeira antiga de Pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*) e Casquinha (*Pinus sylvestris L.*), com idades entre 100 e 200 anos, pela sua grande representatividade no parque habitacional Português, tendo-se dividido os trabalhos em três etapas.

A primeira refere-se a uma larga campanha laboratorial, com a realização de ensaios não destrutivos, com *Resistograph*® e *Pilodyn*®, e ensaios destrutivos, compressão axial e dureza estática, em provetes sãos e degradados. Tinha-se como objetivo estabelecer correlações entre os ensaios não destrutivos e as propriedades físico-mecânicas da madeira, contribuindo assim para a obtenção do maior número de informação conseguida por técnicas não destrutivas, num processo de inspeção e diagnóstico. De facto, à exceção da perda de massa, os ensaios conduziram ao estabelecimento de correlações de propriedades, fazendo crer na possibilidade de conhecer características físico-mecânicas da madeira avaliada *in situ*, através dos ensaios não destrutivos referidos.

Contudo, chama-se a atenção que, a extrapolação das correlações encontradas para os elementos estruturais deve ser feita com extremo cuidado por existirem fatores, como defeitos ou alterações do teor de água da madeira, não considerados em laboratório. Desta forma, considera-se que, embora o *Resistograph*® e *Pilodyn*® sejam ferramentas de extrema utilidade num processo de inspeção e diagnóstico, nomeadamente em situações dúbias de degradação, ainda não permitem conhecer, de forma segura, o valor de propriedades como a massa volúmica, a resistência à compressão axial ou a dureza superficial. No entanto, lembra-se a necessidade da realização de mais estudos neste âmbito, pela vantagem que isso pode representar num processo de inspeção e diagnóstico.

Ainda em laboratório, sobre os provetes degradados, aplicou-se o método de tratamento e consolidação apresentado ao longo da presente tese. Este consiste na aplicação de um preservador líquido para cessar a atividade do fungo, o Bora-Care, e na posterior utilização de um consolidante, o EPO155. Concluiu-se, através da realização dos mesmos ensaios acima referidos, a sua eficácia para madeiras com perda de massa superior a 6%. No que respeita ao limite de aplicabilidade do método, considera-se o valor de 20% em perda de massa pelo exposto no

capítulo 1, não se tendo no entanto corroborado este valor no presente estudo pelas reduzidas perdas de massa trabalhadas. Paralelamente à campanha laboratorial realizou-se o mesmo tratamento e consolidação em madeira mediamente degradada por fungos, num edifício datado de 1877, situado no coração de Lisboa, e construído com as espécies de madeira aqui tratadas. Pela realização de ensaios com *Resistograph*® e *Pilodyn*®, antes e após a aplicação do método, conclui-se mais uma vez a sua eficácia no que respeita ao ganho de resistência dos elementos intervencionados. Mais ainda, aponta-se para a possibilidade de execução do tratamento *in situ* de forma relativamente simples, à exceção de elementos muito inclinados, onde a fixação dos produtos é dificultada. Quanto à utilização do *Resistograph*® e *Pilodyn*® conclui-se o seu excelente desempenho como meio auxiliar de diagnóstico. Chama-se no entanto a atenção para a sua não aplicabilidade em locais de reduzidas dimensões e difícil acesso, pela sua própria geometria.

Por fim, pretendeu-se utilizar as correlações encontradas em laboratório para estimar as propriedades físico-mecânicas dos elementos intervencionados no caso de estudo apresentado. Estas parecem fornecer valores aceitáveis para teores em água próximos dos 12%, principalmente no que à estimativa da massa volúmica diz respeito. É de referir no entanto, que os valores estimados e apresentados em 7.6.5 são meramente indicativos, não existindo ainda suporte científico que o permita fazer de forma segura e inquestionável. Fica no entanto a ideia do contributo que as desejadas correlações de propriedades podem fornecer num processo de inspeção e diagnóstico.

## 8.2 Áreas de desenvolvimento futuro

Tendo como pano de fundo o trabalho aqui desenvolvido e as conclusões apresentadas, indicam-se algumas áreas de desenvolvimento futuro:

- Continuar a procura por correlações de propriedades entre ensaios destrutivos e não destrutivos, no sentido de aumentar o grau de conhecimento nesta área, caminhando para valores cada vez mais próximos da realidade;
- Aplicar o processo de tratamento e consolidação a um vasto número de casos de estudo, no sentido de fortalecer os resultados aqui encontrados;
- Avaliar a durabilidade do método de tratamento e consolidação proposto, por processos de envelhecimento em laboratório ou através de casos de estudo;
- Procurar conhecer a profundidade de penetração do método de tratamento e consolidação apresentado;
- Estudo de vigas retiradas do edifício que serviu de caso de estudo nesta tese, para avaliar o grau de confiança das propriedades estimadas e avaliar o efeito real do método de tratamento e consolidação estudo, através de ensaios destrutivos;

- Estudar separadamente as madeiras de Casquinha e Pinho bravo, por ensaios destrutivos e não destrutivos, para conhecer o efeito de cada uma destas espécies nas correlações encontradas;
- Utilizar outros métodos de ensaio não destrutivos como sejam os ultra-sons, a termografia ou os raios gama, para estimar as propriedades da madeira *in situ*.



## Referências bibliográficas

- Andrade, H., 2011. *Caracterização de edifícios antigos. Edifícios "Gaioleiros"*. Lisboa: FCT.
- Anon., 2008. *educa.fc.up.pt*. [Online] Available at: <http://educa.fc.up.pt/ficheiros/noticias/69/documentos/108/Manual%20Pol%20Alimeros%20e%20Materiais%20polimericos%20NV.pdf> [Acedido em 21 05 2013].
- Anon., 2010. *DN GENTE*. [Online] Available at: [http://www.dn.pt/gente/interior.aspx?content\\_id=1635977&success=1](http://www.dn.pt/gente/interior.aspx?content_id=1635977&success=1) [Acedido em 08 06 2013].
- Appleton, J., 2003. *Reabilitação de edifícios antigos. Patologias e tecnologias de intervenção*. Lisboa: Edições Orion.
- Appleton, J., 2011. *Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção*. 2ª ed. Amadora: Orion.
- Baião, M. & Appleton, J., 1994. Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Constituição, patologia e reabilitação. Em: *2º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. Lisboa: LNEC, pp. 233-242.
- Berti, S. & Pizzo, B., 2004. Valutazioni su interventi eseguiti con resine epossidiche nel passato. *Manuale del legno strutturale - Interventi sulle strutture*, IV (Editore Mancosu), pp. 348-361.
- Braga, I., 2013. *O CORVO*. [Online] Available at: <http://ocorvo.pt/2013/04/02/bazar-oriental-em-palacete-lisboeta-2/> [Acedido em 08 06 2013].
- Branco, J., Piazza, M. & Cruz, P., 2010. Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests. *Construction and Building Materials*, 24(3), pp. 371-383.
- Brites, R., Lourenço, P. & Machado, J. S., 2006. Selected research and case studies in ancient Portuguese structures. Em: *International Workshop on "Earthquake Engineering on Timber Structures"*. Coimbra: s.n., pp. 17-32.
- Caldeira, F., 2010. Boron in wood preservation. A review in its physico-chemical aspects. Em: *Silva Lusitana 18*. Oeiras, Portugal: UISPF, L-INIA, pp. 179-196.
- Campos, A., Macedo, L. B., Bortolucci, M. & Lahr, F., 2013. Evaluation of health conditions of wooden structures of the former slave quarters of farm Santa Maria do Monjolinho, located in the state of São Paulo, Brazil. Em: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 1096-1101.
- Carvalho, A. d., 1996. *Madeiras Portuguesas*. Vol.I ed. Lisboa: Instituto Florestal.

- Clausen, C., 2000. Recognize, remove and remediate mold and mildew. Em: *2º Anual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Wood-Frame Housing*. Madison: Forest Products Society, pp. 231-234.
- Clausen, C. & Yang, V., 2007. Protecting wood from mould, decay, and termites with multi-component biocide systems. Em: *International Biodeterioration & Biodegradation*. pp. 20-24.
- Cruz, H., 2001. *Patologias, avaliação e conservação de estruturas de madeira*. Santarém: LNEC.
- Cruz, H., 2011. *Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira - 1ª Jornadas de Materiais na Construção*. Porto, FEUP.
- Cruz, H. & Machado, J., 2013. Effects of beetle attack on the bending and compression strength properties of pine wood. Em: *Structural Health Assessment of Timber Structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 145-151.
- Cruz, H., Machado, J., Moura, J. & Córias, V., 2000. Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos. Em: *REPAR 2000 - Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas*. Lisboa: LNEC, pp. 825-834.
- Cruz, H., Machado, J. S. & Nunes, L., 1994. Problemas de conservação de madeira em edifícios. Em: *2º enfore - Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios*. Lisboa: LNEC, pp. 301 - 312.
- Cruz, H., Machado, J. S. & Nunes, L., 1999. Inspeção e avaliação de estruturas de madeira. Em: *Estruturas de Madeira: Reabilitação e Inovação*. Lisboa: LNEC.
- Cruz, H., Machado, J. S., Rodrigues, M. & Monteiro, G., 1997. *Madeira para a construção - Pinho bravo para estruturas - Ficha técnica M2*. Lisboa: LNEC.
- Cruz, H. & Nunes, L., 2005. *A madeira como material de construção*. Lisboa, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Cruz, H. & Nunes, L., 2012. [www.academia.edu](http://www.academia.edu). [Online] Available at: <http://www.academia.edu/3362799/Madeira> [Acedido em 06 06 2013].
- Cruz, H. & Rodrigues, M., 2000. *Madeira para construção - Humidade da madeira - Ficha técnica M9*. Lisboa: Sector de Artes Gráficas do LNEC.
- Cruz, H. et al., 2013. Guidelines for the on-site assessment of historic timber structures. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*.
- Curlin, S., Clausen, C. & Winandy, J., 2002. Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Issue 49, pp. 13-19.

- Custódio, J., Cruz, H. & Broughton, J., 2008. Preparation method and service conditions effects on the performance and durability of epoxy adhesives used in structural timber repairs. Em: *11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Istanbul, Turquia: Istanbul Technical University.
- Duarte, A. P., 2001. *Desenvolvimento de Soluções Poliméricas para Recuperação de Madeiras Antigas por Impregnação*. Lisboa: IST.
- Eaton, R. A. & Hale, M., 1993. *Wood. Decay, pests and protection*. London: Chapman & Hall.
- Edlund, M. & Nilsson, T., 1998. Testing the Durability of wood. *Materials and Structures*, Volume 31, pp. 641-647.
- Feio, A., 2006. *Inspection and diagnosis of historical timber structure: NDT correlation and Behavior. Tese apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de doutor em engenharia civil*. Braga, Portugal: Uminho.
- Feio, A. & Lourenço, P. B., 2005. *Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos - "Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres- Bem utilizar a madeira"*. Braga, Universidade do Minho.
- Giurini, E., Marini, A., Cominelli, S. & Gubana, A., 2013. The Penetration Test to Evaluate Wood Decay after 20 Years Timber Structure Assessment Experience. Em: *Structural Health Assessment of Timber Structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, pp. 201-208.
- Goggins, C., 2008. Trends in timber preservation - A global perspective. *Journal of Tropical Forest Science* 20, pp. 264-272.
- Gorlacher, R., 1987. Non destructive testing of wood: in situ method for determination of density. *Holz as Roh-und Werkstoff*, Volume 45, pp. 273-278.
- Green, D. W., Winandy, j. E. & Kretschmann, D. E., 1999. Mechanical Properties of Wood - Wood as an Engineering Material. Em: *Wood handbook*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Servic, Forest Products Laboratory.
- Groot, C. & Gunneweg, J., 2004. Water permeance problems in single wythe mansony walls: the case of wind mills. *Construction and Building Materials*, Volume 18, pp. 325-329.
- Guerreiro, O., Borges, A. & Borges, P., 2009. *A térmita de madeira seca Cryptotermes brevis (Walker) na cidade de Angra do Heroísmo: Monitorização e controle dos voos de dispersão e prevenção da colonização*. Angra do Heroísmo: Grupo da Biodiversidade dos Açores - CITAA, Dep. Ciências Agrárias, Universidade dos Açores.
- Hasníková, H. & Kuklík, P., 2013. Investigation of timber members at Masarik station in Prague by non-destructive methods. Em: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 243-249.

- Henriques, D., 2011. *Tratamento e consolidação de madeira de Pinho bravo degradada em elementos estruturais de edifícios antigos. Tese apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de doutor em engenharia civil*. Lisboa: IST.
- Henriques, D., Brito, J., Duarte, S. & Nunes, L., 2013. Consolidating preservative-treated wood: Combined mechanical performance of boron and polymeric products in wood degraded by *Coniophora puteana*. *Jornal of Cultural Heritage*.
- Henriques, D., Nunes, L. & Brito, J., 2010. Acção conjunta de produtos de tratamento e de consolidação em madeira degradada por fungos: comportamento à flexão. Em: *Encontro Nacional de Conservação e Reabilitação de Estruturas*. Lisboa: LNEC.
- Henriques, D. et al., 2007. *Degradação por caruncho grande em estruturas de madeira antigas: Apresentação de um caso de estudo*. Coimbra, Universidade de Coimbra.
- Henriques, F., 1991. A conservação do património histórico e edificado. *Ingenium, ano IV*, Volume 47, pp. 11-15.
- Highley, T., 1999. Chapter 13 - Biodeterioration of wood. Em: *Wood handbook- Wood as an engineering*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, p. 16.
- Jasienko, J., Nowak, T. & Hamrol, K., 2013. Selected methods of diagnosis of historic timber structures – principles and possibilities of assessment. Em: *2º International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 225-232.
- Júnior, J., 2006. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Porto: FEUP.
- Larsen, K. & Marstein, N., 2000. *Conservation of historic timber structures - An ecological approach*. London: Butterworth-Heinemann Edit., Reed Elsevier plc group.
- Lladró, R. C., Barra, R. D., Botelho, J. & Faria, J., 2006. Avaliação da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira com recurso a ensaios in-situ.. Em: *PATORREB2006, 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação dos Edifícios*. Porto: FEUP, pp. 139-148.
- Lofersky, J., 2001. *Technologies for Wood Preservation in Historic Preservation*. Virginia,U.S.A.: Archives and Museum Informatics 13.
- Lourenço, P., 2006. Recommendations for the restoration of acient buildings and the survival of masonry chimney. *Construction and Building Materials*, Issue 20, pp. 239-251.
- Lourenço, P., Feio, A. & Machado, J., 2007. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlation for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, Issue 21, pp. 139-148.

- Machado, J., 2000. *Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) por meio de ultra-sons. Tese de doutoramento em Engenharia Florestal apresentada à Universidade Técnica de Lisboa..* Lisboa: UTL.
- Machado, J., 2007. *Madeiras de folhosas e resinosas.* Lisboa: LNEC.
- Machado, J., 2013. In situ Evaluation of the Reference Properties of Structural Timber Members. Use of Available Tools and Information. Em: *Structural Health Assessment of Timber Structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 137- 144.
- Machado, J. & Cruz, H., 1997. Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Issue 42, pp. 15-18.
- Machado, J., Dias, A., Cruz, H. & Palma, P., 2009. *Avaliação, conservação e reforço de estruturas de madeira.* Lisboa: Verlag-Dashofer.
- Machado, J. S., Costa, D. & Cruz, H., 2003. Evaluation of Pine timber strength by drilling and ultrasonic testing. Em: *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlim, Germany: German Society for Non-Destructive Testing and Federal Institute for Materials Research and Testing.
- Machado, S., Cruz, H., Nunes, L. & Monteiro, G., 1997. *Especificação de madeiras para estruturas - Madeira para construção - Ficha M1.* Lisboa: LNEC.
- Morales, M., Liñán, C. & Hita, R., 2013. Application of Non-Destructive Techniques in the Inspection of the Wooden Roof of Historic Buildings: A Case Study. Em: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 233-242.
- Negrão, J. & Faria, A., 2009. *Projecto de estruturas de madeira:* Publindústria.
- Noldt, U., 2007. Monitoring wood-destroying insects in wooden cultural heritage. Em: *Wood science for conservation of cultural (COST ACTION IE0601)*. Florence: Firenze university press, pp. 71-79.
- Nunes, L., 1997. *The effect of boron-based wood preservatives on subterranean termites. Phd thesis.* London: Imperial College of London.
- Nunes, L., 2006. A térmita subterrânea *Reticulitermes grassei* em Portugal continental e seu potencial impacto nos Açores. Em: *Medidas para a Gestão e Combate das Térmitas nos Açores*. Angra do Heroísmo: Universidade dos Açores, Dep. de Ciências Agrárias, pp. 83-85.
- Nunes, L., 2007. Degradação da madeira na construção: Acção dos fungos. Em: *Construção em Madeira*. Leiria: Publindústria, pp. 64-69.

- Nunes, L., 2007. *Preservação de madeiras para a construção - Situação actual e perspectivas futuras*. 2ª edição ed. Lisboa: LNEC.
- Nunes, L., 2010. *Proteção de produtos de madeira contra a degradação biológica*, Lisboa: LNEC.
- Nunes, L. et al., 2005. Wood consolidation by impregnation with reactive polymers. Em: *International Conference Conservation of Historic Wooden Structures*. Florença, Italy: Collegio degli Ingegneri della Toscana, pp. 323-327.
- Nunes, L., Cruz, H. & Machado, J., 1990. Patologias e reabilitação de estruturas de madeira - Avaliação da degradação causada por agentes biológicos. Em: *2º Jornadas de Engenharia de Estruturas*. Lisboa: LNEC.
- Nunes, L. et al., 2010. First records on urban invasive *Cryptotermes brevis* (Isoptera:Kalotermitae) in continental Spain and Portugal. *Journal of Applied Entomology*, pp. 637-640.
- Oliveira, C. & Cabrita, A., 1985. *Tipificação do parque habitacional*. Lisboa, LNEC.
- Pala, H., 2007. Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico. Em: *Construção em Madeira*. Leiria: Publindústria, pp. 54-63.
- Pérez, L. P., 2011. New uses in historic buildings. Case study: A 19th century building in Valencia. Em: *International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- Piazza, M., 2003. Il rinforzo delle strutture di legno. Em: *Corso; I materiali compositi fibrorinforzati (FRP) nella riabilitazione strutturale e antisismica*. Roma, Itália: Associazione Nazionale Italiana de Ingegneria Sísmica.
- Posta, J., Dolejs, J. & Vítek, L., 2013. In situ non-destructive examination of timber elements. Em: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*. Trento, Itália: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, pp. 250-257.
- Ramos, A., Jorge, F. & Botelho, C., 2005. *www.esac.pt*. [Online] Available at: <http://www.esac.pt/cernas/cfn5/docs/T4-16.pdf> [Acedido em 2013].
- Ramundo, F., Migliore, M. & Spina, G., 2011. Analysis of ancient timber structures performance capacity. Em: *International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Lisboa, Portugal: SHATIS11.
- Reinprecht, L., 2007. *Conservation of wooden cultural heritage*. Zvolen, Faculty of Wood Sciences and Tecnology.

- Reinprecht, L., 2010. Effect of natural conservation substances on some moisture and mechanical properties of decayed spruce wood. Em: *4th Internacional Conference on Wooden Cultural Heritage: Interaction between wood science and conservation of cultural heritage*. Esmirna, Turquia: COST Action IE0601, pp. 28-41 e 183-194.
- Reinprecht, L., Joscak, P. & Sladkovic, P., 2009. Laboratory experiment with repairing of ends in spruce beams using modified Beta-method with carbon rods. *Forestry and Wood Tchnology*, Issue 67, pp. 208-216.
- Riggio, M. & Piazza, M., 2011. Hardness Test. Em: *In Situ Assessment of Structural Timber - State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*. Trento: Springer Netherlands, pp. 87-97.
- Santos, J. A., 2007. *Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Silva, V., Alvarez, M., Gomes, J. & Domingues, F., 2002. *2º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. 3ª ed. Lisboa: LNEC.
- Smith, W., 1998. *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3ª ed: MC Graw Hill de Portugal, Lda.
- Tannert, T., Kasal, B. & Anthony, R., 2010. RILEM TC 215 In-situ assessment of structural timber: Report on activities and application of assessment methods. Em: *World Conference on Timber Engineering*. Trentino, Itália: Curran Associates, Inc..
- Teixeira, M. j., 2010. *Reabilitação de edifícios pombalinos - Análise experimental de paredes de frontal*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Teles, C. & Valle, A., 2001. Wood structures: Acting before deterioration. Em: *3th International Seminar on Historical Constructions 2001*. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, pp. 857-866.
- Unger, A., Schniewind, A. & Unger, W., 2001. *Consolidation of wood artifacts: a handbook*. Alemanha: Springer- Verlag.
- Valle, A., Brites, R. & Lourenço, P., 2006. Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edifícios antigos - estudo de caso. Em: *10º Encontro Brasileiro em Madeiras Estruturas e Estruturas de Madeira*. São Pedro. Brasil: EBRAMEM.
- Zombori, B., 2001. In situ Nondestructive Testing of Built in Wooden Members. *NDT.net*, 6(3).



## Referências normativas

- DD CEN/TS 15083-2:2005 - *Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods Soft-rotting micro-fungi*. British Standards Institution, London;
- EN 1001-2:2005 - *Durability of wood and wood based products. Terminology. Part 2: Vocabulary*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 338:2009 - *Structural timber. Strength classes*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 350-2:1994 - *Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 351-1:2007 - *Durability of wood and wood-based products. Preservative treated solid wood. Part 1: Classification of preservative penetration and retention*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 351-1:2007 - *Durability of wood and wood-based products. Preservative-treated solid wood. Classification of preservative penetration and retention*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 351-2:2007 - *Durability of wood and wood-based products. Preservative-treated solid wood. Classification of preservative penetration and retention*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 408:2010 - *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- EN 599-1:2009: *Durability of wood and wood-based products — Efficacy of preventive wood preservatives as determined by biological tests. Part 1: Specification according to use class*. CEN, Bruxelas, Bélgica;
- ISSO 3350:1975 – *Bois. Détermination de la dureté statique*. Organisation Internationale de Normalisation, Suíça;
- NP 180:1962 - *Anomalias e defeitos da madeira*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP 614:1973 - *Madeiras. Determinação do teor em água*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP 616:1973 - *Madeiras. Determinação da massa volúmica*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP 618:1973 - *Madeiras. Ensaio de compressão axial*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP 621:1973 - *Madeiras. Ensaio de compressão axial*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP 623:1973 - *Madeiras. Ensaio de corte*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP EN 1912:2013 - *Madeira para estruturas. Classes de resistência. Atribuição de classes de qualidade e espécies*. IPQ, Lisboa, Portugal;
- NP EN 335-1:2011 - *Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira. Definição das classes de risco. Parte 1: Generalidades*. IPQ, Lisboa, Portugal;

NP EN 335-2: 2011 - *Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira. Definição das classes de risco. Parte 2: Aplicação à madeira maciça.* IPQ, Lisboa, Portugal;

NP EN 350-1:2008 – *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.* IPQ, Lisboa, Portugal;

NP EN 460: 1995 - *Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco.* IPQ, Lisboa, Portugal;

# Anexos



---

## Anexos do capítulo 6

Anexo 6.1 - Determinação das massas volúmicas dos provetes sãos.....	117
Anexo 6.2 – Ensaio <i>Resistograph</i> ® e <i>Pilodyn</i> ® nos provetes sãos.....	118
Anexo 6.3 – Ensaio Dureza Estática e Compressão nos provetes sãos .....	119
Anexo 6.4 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes sãos.....	120
Anexo 6.5 – Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência .....	121
Anexo 6.6 – Determinação das massas volúmicas e perdas de massa dos provetes mediantemente degradados.....	122
Anexo 6.7 – Ensaio <i>Resistograph</i> ® e <i>Pilodyn</i> ® nos provetes mediantemente degradados.....	124
Anexo 6.8 – Ensaio Dureza Estática e Compressão nos provetes mediantemente degradados ...	125
Anexo 6.9 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes mediantemente degradados .....	126
Anexo 6.10 – Ensaio <i>Resistograph</i> ® e <i>Pilodyn</i> ® nos provetes tratados e consolidados .....	127
Anexo 6.11 – Ensaio Dureza Estática e Compressão nos provetes tratados e consolidados...	128
Anexo 6.12 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes tratados e consolidados.....	129

## Anexos do capítulo 7

Anexo 7.1 – Ensaio realizado na Costaneira .....	130
Anexo 7.2 – Ensaio realizado nas Escadas.....	131
Anexo 7.3 – Ensaio realizado nas vigas do pavimento .....	132
Anexo 7.4 – Planta Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877).....	133



## Anexo 6.1 - Determinação das massas volúmicas dos provetes são

Provetes ensaiados com Resistograph®, Pilodyn® e à Dureza Estática							Provetes ensaiados à compressão						
Provete	L (m)	l (m)	C (m)	V (m <sup>3</sup> )	m (Kg)	ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	Provete	L (m)	l (m)	C (m)	V (m <sup>3</sup> )	m (Kg)	ρ (Kg/m <sup>3</sup> )
2s-15	0,063	0,029	0,181	3,31E-04	0,139	419,82	2K-1	0,059	0,030	0,179	3,15E-04	0,132	418,44
2B-5	0,060	0,030	0,180	3,25E-04	0,137	422,21	2B-7	0,060	0,030	0,180	3,22E-04	0,138	427,45
2L-1	0,060	0,031	0,179	3,29E-04	0,141	429,22	2B-8	0,059	0,030	0,180	3,20E-04	0,138	430,42
2B-6	0,060	0,030	0,180	3,18E-04	0,138	433,40	2T-10	0,060	0,030	0,180	3,19E-04	0,139	436,17
2G-4	0,060	0,030	0,181	3,23E-04	0,142	437,62	2s-19	0,063	0,029	0,180	3,32E-04	0,147	441,48
2O-16	0,060	0,032	0,180	3,44E-04	0,154	446,80	2G-5	0,060	0,030	0,181	3,24E-04	0,145	445,53
2s-22	0,063	0,029	0,180	3,27E-04	0,146	447,00	2s-20	0,063	0,029	0,180	3,27E-04	0,146	447,01
2O-23	0,060	0,032	0,180	3,43E-04	0,154	447,24	2T-7	0,060	0,030	0,180	3,20E-04	0,143	448,30
2L-2	0,060	0,031	0,180	3,30E-04	0,152	459,08	2O-19	0,060	0,032	0,180	3,39E-04	0,155	457,09
2K-3	0,060	0,030	0,180	3,19E-04	0,149	468,41	2O-18	0,060	0,032	0,180	3,41E-04	0,159	465,44
4I-8	0,061	0,031	0,179	3,30E-04	0,155	469,11	2O-20	0,060	0,032	0,180	3,42E-04	0,161	469,59
4A-8	0,061	0,031	0,179	3,36E-04	0,160	476,55	4A-5	0,060	0,032	0,179	3,40E-04	0,163	477,95
2s-23	0,063	0,029	0,181	3,32E-04	0,159	479,73	2s-18	0,063	0,029	0,180	3,31E-04	0,158	477,99
2O-21	0,060	0,032	0,180	3,42E-04	0,165	482,75	2L-4	0,060	0,031	0,179	3,29E-04	0,158	480,41
2s-14	0,063	0,029	0,180	3,29E-04	0,161	488,55	2O-22	0,060	0,032	0,180	3,41E-04	0,165	483,60
2P-11	0,060	0,029	0,179	3,15E-04	0,156	495,89	2G-6	0,060	0,030	0,181	3,24E-04	0,160	493,51
4A-6	0,061	0,031	0,179	3,40E-04	0,170	499,45	2O-15	0,060	0,032	0,180	3,44E-04	0,171	497,90
2K-2	0,060	0,030	0,180	3,19E-04	0,161	506,08	2D-5	0,060	0,030	0,180	3,24E-04	0,164	506,98
2B-4	0,060	0,030	0,180	3,21E-04	0,163	507,37	2P-10	0,060	0,029	0,179	3,13E-04	0,166	531,47
3K-4	0,061	0,031	0,178	3,36E-04	0,182	543,17	3K-7	0,062	0,031	0,179	3,36E-04	0,187	557,08
3K-2	0,061	0,031	0,179	3,40E-04	0,196	576,03	3K-3	0,061	0,031	0,179	3,34E-04	0,188	564,27
2F-1	0,059	0,030	0,180	3,20E-04	0,205	639,39	2F-2	0,059	0,030	0,180	3,22E-04	0,198	616,36
2N-4	0,060	0,030	0,180	3,18E-04	0,224	703,02	2N-5	0,060	0,030	0,180	3,18E-04	0,226	710,95

Anexo 6.2 – Ensaios *Resistograph*® e *Pilodyn*® nos provetes são

Provete	Provetes ensaiados com <i>Resistograph</i> ®				Provetes ensaiados com <i>Pilodyn</i> ®					
	MR <sub>furo 1</sub>	MR <sub>furo 2</sub>	Mr <sub>médio (20cm/min)</sub>	Direção 1 (mm)	Média 1 (mm)	Direção 2 (mm)	Média 2 (mm)	<i>Pilodyn</i> ®	Profundidade média (mm)	
2s-15	8,69	8,33	8,51	23,00	23,00	23,00	21,00	22,00	22,50	
2B-5	10,20	10,60	10,40	13,00	15,00	19,00	19,00	19,00	16,50	
2L-1	9,50	9,33	9,41	15,00	14,00	15,00	15,00	15,00	14,75	
2B-6	9,52	9,71	9,62	16,00	16,00	16,00	17,00	16,50	16,25	
2G-4	10,92	11,13	11,02	15,00	15,00	18,00	17,00	17,50	16,25	
2O-16	6,73	6,18	6,46	21,00	22,00	23,00	21,00	22,00	21,75	
2s-22	6,78	7,74	7,26	19,00	23,00	22,00	22,00	22,00	21,50	
2O-23	6,13	6,21	6,17	23,00	24,00	23,00	21,00	22,00	22,75	
2L-2	10,95	11,45	11,20	13,00	15,00	14,00	16,00	15,00	14,50	
2K-3	9,05	8,98	9,01	14,00	16,00	15,00	15,00	15,00	15,00	
4I-8	10,42	9,74	10,08	16,00	16,00	14,00	17,00	15,50	15,75	
4A-8	9,47	9,03	9,25	16,00	17,00	16,00	16,00	16,00	16,25	
2s-23	10,11	12,09	11,10	19,00	20,00	15,00	16,00	15,50	17,50	
2O-21	6,77	6,78	6,78	21,00	21,00	18,00	18,00	18,00	19,50	
2s-14	8,01	8,35	8,18	22,00	21,00	16,00	15,00	15,50	18,50	
2P-11	10,96	11,34	11,15	15,00	14,00	17,00	14,00	15,50	15,00	
4A-6	8,64	8,50	8,57	15,00	17,00	11,00	11,00	11,00	13,50	
2K-2	10,15	10,73	10,44	15,00	13,00	15,00	16,00	15,50	14,75	
2B-4	10,02	9,84	9,93	16,00	15,00	17,00	17,00	17,00	16,25	
3K-4	12,30	13,56	12,93	12,00	12,00	12,00	13,00	12,50	12,25	
3K-2	14,26	14,87	14,57	12,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,25	
2F-1	15,11	15,09	15,10	8,00	9,00	11,00	12,00	11,50	10,00	
2N-4	16,96	16,61	16,78	9,00	9,00	10,00	10,00	10,00	9,50	

## Anexo 6.3 – Ensaios Dureza Estática e Compressão nos provetes são

Ensaio de Dureza Estática							Ensaio de Compressão					
Provete	Hc,12% <sub>1</sub> (Kg)	Hc,12% <sub>2</sub> (Kg)	Hc,12% médio(Kg)	Hc,12% médio(N)	b (mm)	h (mm)	F <sub>máx</sub> (N)	Δ <sub>máx</sub> (mm)	f <sub>c,o</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
2s-15	240	200	220,0	2157,46	59,4	29,6	37907,8	3,95	21,56			
2B-5	200	210	205,0	2010,36	59,7	29,9	49144,5	3,19	27,53			
2L-1	220	210	215,0	2108,43	59,4	29,9	44796,9	2,38	25,22			
2B-6	240	240	240,0	2353,60	59,9	29,6	60949,2	1,94	34,38			
2G-4	270	225	247,5	2427,15	63,1	29,2	69804,7	2,42	37,89			
2O-16	190	180	185,0	1814,23	59,7	30,1	48980,5	2,50	27,26			
2s-22	190	200	195,0	1912,30	62,5	29,1	63039,1	2,33	34,66			
2O-23	180	180	180,0	1765,20	59,7	29,8	37990,6	1,57	21,35			
2L-2	235	235	235,0	2304,56	59,7	31,6	53535,2	2,07	28,38			
2K-3	245	225	235,0	2304,56	59,7	31,7	64929,7	1,96	34,31			
4I-8	265	255	260,0	2549,73	59,9	31,7	66234,4	2,34	34,88			
4A-8	270	260	265,0	2598,76	60,4	31,5	69984,4	2,09	36,78			
2s-23	280	275	277,5	2721,35	62,9	29,2	40690,6	2,22	22,15			
2O-21	225	250	237,5	2329,08	59,6	30,8	42123,4	2,74	22,95			
2s-14	270	280	275,0	2696,83	59,8	31,7	68101,6	2,67	35,93			
2P-11	235	220	227,5	2231,01	59,7	30,1	40396,9	3,60	22,48			
4A-6	250	240	245,0	2402,63	60	31,8	49156,3	2,60	25,76			
2K-2	325	310	317,5	3113,61	59,9	30,1	56062,5	2,52	31,09			
2B-4	280	240	260,0	2549,73	59,7	29,2	53746,1	2,35	30,83			
3K-4	280	300	290,0	2843,93	61,5	30,5	84304,7	3,47	44,94			
3K-2	390	380	385,0	3775,56	61,2	30,5	82851,6	2,96	44,39			
2F-1	420	440	430,0	4216,86	59,2	30,2	83296,9	1,55	46,59			
2N-4	535	540	537,5	5271,07	59,7	29,6	92742,2	2,29	52,48			

## Anexo 6.4 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes são

Provetes ensaiados com Resistograph®, Pilodyn® e à Dureza Estática										Provetes ensaiados à compressão (Par)				
Provete	V (m <sup>3</sup> )	m (Kg)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	Pilodyn® Profundidade média (mm)	Hc, 1,2% <sub>médio(N)</sub>	Provete	V (m <sup>3</sup> )	m (Kg)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	fc,o (N/mm <sup>2</sup> )			
2s-15	3,31E-04	0,139	419,82	8,51	22,50	2157,46	2K-1	3,15E-04	0,132	418,44	21,56			
2B-5	3,25E-04	0,137	422,21	10,40	16,50	2010,36	2B-7	3,22E-04	0,138	427,45	27,53			
2L-1	3,29E-04	0,141	429,22	9,41	14,75	2108,43	2B-8	3,20E-04	0,138	430,42	25,22			
2B-6	3,18E-04	0,138	433,40	9,62	16,25	2353,60	2T-10	3,19E-04	0,139	436,17	34,38			
2G-4	3,23E-04	0,142	437,62	11,02	16,25	2427,15	2s-19	3,32E-04	0,147	441,48	37,89			
2O-16	3,44E-04	0,154	446,80	6,46	21,75	1814,23	2G-5	3,24E-04	0,145	445,53	27,26			
2s-22	3,27E-04	0,146	447,00	7,26	21,50	1912,30	2s-20	3,27E-04	0,146	447,01	34,66			
2O-23	3,43E-04	0,154	447,24	6,17	22,75	1765,20	2T-7	3,20E-04	0,143	448,30	21,35			
2L-2	3,30E-04	0,152	459,08	11,20	14,50	2304,56	2O-19	3,39E-04	0,155	457,09	28,38			
2K-3	3,19E-04	0,149	468,41	9,01	15,00	2304,56	2O-18	3,41E-04	0,159	465,44	34,31			
4I-8	3,30E-04	0,155	469,11	10,08	15,75	2549,73	2O-20	3,42E-04	0,161	469,59	34,88			
4A-8	3,36E-04	0,160	476,55	9,25	16,25	2598,76	4A-5	3,40E-04	0,163	477,95	36,78			
2s-23	3,32E-04	0,159	479,73	11,10	17,50	2721,35	2s-18	3,31E-04	0,158	477,99	22,15			
2O-21	3,42E-04	0,165	482,75	6,78	19,50	2329,08	2L-4	3,29E-04	0,158	480,41	22,95			
2s-14	3,29E-04	0,161	488,55	8,18	18,50	2696,83	2O-22	3,41E-04	0,165	483,60	35,93			
2P-11	3,15E-04	0,156	495,89	11,15	15,00	2231,01	2G-6	3,24E-04	0,160	493,51	22,48			
4A-6	3,40E-04	0,170	499,45	8,57	13,50	2402,63	2O-15	3,44E-04	0,171	497,90	25,76			
2K-2	3,19E-04	0,161	506,08	10,44	14,75	3113,61	2D-5	3,24E-04	0,164	506,98	31,09			
2B-4	3,21E-04	0,163	507,37	9,93	16,25	2549,73	2P-10	3,13E-04	0,166	531,47	30,83			
3K-4	3,36E-04	0,182	543,17	12,93	12,25	2843,93	3K-7	3,36E-04	0,187	557,08	44,94			
3K-2	3,40E-04	0,196	576,03	14,57	11,25	3775,56	3K-3	3,34E-04	0,188	564,27	44,39			
2F-1	3,20E-04	0,205	639,39	15,10	10,00	4216,86	2F-2	3,22E-04	0,198	616,36	46,59			
2N-4	3,18E-04	0,224	703,02	16,78	9,50	5271,07	2N-5	3,18E-04	0,226	710,95	52,48			

Anexo 6.5 – Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência

Par de Provetes de massa volúmica semelhante		Estimativa da massa volúmica em função das retas de tendência									
Provete	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Provete	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta$ valor real	Hc, 12% médio(N)	$\Delta$ valor real	Mf médio,(20cm/min)	$\Delta$ valor real	Pilodyn® Profundidade média (mm)	$\Delta$ valor real
				<b>Y=0,0943X-13,908</b>		<b>Y=11,07X-2799,7</b>		<b>Y=0,031X-5,0532</b>		<b>Y=-0,0391X+35,333</b>	
2s-15	419,82	2K-1	418,44	376,12	42,32	447,80	27,98	437,66	17,84	328,21	91,61
2B-5	422,21	2B-7	427,45	439,44	12,00	434,51	12,30	498,61	76,40	481,66	59,45
2L-1	429,22	2B-8	430,42	414,96	15,46	443,37	14,15	466,64	37,42	526,42	97,20
2B-6	433,40	2T-10	436,17	512,02	75,85	465,52	32,12	473,23	39,83	488,06	54,65
2G-4	437,62	2s-19	441,48	549,24	107,76	472,16	34,54	518,63	81,01	488,06	50,44
2O-16	446,80	2G-5	445,53	436,54	9,00	416,80	30,01	371,31	75,50	347,39	99,41
2s-22	447,00	2s-20	447,01	515,04	68,03	425,65	21,34	397,15	49,85	353,79	93,21
2O-23	447,24	2T-7	448,30	373,94	74,36	412,37	34,87	361,98	85,26	321,82	125,42
2L-2	459,08	2O-19	457,09	448,42	8,67	461,09	2,01	524,27	65,20	532,81	73,73
2K-3	468,41	2O-18	465,44	511,32	45,87	461,09	7,33	453,79	14,63	520,03	51,61
4I-8	469,11	2O-20	469,59	517,39	47,80	483,24	14,13	488,16	19,05	500,84	31,73
4A-8	476,55	4A-5	477,95	537,56	59,61	487,67	11,11	461,43	15,12	488,06	11,51
2s-23	479,73	2s-18	477,99	382,42	95,57	498,74	19,01	521,05	41,32	456,09	23,64
2O-21	482,75	2L-4	480,41	390,83	89,59	463,30	19,44	381,61	101,14	404,94	77,81
2s-14	488,55	2O-22	483,60	528,45	44,85	496,52	7,97	426,76	61,79	430,51	58,04
2P-11	495,89	2G-6	493,51	385,88	107,62	454,45	41,44	522,77	26,88	520,03	24,14
4A-6	499,45	2O-15	497,90	420,69	77,21	469,95	29,50	439,48	59,97	558,39	58,94
2K-2	506,08	2D-5	506,98	477,22	29,75	534,17	28,09	499,77	6,31	526,42	20,34
2B-4	507,37	2P-10	531,47	474,43	57,03	483,24	24,13	483,43	23,94	488,06	19,31
3K-4	543,17	3K-7	557,08	624,10	67,02	509,81	33,36	579,99	36,82	590,36	47,19
3K-2	576,03	3K-3	564,27	618,18	53,91	593,97	17,94	632,87	56,84	615,93	39,90
2F-1	639,39	2F-2	616,36	641,56	25,20	633,84	5,56	650,10	10,71	647,90	8,51
2N-4	703,02	2N-5	710,95	704,03	6,92	729,07	26,04	704,40	1,37	660,69	42,33
<b>Média=</b>	490,34		490,67	490,43	<b>53,10</b>	490,36	<b>21,49</b>	491,09	<b>43,66</b>	490,28	<b>54,79</b>

## Anexo 6.6 – Determinação das massas volúmicas e perdas de massa dos provetes mediante degradados

Provetes ensaiados com Resistograph®, Pilodyn® e à Dureza Estática, após degradação												
Provete	L (m)	l (m)	C (m)	V (m <sup>3</sup> )	mi,H% (Kg)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	ms (Kg)	mf,H% (Kg)	mi,0% teórica	mf,0% teórica	p.m. (%)	
2s-17	0,063	0,030	0,180	3,33E-04	0,144	430,80					0	
2T-9	0,060	0,030	0,180	3,19E-04	0,137	430,65					0	
2s-1	0,063	0,029	0,181	3,30E-04	0,150	454,47	0,227	0,146	0,136	0,129	4,877	
2s-5	0,064	0,030	0,180	3,38E-04	0,156	460,81	0,247	0,152	0,141	0,134	4,940	
2s-3	0,063	0,029	0,180	3,33E-04	0,156	466,95	0,243	0,152	0,141	0,134	5,002	
2s-13	0,064	0,029	0,180	3,36E-04	0,142	423,52	0,216	0,139	0,129	0,123	5,030	
2s-8	0,063	0,029	0,180	3,33E-04	0,147	439,64	0,233	0,143	0,133	0,126	5,078	
2s-6	0,063	0,029	0,180	3,30E-04	0,148	449,38	0,217	0,145	0,134	0,127	5,085	
2T-6	0,060	0,029	0,180	3,18E-04	0,150	471,99	0,226	0,146	0,136	0,129	5,303	
2s-4	0,063	0,029	0,180	3,32E-04	0,149	449,56	0,239	0,145	0,135	0,128	5,396	
2T-5	0,060	0,030	0,180	3,19E-04	0,147	462,45	0,230	0,143	0,134	0,126	5,492	
2T-1	0,060	0,029	0,190	3,36E-04	0,148	440,72	0,219	0,144	0,134	0,127	5,530	
2s-12	0,063	0,029	0,180	3,28E-04	0,143	435,65	0,218	0,139	0,129	0,122	5,581	
2s-9	0,063	0,029	0,180	3,32E-04	0,144	435,01	0,225	0,140	0,131	0,123	5,627	
2T-2	0,060	0,030	0,180	3,20E-04	0,152	473,97	0,234	0,147	0,137	0,130	5,699	
2s-2	0,063	0,029	0,180	3,35E-04	0,144	429,40	0,245	0,139	0,130	0,123	5,973	
2T-4	0,060	0,030	0,180	3,20E-04	0,142	444,18	0,230	0,137	0,129	0,121	6,126	
2G-3	0,060	0,030	0,180	3,25E-04	0,138	425,03	0,279	0,133	0,125	0,117	6,352	
2G-2	0,060	0,030	0,181	3,28E-04	0,143	436,65	0,288	0,138	0,130	0,121	6,421	
2G-1	0,060	0,030	0,181	3,25E-04	0,140	430,37	0,288	0,134	0,127	0,118	6,511	

Anexo 6.6 – Determinação das massas volúmicas e perdas de massa dos provetes mediantemente degradados (continuação)

Provetes ensaiados à compressão, após degradação												
Provete	L (m)	l (m)	C (m)	V (m <sup>3</sup> )	m <sub>i,H%</sub> (kg)	ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	m <sub>s</sub> (kg)	mf <sub>,H%</sub> (kg)	m <sub>i</sub> ,0% teórica	mf <sub>,0% teórica</sub>	ρ.m. (%)	
2D-5	0,060	0,030	0,180	3,24E-04	0,164	506,98					0	
2P-10	0,060	0,029	0,179	3,13E-04	0,166	531,47					0	
2P-12	0,060	0,029	0,179	3,13E-04	0,158	505,67					0	
2P-7	0,060	0,029	0,180	3,15E-04	0,140	444,57	0,215	0,135	0,127	0,119	6,184	
2D-3	0,060	0,030	0,180	3,27E-04	0,165	504,00	0,311	0,158	0,149	0,140	6,585	
2D-4	0,060	0,030	0,179	3,23E-04	0,163	503,90	0,323	0,156	0,147	0,138	6,644	
2P-9	0,060	0,029	0,180	3,14E-04	0,163	518,22	0,264	0,156	0,147	0,137	6,898	
2D-1	0,060	0,030	0,180	3,23E-04	0,158	489,77	0,318	0,151	0,144	0,133	7,414	
2D-2	0,060	0,030	0,180	3,25E-04	0,164	503,39	0,312	0,155	0,148	0,137	8,008	
2P-6	0,060	0,029	0,180	3,11E-04	0,154	494,08	0,276	0,145	0,139	0,128	8,506	
2P-1	0,060	0,029	0,180	3,14E-04	0,162	515,62	0,244	0,152	0,147	0,134	8,882	
2P-8	0,060	0,029	0,180	3,16E-04	0,148	468,14	0,228	0,138	0,134	0,122	9,161	
2P-5	0,060	0,029	0,180	3,11E-04	0,145	465,15	0,258	0,134	0,131	0,118	10,044	
2P-3	0,060	0,029	0,179	3,13E-04	0,164	523,30	0,247	0,152	0,149	0,134	10,073	
2P-4	0,060	0,029	0,180	3,14E-04	0,149	474,32	0,246	0,137	0,135	0,121	10,601	
2P-2	0,060	0,029	0,179	3,13E-04	0,167	532,97	0,256	0,153	0,151	0,135	10,611	

Anexo 6.7 – Ensaio *Resistograph*® e *Pilodyn*® nos provetes mediantemente degradados

Provetes ensaiados com <i>Resistograph</i> ®				Provetes ensaiados com <i>Pilodyn</i> ®, após degradação						
Provete	MR <sub>furo 1</sub>	MR <sub>furo 2</sub>	MR <sub>médio</sub> (20cm/min)	Direção 1 (cm)		Média 1 (cm)	Direção 2 (cm)		Média 2 (cm)	<i>Pilodyn</i> ® Profundidade média (mm)
2s-17	7,45	6,55	7,00	18,00	19,00	18,50	17,00	20,00	18,50	18,50
2T-9	7,93	7,88	7,91	17,00	13,00	15,00	15,00	16,00	15,50	15,25
2s-1	10,39	8,45	9,42	13,00	17,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
2s-5	8,32	7,91	8,11	19,00	18,00	18,50	20,00	14,00	17,00	17,75
2s-3	9,79	7,41	8,60	18,00	23,00	20,50	20,00	20,00	20,00	20,25
2s-13	9,94	8,12	9,03	19,00	22,00	20,50	19,00	18,00	18,50	19,50
2s-8	7,24	7,17	7,20	24,00	24,00	24,00	20,00	19,00	19,50	21,75
2s-6	6,90	7,26	7,08	18,00	18,00	18,00	13,00	16,00	14,50	16,25
2T-6	9,86	10,70	10,28	14,00	16,00	15,00	14,00	20,00	17,00	16,00
2s-4	7,11	6,94	7,03	18,00	19,00	18,50	20,00	20,00	20,00	19,25
2T-5	8,84	9,43	9,13	18,00	16,00	17,00	17,00	16,00	16,50	16,75
2T-1	9,59	9,76	9,68	14,00	15,00	14,50	18,00	18,00	18,00	16,25
2s-12	8,72	7,17	7,94	26,00	24,00	25,00	27,00	20,00	23,50	24,25
2s-9	6,50	7,10	6,80	21,00	22,00	21,50	18,00	20,00	19,00	20,25
2T-2	9,31	10,03	9,67	17,00	18,00	17,50	16,00	17,00	16,50	17,00
2s-2	6,56	6,39	6,47	20,00	20,00	20,00	15,00	20,00	17,50	18,75
2T-4	9,44	8,89	9,17	13,00	14,00	13,50	14,00	20,00	17,00	15,25
2G-3	9,59	9,88	9,73	18,00	17,00	17,50	14,00	15,00	14,50	16,00
2G-2	10,35	10,59	10,47	16,00	14,00	15,00	15,00	18,00	16,50	15,75
2G-1	10,02	10,13	10,07	16,00	13,00	14,50	13,00	16,00	14,50	14,50

## Anexo 6.8 – Ensaios Dureza Estática e Compressão nos provetes mediantemente degradados

Provete	Ensaio de Compressão, após degradação					
	b <sub>(mm)</sub>	h <sub>(mm)</sub>	F <sub>máx</sub> (N)	Δ <sub>máx</sub> (mm)	f <sub>c,o</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
2D-5	59,9	30,1	56062,5	2,52	33,27	
2P-10	59,7	29,2	53746,1	2,35	32,99	
2D-3	60,2	30,2	42856,3	6,83	25,22	
2P-9	59,8	29,2	34398,4	3,32	21,08	
2D-2	59,9	30,2	39496,9	7,48	23,36	
2P-1	60,1	29,1	31168,8	3,78	19,07	
2P-5	60,0	28,8	26350,0	7,73	16,32	
2P-4	59,7	29,3	32014,1	2,40	19,58	

Provete	Ensaio de Dureza Estática, após degradação				
	Hc,12% <sub>1</sub> (Kg)	Hc,12% <sub>2</sub> (Kg)	Hc,12% <sub>médio</sub> (Kg)	Hc,12% <sub>médio</sub> (N)	
2s-17	200	250	225,0	2206,50	
2T-9	240	260	250,0	2451,66	
2s-1	205	180	192,5	1887,78	
2s-5	170	250	210,0	2059,40	
2s-3	205	175	190,0	1863,26	
2s-13	180	180	180,0	1765,20	
2s-8	190	180	185,0	1814,23	
2s-6	180	185	182,5	1789,71	
2T-6	185	200	192,5	1887,78	
2s-4	185	180	182,5	1789,71	
2T-5	190	195	192,5	1887,78	
2T-1	210	205	207,5	2034,88	
2s-12	160	160	160,0	1569,06	
2s-9	155	165	160,0	1569,06	
2T-2	195	180	187,5	1838,75	
2s-2	165	155	160,0	1569,06	
2T-4	180	190	185,0	1814,23	
2G-3	175	140	157,5	1544,55	
2G-2	175	165	170,0	1667,13	
2G-1	160	165	162,5	1593,58	

## Anexo 6.9 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes mediante degradados

Provetes ensaiados à compressão, após degradação				
Provete	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	p.m. (%)	$f_{c,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )
2D-5	506,98	0	33,27	33,27
2P-10	531,47	0	32,99	32,99
2D-3	504,00	6,585	25,22	25,22
2P-9	518,22	6,898	21,08	21,08
2D-2	503,39	8,008	23,36	23,36
2P-1	515,62	8,882	19,07	19,07
2P-5	465,15	10,044	16,32	16,32
2P-4	474,32	10,601	19,58	19,58

Provetes ensaiados com Resistograph®, Pilodyn® e à Dureza Estática, após degradação						
Provete	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	p.m. (%)	Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	Pilodyn® Profundidade média (mm)	Hc <sub>1,2%</sub> médio(N)	Hc <sub>1,2%</sub> médio(N)
2s-17	430,80	0	7,00	18,50	2206,50	2206,50
2T-9	430,65	0	7,91	15,25	2451,66	2451,66
2s-1	454,47	4,877	9,42	15,00	1887,78	1887,78
2s-5	460,81	4,940	8,11	17,75	2059,40	2059,40
2s-3	466,95	5,002	8,60	20,25	1863,26	1863,26
2s-13	423,52	5,030	9,03	19,50	1765,20	1765,20
2s-8	439,64	5,078	7,20	21,75	1814,23	1814,23
2s-6	449,38	5,085	7,08	16,25	1789,71	1789,71
2T-6	471,99	5,303	10,28	16,00	1887,78	1887,78
2s-4	449,56	5,396	7,03	19,25	1789,71	1789,71
2T-5	462,45	5,492	9,13	16,75	1887,78	1887,78
2T-1	440,72	5,530	9,68	16,25	2034,88	2034,88
2s-12	435,65	5,581	7,94	24,25	1569,06	1569,06
2s-9	435,01	5,627	6,80	20,25	1569,06	1569,06
2T-2	473,97	5,699	9,67	17,00	1838,75	1838,75
2s-2	429,40	5,973	6,47	18,75	1569,06	1569,06
2T-4	444,18	6,126	9,17	15,25	1814,23	1814,23
2G-3	425,03	6,352	9,73	16,00	1544,55	1544,55
2G-2	436,65	6,421	10,47	15,75	1667,13	1667,13
2G-1	430,37	6,511	10,07	14,50	1593,58	1593,58

Anexo 6.10 – Ensaios *Resistograph*® e *Pilodyn*® nos provetes tratados e consolidados

Provetes ensaiados com <i>Resistograph</i> ®				Provetes ensaiados com <i>Pilodyn</i> ®, após tratamento e consolidação						
Provete	MR <sub>furo 1</sub>	MR <sub>furo 2</sub>	MR <sub>médio (20cm/min)</sub>	Direção 1 (cm)		Média 1 (cm)	Direção 2 (cm)		Média 2 (cm)	<i>Pilodyn</i> ® Profundidade média (mm)
2s-17	7,61	6,81	7,21	13,00	17,00	15,00	22,00	21,00	21,50	18,25
2T-9	7,38	7,40	7,39	16,00	18,00	17,00	15,00	16,00	15,50	16,25
2s-1	9,50	11,90	10,70	15,00	15,00	15,00	15,00	16,00	15,50	15,25
2s-5	6,88	8,93	7,91	18,00	20,00	19,00	19,00	16,00	17,50	18,25
2s-3	7,34	6,96	7,15	22,00	18,00	20,00	16,00	22,00	19,00	19,50
2s-13	9,12	8,04	8,58	15,00	18,00	16,50	19,00	20,00	19,50	18,00
2s-8	7,58	6,66	7,12	21,00	19,00	20,00	24,00	22,00	23,00	21,50
2s-6	7,30	7,31	7,31	19,00	18,00	18,50	18,00	17,00	17,50	18,00
2T-6	10,26	10,01	10,13	13,00	15,00	14,00	15,00	17,00	16,00	15,00
2s-4	7,20	6,70	6,95	22,00	20,00	21,00	18,00	16,00	17,00	19,00
2T-5	9,26	9,46	9,36	19,00	15,00	17,00	14,00	17,00	15,50	16,25
2T-1	9,08	9,47	9,27	18,00	14,00	16,00	19,00	17,00	18,00	17,00
2s-12	7,37	6,56	6,96	24,00	22,00	23,00	23,00	22,00	22,50	22,75
2s-9	7,24	7,07	7,16	22,00	23,00	22,50	21,00	23,00	22,00	22,25
2T-2	8,83	8,97	8,90	15,00	15,00	15,00	15,00	14,00	14,50	14,75
2s-2	7,16	7,00	7,08	21,00	17,00	19,00	18,00	19,00	18,50	18,75
2T-4	9,02	9,30	9,16	18,00	15,00	16,50	13,00	14,00	13,50	15,00
2G-3	10,03	10,27	10,15	17,00	18,00	17,50	15,00	18,00	16,50	17,00
2G-2	11,08	10,53	10,80	18,00	16,00	17,00	15,00	16,00	15,50	16,25
2G-1	10,42	10,08	10,25	18,00	18,00	18,00	18,00	16,00	17,00	17,50

## Anexo 6.11 – Ensaios Dureza Estática e Compressão nos provetes tratados e consolidados

Ensaio de Compressão, após tratamento e consolidação						
Provete	b (mm)	h (mm)	F máx (N)	$\Delta$ máx (mm)	$f_{c,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
2P-12	59,7	29,3	41709,4	2,54	25,51	
2P-7	60,1	29,2	30732,8	4,05	18,74	
2D-4	59,6	30,2	40793,8	6,00	24,25	
2D-1	59,8	30,1	38801,6	3,66	23,07	
2P-6	60,1	28,8	39267,2	3,84	24,27	
2P-8	59,9	29,3	28604,7	3,66	17,44	
2P-3	59,8	29,2	37743,8	3,30	23,13	
2P-2	59,7	29,2	37392,2	4,14	22,95	

Ensaio de Dureza Estática, após tratamento e consolidação					
Provete	Hc,12% <sub>1</sub> (Kg)	Hc,12% <sub>2</sub> (Kg)	Hc,12% médio(kg)	Hc,12% médio(N)	
2s-17	210	230	220,0	2157,46	
2T-9	230	240	235,0	2304,56	
2s-1	190	200	195,0	1912,30	
2s-5	230	200	215,0	2108,43	
2s-3	230	260	245,0	2402,63	
2s-13	175	195	185,0	1814,23	
2s-8	210	190	200,0	1961,33	
2s-6	190	175	182,5	1789,71	
2T-6	230	230	230,0	2255,53	
2s-4	210	210	210,0	2059,40	
2T-5	200	200	200,0	1961,33	
2T-1	200	210	205,0	2010,36	
2s-12	175	185	180,0	1765,20	
2s-9	190	180	185,0	1814,23	
2T-2	225	210	217,5	2132,95	
2s-2	195	185	190,0	1863,26	
2T-4	200	220	210,0	2059,40	
2G-3	170	185	177,5	1740,68	
2G-2	190	180	185,0	1814,23	
2G-1	180	195	187,5	1838,75	

## Anexo 6.12 – Resultado dos ensaios realizados nos provetes tratados e consolidados

Provetes ensaiados à compressão, após tratamento e consolidação				
Provete	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	p.m. (%)	$f_{c,0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,0}$ (N/mm <sup>2</sup> )
2P-12	505,67	0		25,51
2P-7	444,57	6		18,74
2D-4	503,90	6,644		24,25
2D-1	489,77	7,414		23,07
2P-6	494,08	8,506		24,27
2P-8	468,14	9,161		17,44
2P-3	523,30	10,073		23,13
2P-2	532,97	10,611		22,95

Provetes ensaiados com Resistograph®, Pilodyn® e à Dureza Estática, após tratamento e consolidação					
Provete	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	p.m. (%)	Mr <sub>início</sub> (20cm/min)	Pilodyn® Profundidade média (mm)	Hc <sub>12%</sub> médio(N)
2s-17	430,80	0	7,21	18,25	2157,46
2T-9	430,65	0	7,39	16,25	2304,56
2s-1	454,47	4,877	10,70	15,25	1912,30
2s-5	460,81	4,940	7,91	18,25	2108,43
2s-3	466,95	5,002	7,15	19,50	2402,63
2s-13	423,52	5,030	8,58	18,00	1814,23
2s-8	439,64	5,078	7,12	21,50	1961,33
2s-6	449,38	5,085	7,31	18,00	1789,71
2T-6	471,99	5,303	10,13	15,00	2255,53
2s-4	449,56	5,396	6,95	19,00	2059,40
2T-5	462,45	5,492	9,36	16,25	1961,33
2T-1	440,72	5,530	9,27	17,00	2010,36
2s-12	435,65	5,581	6,96	22,75	1765,20
2s-9	435,01	5,627	7,16	22,25	1814,23
2T-2	473,97	5,699	8,90	14,75	2132,95
2s-2	429,40	5,973	7,08	18,75	1863,26
2T-4	444,18	6,126	9,16	15,00	2059,40
2G-3	425,03	6,352	10,15	17,00	1740,68
2G-2	436,65	6,421	10,80	16,25	1814,23
2G-1	430,37	6,511	10,25	17,50	1838,75

## Anexo 7.1 – Ensaio realizados na Costaneira

Ensaio <i>in situ</i> - Resistograph®			
Zona	Medição nº	MR (20cm/min)	Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)
A	A-1	7,68	8,47
	A-2	7,20	
	A-3	8,96	
	A-4	9,17	
	A-5	9,34	
A tratado e Consolidado	A-1	8,07	9,22
	A-2	8,66	
	A-3	9,64	
	A-4	9,79	
	A-5	9,95	
B	B-1	9,86	6,26
	B-2	6,49	
	B-3	1,89	
	B-4	6,79	
C	C-1	14,60	13,11
	C-2	12,45	
	C-3	12,16	
	C-4	13,25	

Ensaio <i>in situ</i> - Pilodyn®		
Zona	Profundidade (mm)	Profundidade média (mm)
A	-	-
A tratado e Consolidado	-	-
B	-	-
C	10	12,3
	13	
	15	
	12	
	10	
	14	

## Anexo 7.2 – Ensaaios realizados nas Escadas

Ensaaios <i>in situ</i> - Resistograph®				Ensaaios <i>in situ</i> - Pilodyn®					
Zona	Medição n°	MR (20cm/min)	Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	Zona	Profundidade (mm)	Profundidade média (mm)			
A	A-1	1,87	6,38	A	11	14,1			
	A-2	3,74			12				
	A-3	13,53			13				
A tratado e Consolidado	A-1	3,91	8,70		13		11,4		
	A-2	9,94			20				
	A-3	12,25			15				
B	B-1	0,66	1,03		15			17,8	
	B-2	1,39			20				
C	C-1	13,32	11,61		A tratado e Consolidado				10
	C-2	9,91		10					
				9		11,4			
				11					
				13					
				11					
				12					
				15					
				18	17,8				
				16					
				16					
				19					
				20					
				C	12	11,4			
					11				
					13				
					11				
					10				

## Anexo 7.3 – Ensaio realizados nas vigas do pavimento

Ensaio <i>in situ</i> - Resistograph®				Ensaio <i>in situ</i> - Pilodyn®			
Zona	Medição n°	MR (20cm/min)	Mr <sub>médio</sub> (20cm/min)	Zona	Profundidade (mm)	Profundidade média (mm)	
A	A-1	14,56	11,83	A	14	14,8	
	A-2	6,33			11		
	A-3	4,64			16		
	A-4	14,33			18		
	A-5	15,42			13		
	A-6	15,67			16		
A tratado e Consolidado	A-1	15,98	15,55		15		
	A-2	12,99			13		
	A-3	13,77			18		
	A-4	14,88			14		
	A-5	17,60			13		
	A-6	18,06			13		
B	B-1	7,71	6,96	A tratado e Consolidado	13	13,9	
	B-2	8,98			13		
	B-3	2,40			15		
	B-4	3,38			14		
	B-5	12,35			13		
C	C-1	12,44	12,79		15		
	C-2	13,09			15		
	C-3	13,47			15		
	C-4	13,22			17		
	C-5	11,72			18		
B					18		21,3
					18		
				40			
				18			
				17			
				17			
C				16	16,2		
				16			
				16			
				16			
				17			
				16			

Anexo 7.4 – Planta Palacete Ribeiro da Cunha (Príncipe Real, 1877)

