AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em
Reabilitação do Património Edificado

Jerónimo Araújo Botelho Júnior

Licenciado em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação realizada sobre a orientação do sr. Professor Doutor JOSÉ MANUEL MARQUES AMORIM DE ARAÚJO FARIA do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e co-orientação do sr. Professor Doutor RAFAEL CAPUZ LLADRÓ da Universidad Politécnica de Valencia

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Setembro de 2006

RESUMO

Esta dissertação insere-se num projecto de investigação relacionado com a avaliação das propriedades mecânicas de elementos estruturais em madeira através de métodos não destrutivos, em curso na Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Espanha, tendo sido estabelecido um protocolo de cooperação com a Universidade do Porto, através da FEUP. O projecto decorreu em Espanha, entre Outubro de 2004 e Julho de 2005.

A investigação realizada teve como objectivo principal a avaliação das potencialidades dos métodos modernos de avaliação não destrutiva da capacidade resistente de peças estruturais de madeira, nomeadamente, pelo estudo de correlações entre ensaios *in situ* e em laboratório, de modo a validar a utilização de dois métodos de aplicação *in situ*: o *Resistograph* e o *Sylvatest* (Ultra-sons).

Foram realizados ensaios mecânicos e de ultra-sons a 100 vigas de *Pinus radiata* (Pinho insigne ou Pinho de Monterey) no Laboratório de Maderas del Instituto Nacional de Investigación Agraria espanhol (CIFOR-INIA), em Madrid, e comparadas com ensaios não destrutivos realizados em laboratório na UPV, sobre as mesmas amostras, recorrendo ao *Resistograph*.

Foram definidas correlações estatísticas entre os dois conjuntos de resultados.

Aplicaram-se correlações e resultados de ensaios não destrutivos realizados *in situ* (*Resistograph*, *Sylvatest* e *Georradar*), sobre um caso real de estudo em Valência: um edifício histórico do século XV, Património da Humanidade desde 1996 ("La Lonja de los Mercaderes de Valencia").

Deste estudo resultou a definição de expressões numéricas, intervalos de classificação e metodologias expeditas de atribuição de classes de resistência de peças estruturais de madeira, com o recurso à utilização dos dois métodos de avaliação não destrutiva em estudo, o *Resistograph* e o *Sylvatest*.

Por fim, propõem-se algumas linhas de investigação a desenvolver no âmbito da inspecção de estruturas de madeira por metodologias não destrutivas.

Palavras Chave: Ensaios não destrutivos; Elementos estruturais em madeira antiga; Metodologias de classificação; Estudo de caso.

ABSTRACT

This work is set in an investigation project related to the evaluation of the mechanical properties of wooden structures by using non destructive methods, running in at the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, being established a cooperation protocol with the Universidade do Porto, by FEUP. The project took place in Spain, between October 2004 and July 2005.

The main purpose of the investigation made was the evaluation of the potentialities of the modern methods of non destructive evaluation of the strength value of structural wooden pieces, namely, by the study of correlations between *in situ* and laboratorial tests, to validate the use of two methods of *in situ* application: the *Resistograph* and the *Sylvatest* (Ultrasounds).

Mechanical and ultrasounds tests were made to 100 beams of *Pinus radiata* at the Laboratório de Maderas of the spanish Instituto Nacional de Investigación Agraria (CIFOR-INIA), in Madrid, and compared to non destructive tests made in laboratory at UPV, to the same samples, using the *Resistograph*.

Statistical correlations between the two groups of results were established.

Correlations and results of non destructive tests made *in situ* (*Resistograph*, *Sylvatest* and *Georradar)* were applied to a real case-study in Valencia: an historical building of the XV century, World Heritage since 1996 (*"La Lonja de los Mercaderes de Valencia"*).

From this study resulted the definition of numerical expressions, grading intervals and expedite methodology to proceed to the strength grading of wooden structural pieces, using the two non destructive methods of evaluation in study, the *Resistograph* and the *Sylvatest*.

At last, some lines of further investigation in the area of non destructive inspection of wooden structures are proposed.

Key words: Non destructive tests; Ancient timber structures; Grading methods; Case-study.

RESUMEN

Este trabajo esta inserido en un proyecto de investigación relacionado con la evaluación de las propiedades mecánicas de elementos estructurales de madera por metodologías no destructivas, en curso en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España, habiendo sido establecido un protocolo de cooperación con la Universidade do Porto, por la FEUP. El proyecto ha decorrido en España, entre Octubre de 2004 y Julio de 2005.

La investigación realizada tuve como principal objetivo la evaluación de las potencialidades de los métodos modernos de evaluación no destructiva de la capacidad resistente de piezas estructurales de madera, mas precisamente, por el estudio de correlaciones entre ensayos *in situ* y en laboratorio, para validar la utilización de dos métodos modernos de aplicación *in situ*: el *Resistograph* y el *Sylvatest* (Ultrasonidos).

Han sido realizados ensayos mecánicos y de ultrasonidos en 100 vigas de *Pinus radiata* en el Laboratorio de Maderas del Instituto Nacional de Investigación Agraria español (CIFOR-INIA), en Madrid, y comparadas con ensayos no destructivos realizados en laboratorio en la UPV, sobre las mismas piezas, utilizando el *Resistograph*.

Se han definido correlaciones estadísticas entre los dos conjuntos de resultados.

Se han aplicado correlaciones y resultados de ensayos no destructivos realizados *in situ* (*Resistograph*, *Sylvatest* y *Georradar*), en un caso real de estudio en Valencia: un edificio histórico del siglo XV, Patrimonio Mundial desde 1996 (*"La Lonja de los Mercaderes de Valencia"*).

De este trabajo ha resultado la definición de expresiones numéricas, intervalos de clasificación y metodologías expeditas de atribución de clases de resistencia de piezas estructurales de madera, con recurso al uso de dos métodos de evaluación no destructiva en estudio, el *Resistograph* y el *Sylvatest*.

Por fin, se proponen algunas líneas de investigación a desenvolver en el ámbito de la inspección de estructuras de madera por metodologías no destructivas.

Palabras Clave: Ensayos no destructivos; Elementos estructurales de madera antigua; Metodologías de clasificación; Estudio de caso.

AGRADECIMENTOS

A primeira pessoa cujo contributo gostaria de enaltecer é o do Prof. Rafael Capuz Lladró, da UPV, co-orientador desta dissertação, por ter sido responsável pelo estabelecimento deste protocolo, oferecendo-me a oportunidade de trabalhar num tema pelo qual sempre tive um gosto particular. A minha gratidão por me disponibilizar todos os meios ao seu alcance para que o meu trabalho e formação na UPV se desenvolvesse da melhor forma possível, compensando assim os sacrifícios feitos, pelos valiosos conceitos transmitidos e pela sua permanente preocupação e ajuda na resolução das diversas dificuldades com que me deparei.

Gostaria igualmente de prestar a minha gratidão, de um modo genérico, a todas as pessoas com quem contactei e colaborei na UPV, as quais, pela sua proximidade e simplicidade, contribuíram para que a minha estadia em Valência se revelasse uma experiência extremamente rica, tanto em termos profissionais, como em termos pessoais. Entre muitos outros, uma palavra especial de gratidão ao Prof. Manuel Ramírez e ao Prof. Javier Benlloch, pela preciosa ajuda prestada no caso de estudo desenvolvido ("La Lonja de los Mercaderes de Valencia"), e a D. Encarna Cabanes e D. Isabel Rodríguez, pela troca de conhecimentos sobre o estado da arte relativamente ao uso do Georradar.

Ao Prof. Rafael Díez Barra, do CIFOR-INIA, pela sua simplicidade e pela forma próxima como sempre acompanhou o meu trabalho. O seu contributo científico revelou-se fundamental, pelos conhecimentos e conselhos transmitidos, pela ajuda prestada nos procedimentos de cálculo e pela sua sempre imediata disponibilidade.

Ao meu orientador, o Prof. José Amorim Faria, pelo seu incansável apoio, pelos conhecimentos partilhados e contributo na definição das metodologias propostas, e, principalmente, pela forma amiga como sempre me incentivou e auxiliou durante todo este processo, principalmente na parte final do período de escrita da dissertação, em que a motivação que transmitiu foi essencial para o cumprir deste objectivo.

À STAP - Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas, SA, empresa onde exerço a minha actividade profissional, e em particular ao Eng. Miguel Santos, pela paciência ao longo do período de escrita desta dissertação e pelos meios colocados ao meu dispor para que cumprisse este objectivo pessoal.

Aos meus familiares e amigos mais próximos, de quem frequentemente privei a minha companhia e dedicação, e em especial, à minha Mãe, para quem nunca conseguirei encontrar palavras para expressar toda a minha gratidão.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Objecto, âmbito e justificação 15
1.2 Bases do trabalho desenvolvido 17
1.3 Organização da dissertação 17

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA POR MÉTODOS TRADICIONAIS

2.1 Avaliação das propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira por métodos tradicionais 19
2.1.1 Árvore e madeira serrada 19
2.1.2 Estrutura macroscópica da madeira 20
2.1.3 Estrutura microscópica da madeira 22
2.1.4 Propriedades físicas e mecânicas 25
2.1.4.1 *Propriedades físicas 27*
2.1.4.2 *Propriedades mecânicas 34*
2.2 Patologias dos elementos estruturais de madeira 43
2.2.1 Patologias de carácter biótico 43
2.2.2 Patologias de carácter abiótico 59
2.3 Avaliação das propriedades mecânicas da madeira por ensaios destrutivos 60
2.3.1 Ensaios sobre provetes de pequena dimensão 60
2.3.2 Ensaios sobre peças com dimensões estruturais 61
2.3.2.1 *Considerações gerais 61*
2.3.2.2 *Norma europeia EN408 ..... 62*
2.3.3 Defeitos e anomalias das peças de madeira 63
2.3.4 Outros factores que influenciam a resistência mecânica de madeira estrutural 66
2.4 Valores das propriedades mecânicas de madeira a usar no cálculo à rotura 68
2.4.1 Madeira serrada classificada 68
2.4.2 Normas europeias de classificação de madeiras em classes de qualidade 69
2.4.3 Classes de resistência 72
2.4.4 Relação entre a classificação visual e as classes de resistência 73
2.4.5 Valores de cálculo 74
2.5 Propriedades físicas e mecânicas de peças de madeira aplicadas em estruturas existentes 76
2.6 Principais características de madeiras correntemente usadas em Estruturas de Madeira em Portugal 78

CAPÍTULO 3

METODOLOGIAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA – MÉTODOS MODERNOS

3.1 Objecto 83

3.2 Métodos e equipamentos de avaliação não destrutiva 84

3.2.1 Resistograph 84

3.2.2 Ultra-sons 87

3.2.3 Georradar 91

3.2.4 Método das vibrações induzidas 97

3.2.5 Medição da densidade superficial – pylodin 98

3.2.6 Detecção acústica de insectos xilófagos 99

3.2.7 Radiografia - raios X e raios gama 99

3.2.8 Dendocronologia 100

3.2.9 Resumo 101

3.3 Vantagens e inconvenientes dos métodos e equipamentos de inspecção não destrutiva 102

3.3.1 Resistograph 103

3.3.2 Ultra-sons 103

3.3.3 Georradar 104

3.3.4 Método das vibrações induzidas 105

3.3.5 Medição da densidade superficial – pylodin 105

3.3.6 Detecção acústica de insectos xilófagos 105

3.3.7 Radiografia - raios X e raios gama 106

3.4 Metodologia de atribuição de classes de resistência a madeiras existentes por ensaios não destrutivos – Resistograph e Sylvatest 107

3.4.1 Resistograph 108

3.4.1.1 *Considerações gerais 108*

3.4.1.2 *Resultados e metodologia de atribuição de classes resistentes 108*

3.4.2 Sylvatest 112

3.4.2.1 *Considerações gerais 112*

3.4.2.2 *Metodologia de ensaio 113*

3.4.2.3 *Resultados e metodologia de atribuição de classes resistentes 116*

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE PINUS RADIATA UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE RESISTOGRAPH E SYLVATEST

4.1 Amostragem e objecto 120

4.2 Base de trabalho 122

4.3 Método de ensaio – Resistograph 123

4.3.1 Procedimento e observações ……. 123
4.3.2 Resultados do ensaio do Resistograph …… 124
4.3.3 Tratamento estatístico dos resultados …….. 128
4.3.3.1 *Descrição estatística das variáveis ……... 128*
4.3.3.2 *Análise de regressão entre variáveis …… 133*
4.3.3.3 *Análise de regressão com duas variáveis regressoras …….. 138*
4.3.3.4 *Ajuste de equações e intervalos de confiança …… 139*
4.3.4 Resultados do cálculo estatístico …….. 140
4.4 Principais conclusões …… 141

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA A AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PINUS NIGRA. CASO PRÁTICO DE ESTUDO – "LA LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA"

5.1 Introdução ……... 143
5.2 Objecto e base de trabalho …… 144
5.3 Metodologia de inspecção …… 146
5.3.1 Enquadramento histórico ……. 147
5.3.2 Descrição construtiva ……... 148
5.3.3 Levantamento geométrico, fotográfico e de patologias …….. 153
5.3.4 Identificação da espécie e qualidade da madeira …… 155
5.3.5 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – humedímetro …… 155
5.3.6 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – Resistograph …… 156
5.3.7 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – Sylvatest ……... 160
5.3.8 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – Georradar ……. 163
5.3.9 Atribuição de classes de resistência e discussão dos resultados …… 164
5.4 Principais conclusões …… 168

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES FINAIS

6.1 Principais resultados obtidos …….. 170
6.2 Desenvolvimentos futuros …… 172

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS...…….. 173
ANEXO I …… 179
ANEXO II ……... 194

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Direcções principais de corte no tronco de uma árvore [Carvalho, 1996] …….. **20**
Figura 2.2 – Corte transversal de tronco de uma árvore. [Makepeace, 1993] ……. **20**
Figura 2.3 –Aspecto microscópico de madeira de resinosas [Carvalho, 1996] ……..... **23**
Figura 2.4 - Aspecto microscópico de madeira Folhosas [Carvalho, 1996] ……. **23**
Figura 2.5 - Estrutura das células da madeira (escala ultramicroscópica) [Álvarez, 1992] …..……. **25**
Figura 2.6 – Relação entre a humidade e a resistência mecânica. [Arguelles e Arriaga, 1996] ……..… **26**
Figura 2.7 - Gráfico de curvas de equilíbrio higrosópico [Benoit, 1997] …….…….. **28**
Figura 2.8 – Diagrama de Kollmann (humidade-peso específico) [Carvalho, 1996] ……..…….……... **30**
Figura 2.9 – Efeitos da deformação por contracção, em função do tipo de corte. Fonte: G. Medina AITIM (Vignote e Jiménez, 1996) …….…….…….. **32**
Figura 2.10 - Cachorro de madeira após incêndio, com a superfície exterior completamente carbonizada [Tampone, 2005] …….…….…….…… **34**
Figura 2.11 - Diagrama de valores de resistência global da madeira, em função do esforço instalado. [Carvalho, 1996] …….…….…….…….…….. **35**
Figura 2.12 - Exemplo de degradação provocada por bolores. [Arriaga, 2002] …….. **45**
Figura 2.13 - Exemplo de degradação provocada por fungos cromogéneos. [Arriaga, 2002] …….. **45**
Figura 2.14 – Exemplo de podridão parda. [Arriaga, 2002] …….…….…….. **46**
Figura 2.15 – Exemplo de podridão branca ou fibrosa. [Arriaga, 2002] …….……... **46**
Figura 2.16 – Degradação provocada por Anóbios [Liotta, 2000] …….…….…… **49**
Figura 2.17 – Aspecto morfológico dos Anóbios. …….…….…….…….. **49**
Figura 2.18 – Degradação provocada por Cerambicídeos [Arriaga, 2002] …….…… **50**
Figura 2.19 – Aspecto morfológico dos Cerambicídeos. …….…….……... **50**
Figura 2.20 – Degradação provocada por Líctidos …….…….…….. **51**
Figura 2.21 – Aspecto morfológico dos Líctidos. …….…….…….……... **51**
Figura 2.22 – Aspecto morfológico dos Curculiónidos. [Arriaga, 2002] …….…… **51**
Figura 2.23 – Térmitas e suas diferentes classes sociais: Indivíduos sexuados, soldados e obreiras [CTBA, 2002] …….…….…….…….…… **53**
Figura 2.24 – Ciclo de vida das térmitas …….…….…….…… **54**
Figura 2.25 – Exemplo do ataque de térmitas: secção transversal. ……..……...…… **55**
Figura 2.26 – Exemplo do ataque de térmitas: secção longitudinal……..…… **55**
Figura 2.27 – Exemplo de galeria exterior fabricada pelas térmitas para circulação [Liotta, 2000] ……. **56**
Figura 2.28 – Nó da madeira [Tampone, 2005] …….…….…….…… **64**
Figura 2.29 – Exemplo de uma fenda longitudinal ……..... **65**
Figura 2.30 – Máquinas de classificação não destrutiva da madeira: Computermatic, a qual mede a deformação perante uma solicitação seleccionada. …….…… **72**
Figura 2.31 – Máquinas de classificação não destrutiva da madeira: COOK-BOLINDER, a qual mede a força necessária para se atingir determinada deformação. …….. **72**
Figura 2.32 – Atribuição de classes de resistência a madeiras em serviço. …….……... **77**

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Corpo central do Resistograph. ……..……..…… **84**

Figura 3.2 – Bateria e impressora portátil. …… **84**
Figura 3.3 – Esquema representativo da agulha de perfuração do Resistograph. …… **85**
Figura 3.4 – Saída de dados do Resistograph. Em cima, gráfico do perfil de resistência à perfuração. À direita, saída numérica de dados do software do Resistograph. …… **86**
Figura 3.5 – Pundit …… **89**
Figura 3.6 – Componentes do aparelho Sylvatest [Capuz, 2003] …… **90**
Figura 3.7 – Exemplo de um radargrama, relativamente ao perfil de variação longitudinal de uma viga de madeira. …… **93**
Figura 3.8 – Diagrama de perfil de variação vertical [Cabanes, 2005] …… **94**
Figura 3.9 – Diagrama de perfil de variação vertical, sendo ilustrado os diversos estratos presentes [Cabanes, 2005] …… **94**
Figura 3.10 – Georradar modelo SIR-3000 – unidade central, onde se podem ver os perfis electromagnéticos do meio. [Cabanes, 2005] …… **96**
Figura 3.11 – Antena do Georradar. [Cabanes, 2005] …… **96**
Figura 3.12 – Esquema de funcionamento do aparelho METRIGUARD …… **97**
Figura 3.13 - Componentes do aparelho METRIGUARD: unidade central. …… **98**
Figura 3.14 - Componentes do aparelho METRIGUARD: martelo de impacto. …… **98**
Figura 3.15 – PYLODIN – Aparelho de medição da densidade superficial …… **98**
Figura 3.16 – Detecção acústica de insectos xilófagos. …… **99**
Figura 3.17 – Equipamentos para a aplicação da técnica de raios-X à inspecção de estruturas de madeira. …… **100**
Figura 3.18 – Exemplo da saída de resultados do ensaio por raios gamma. …… **100**
Figura 3.19 – Extracção de uma carote de uma viga de madeira. …… **101**
Figura 3.20 – Gráfico Matemático, obtido através do Microsoft Excel. …… **109**
Figura 3.21 – Valores iniciais (A) e finais (B) do intervalo em que se admite um funcionamento estável do Resistograph. …… **109**
Figura 3.22 – Valores iniciais (J) e finais (K) do intervalo considerado para o cálculo da resistência média, considerando apenas 2/3 dos seus valores. A linha verde é visível o valor médio obtido por este método. …… **110**
Figura 3.23 – Furação na viga de madeira para colocação da sonda do Sylvatest. …… **113**
Figura 3.24 – Medição directa - secção longitudinal constante (Sawing) …… **114**
Figura 3.25 – Medição directa - secção longitudinal variável (Log) …… **114**
Figura 3.26 – Medição indirecta - secção longitudinal constante (Sawing) …… **115**
Figura 3.27 – Medição indirecta - secção longitudinal variável (Log) …… **115**
Figura 3.28 – Medição indirecta - secção longitudinal de tronco de árvore (Standing Tree) …… **115**
Figura 3.29 – Medição paralela. …… **115**
Figura 3.30 – Medição cruzada. …… **115**
Figura 3.31 – Medição radial. …… **116**

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Amostragem de provetes ensaiados de Pinus radiata – 300 peças de 30x15x5 cm …… **120**
Figura 4.2 - Amostragem de provetes ensaiados de Pinus radiata – 300 peças de 30x15x5 cm …… **120**
Figura 4.3 – Provete nº4101, retirado do apoio esquerdo da viga 4101. …… **121**
Figura 4.4 – Zona de extracção dos provetes. …… **121**
Figura 4.5 - Ensaio dos provetes de madeira com o Resistograph 1410 (Laboratório) …… **123**
Figura 4.6 - Esquema de uma medição radial (a) e medição tangencial (b) …… **123**

Figura 4.7 - Extracto da Ficha nº 2 – Valores do Resistograph por viga ……..…… **127**

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Vista da fachada principal de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia" ……... **144**
Figura 5.2 - Esquema ilustrativo da metodologia de cálculo a desenvolver. …….. **145**
Figura 5.3 - Planta de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia". ……..…….. **149**
Figura 5.4 - Vista interior do Salão Colunário. ……..……..…….. **150**
Figura 5.5 - Fachada principal da Torre de "La Lonja". ……..……..……... **151**
Figura 5.6 - Vista da escada em caracol da Torre. ……..……..…….. **151**
Figura 5.7 - Fachada posterior do edifício do Consulado e pátio. À direita, "Salón del Comércio" e vigas de madeira do tecto, após remoção das forras de madeira de revestimento. …… **151**
Figura 5.8 - "Salón del Comércio" e vigas de madeira do tecto, após remoção das forras de madeira de revestimento. ……..……..……..…… **151**
Figura 5.9 - Estrutura de suporte do pavimento do tecto do "Salón del Comércio". …….. **152**
Figura 5.10 - Moldura e ménsula de apoio das vigas de madeira. ……..…….. **152**
Figura 5.11 - Vista dos caixotões dispostos no espaço entre as vigas de madeira, das quais foram já retiradas as placas de madeira de revestimento ornamental. ……..…….. **152**
Figura 5.12 - Denominação utilizada para as vigas de madeira da "Sala del Consulado" …… **153**
Figura 5.13 - Ataque de térmitas na estrutura secundária de suporte do pavimento do "Salón del Consulado". ……..……..……..……..…… **154**
Figura 5.14 - Marca de antiga galeria de térmitas de acesso à estrutura de madeira. …… **154**
Figura 5.15 - Medição de humidade das vigas do "Salón del Consulado" através do uso do Humedímetro. ……..……..……..……..…… **156**
Figura 5.16 - Inspecção das vigas de madeira com recurso ao Resistograph. ……... **157**
Figura 5.17 – Pormenor da saída da agulha do Resistograph. ……..……..…….. **159**
Figura 5.18 - Exemplo do output do Resistograph. Perfil de variação da resistência à perfuração para a viga V2, onde é visível , em a), a existência de um vazio / fenda com cerca de 1,3 cm de largura. ……..……..……..……..…… **160**
Figura 5.19 - Esquema dos tipos de medição efectuadas. ……..……..…… **161**
Figura 5.20 - Colocação da sonda na parte superior da viga. ……..……..…… **161**
Figura 5.21 - Sylvatest Duo – Unidade central de medição. ……..……..…….. **161**
Figura 5.22 - Esquema ilustrativo dos pontos de colocação das sondas do Sylvatest na viga V7. ……. **162**

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 2.1 – Quadro resumo das principais características de cada um dos tipos de podridão que degradam as estruturas de madeira [adaptação de quadro resumo semelhante em Abasolo, 1998] …… **47**
Quadro 2.2 – Quadro resumo dos agentes bióticos de degradação de estruturas de madeira [adaptação de quadro resumo semelhante em Abasolo, 1998]…….. **58**
Quadro 2.3 – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN1912:2004) ……... **74**
Quadro 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (resinosas)……. **75**
Quadro 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (folhosas)……. **76**
Quadro 2.6 – Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes. …… **78**
Quadro 2.7 – Principais características da madeira de Castanho. …… **79**
Quadro 2.8 – Principais características da madeira de Eucalipto. …… **80**
Quadro 2.9 – Principais características da madeira de Casquinha. …….. **80**
Quadro 2.10 – Principais características da madeira de Pinheiro bravo. …… **81**
Quadro 2.11 – Principais características da madeira de Choupo branco. …….. **82**
Quadro 2.12 – Principais características da madeira de Carvalho. …… **82**

CAPÍTULO 3

Quadro 3.1 – Valores de características eléctricas de vários tipos de materiais, para uma frequência de medição de 100 MHz [Cabanes, 2005] …….. **94**
Quadro 3.2 – Resumo de métodos de ensaio não destrutivos para inspecção de estruturas de madeira. [Adaptação de quadro semelhante apresentado em Machado, 2003] …….. **102**
Quadro 3.3 – Critério de escolha da técnica não destrutiva a utilizar, em função do objectivo da inspecção. …… **107**
Quadro 3.4 – Expressões de correlação entre o VRmédio e algumas das principais propriedades mecânicas de elementos de madeira. ……... **111**
Quadro 3.5 – Correlações conhecidas entre o valor obtido por ensaios de ultra-sons ($E_{dinâmico}$) e as propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira. ……. **118**
Quadro 3.6 – Resenha bibliográfica dos resultados obtidos pela aplicação do Sylvatest (correlação entre a velocidade de propagação longitudinal e o módulo de elasticidade ou a tensão à rotura à flexão) [Machado, 2003]…… **118**

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 - Resultados do ensaio do Resistograph para as 100 vigas de Pinus radiata. ……..… **125**
Quadro 4.2 - Medidas de centralidade e dispersão da variável HUMIDADE para Pinus radiata.……. **129**
Quadro 4.3 – Medidas de centralidade e dispersão da variável MASSA VOLÚMICA para Pinus radiata. ……... **129**
Quadro 4.4 – Medidas de centralidade e dispersão da variável MOR para Pinus radiata.……. **130**
Quadro 4.5 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOE_US para Pinus radiata. **130**

Quadro 4.6 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOECTO para Pinus radiata. …… **131**
Quadro 4.7 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOETM para Pinus radiata. …….. **131**
Quadro 4.8 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VRr para Pinus radiata. …….. **132**
Quadro 4.9 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VRt para Pinus radiata. …….. **132**
Quadro 4.10 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VR para Pinus radiata. …….. **133**
Quadro 4.11 - Análise de regressão entre variáveis, para Pinus radiata. …… **134**
Quadro 4.12 - Diferença entre os valores reais de E_O e f_m e os valores obtidos pelo uso de técnicas não destrutivas, de acordo com a metodologia proposta. …… **140**
Quadro 4.13 - Intervalo de classes resistentes pelo uso do Resistograph, para o Pinus radiata, de acordo com a EN1912. …… **141**

CAPÍTULO 5

Quadro 5.1 - Dimensões das vigas do pavimento do "Salón del Consulado". …… **155**
Quadro 5.2 - Resultados das medições de humidade das vigas do tecto do "Salón del Consulado". … **156**
Quadro 5.3 - Resultados obtidos do valor do Resistograph por viga. …… **158**
Quadro 5.4 - Resultados obtidos do valor do Sylvatest por viga. …….. **163**
Quadro 5.5 - Cálculo do MOR através da expressão [5.3] . ……..... **165**
Quadro 5.6 - Resultados obtidos do valor do Sylvatest por viga. …….. **166**

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 4

Gráfico 4.1 – MOE_US vs MOECTO …… **134**
Gráfico 4.2– MOECTO vs MOETM …… **134**
Gráfico 4.3 – MOE_US vs MOETM …… **135**
Gráfico 4.4 – VRr vs VR …… **135**
Gráfico 4.5 – VRt vs VR …… **135**
Gráfico 4.6 – MOR vs DENSIDADE …… **135**
Gráfico 4.7 – MOR vs VR …… **135**
Gráfico 4.8 – MOR vs MOE_US …… **135**
Gráfico 4.9 – MOR vs MOECTO …… **136**
Gráfico 4.10 – MOR vs MOETM …… **136**
Gráfico 4.11 – Recta de ajuste à nuvem de dados: MOETM = -2487,10 + 1486,20 * $VR_{médio}$ (R^2 = 46,81%)… **137**
Gráfico 4.12 – Recta de ajuste à nuvem de dados: DENSIDADE = 166,51 + 37,076 * $VR_{médio}$ (R^2 = 70,09%). **137**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Objecto, âmbito e justificação

O tema desta dissertação é "*Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*".

Constituindo-se, até ao início do século XX, como o principal material estrutural na construção portuguesa, juntamente com a pedra, a madeira tem vindo a ser cada vez menos aplicada em estruturas, pelo facto de possuir características que induzem algum receio e insegurança aos projectistas. Essas características são, essencialmente, as seguintes:

- Grande variedade de tipos de madeira (espécies florestais), com propriedades muito distintas;
- Existência de diversos tipo de defeitos e anomalias das peças estruturais que podem ter grande influência na sua capacidade resistente;
- Comportamento anisotrópico da madeira (pode ser definido como transverso isotrópico), o que "exige" que as peças sejam montadas de forma orientada;

O aparecimento do betão armado e do aço, e o grande desenvolvimento que a caracterização experimental e controlo de qualidade destes dois materiais atingiu, levou a que os projectistas, entusiasmados pela diversidade de soluções de desenho estrutural, bem como pela durabilidade e reduzida manutenção associada a estes materiais (ou assim se julgava nos primeiros anos da sua aplicação), comparativamente com a madeira, progressivamente deixassem de usar as estruturas de madeira.

Para tal também contribuiu, e muito, o facto de existir, até há poucos anos, um vazio regulamentar e normativo relativamente ao cálculo de estruturas de madeira, o qual se estendia ao ensino universitário, assim como as crescentes exigências na celeridade de execução dos projectos e a convicção insustentada dos promotores de que a substituição de estruturas de madeira, por estruturas de betão armado e/ou aço, constitui invariavelmente uma solução mais económica.

Porém, nos últimos anos verifica-se uma inversão desta tendência, com a consciencialização quase geral da necessidade de reabilitação do património arquitectónico edificado (e a consequente revitalização das técnicas construtivas e materiais antigos, como as estruturas de

madeira), para o que muito contribuíram as cartas e tratados de restauro e reabilitação desenvolvidos entre diversos países (Carta de Cracóvia, Carta de Veneza, Carta de Atenas, entre outras), e o crescente desenvolvimento de estudos científicos e oferta de cursos de licenciatura, mestrado e doutoramento na área.

Dada a vasta aplicação das estruturas de madeira nos edifícios antigos portugueses (em soalhos, coberturas e paredes), e pelo facto de existir uma recuperação do gosto dos arquitectos e engenheiros pela sua utilização como material estrutural, associado também ao aparecimento de novos materiais industriais à base de madeira, com destaque para o lamelado colado, surge a necessidade da sua redescoberta como material estrutural.

Essa é a justificação desta dissertação. Pretende-se contribuir para a divulgação das potencialidades dos métodos modernos de avaliação não destrutiva da capacidade resistente de peças estruturais de madeira.

A tese desenvolvida tem uma forte componente experimental e as conclusões atingidas baseiam-se exclusivamente nos resultados de campanhas de ensaios realizados em Madrid e em Valência (Espanha).

A campanha experimental realizada pelo autor da dissertação resultou de um projecto de investigação estabelecido entre a Universidad Politecnica de Valencia (UPV), Espanha, e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e decorreu em Valência, entre Outubro de 2004 e Julho de 2005.

A investigação realizada teve como objectivo determinar correlações estatísticas entre ensaios *in situ* e em laboratório sobre elementos estruturais de madeira, de modo a validar a utilização de dois métodos de avaliação não destrutiva de aplicação *in situ*: o *Resistograph* e o *Sylvatest* (Ultra-sons).

Resultados de ensaios mecânicos e de ultra-sons realizados a 100 vigas de *Pinus radiata* (Pinho insigne ou Pinho de Monterey) no Laboratório de Maderas del Instituto Nacional de Investigación Agraria espanhol (CIFOR-INIA), em Madrid, foram comparadas com ensaios não destrutivos realizadas em laboratório na UPV, sobre as mesmas amostras, recorrendo ao *Resistograph*.

Foram definidas correlações estatísticas entre os dois conjuntos de resultados.

Aplicaram-se correlações e resultados de ensaios não destrutivos realizados *in situ* (*Resistograph*, *Sylvatest* e *Georradar*), sobre um caso real de estudo em Valência: um edifício histórico do século XV, Património da Humanidade desde 1996 ("La Lonja de los Mercaderes de Valencia").

1.2 Bases do trabalho desenvolvido

O trabalho de investigação desenvolvido nesta dissertação apoiou-se em outros trabalhos recentes de investigadores europeus no domínio, com destaque para as teses de doutoramento de D. Rafael Capuz Lladró, da UPV, Valência, Espanha, e Prof. José Saporiti Machado, do Núcleo de Madeiras do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Foi realizada uma exaustiva pesquisa normativa no domínio e consultaram-se diversas referências bibliográficas de carácter mais geral, no âmbito das madeiras em geral, e das estruturas de madeira em particular, as quais se descriminam no capítulo da Bibliografia.

Os conceitos de carácter mais geral incluídos nos capítulos 2 e 3 destinam-se a enquadrar o objecto principal da dissertação, o qual é claramente aplicado e experimental.

Desenvolveu-se trabalho experimental laboratorial importante, em Valência, e aproveitaram-se valores de ensaios mecânicos à escala real realizados anteriormente no CIFOR-INIA, Madrid.

Aplicaram-se técnicas não destrutivas (*Resistograph*, *Sylvatest* e *Georradar*) a um caso real de estudo de um edifício histórico em Valência ("La Lonja de los Mercaderes de Valencia").

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos:

No *Capítulo 1* faz-se uma breve apresentação do trabalho e sintetiza-se o seu conteúdo.

No *Capítulo 2* desenvolve-se um capítulo de estado da arte, de carácter mais geral, sobre a avaliação das propriedades mecânicas da madeira por métodos correntes. Faz-se uma síntese dos principais conceitos associados a esta questão, após apresentar noções gerais sobre madeiras (árvore e madeira, propriedades físicas e mecânicas, patologias de origem biótica e abiótica, defeitos e outros factores que influenciam a resistência mecânica da madeira).

No *Capítulo 3* descrevem-se e caracterizam-se com algum desenvolvimento os principais métodos e equipamentos modernos de avaliação não destrutiva da capacidade resistente e de integridade de elementos estruturais de madeira. Faz-se uma análise comparada das principais vantagens e desvantagens de cada uma das metodologias e apresenta-se uma reflexão sobre as suas principais limitações.

O *Capítulo 4* descreve os ensaios e os resultados obtidos sobre 100 peças de *Pinus radiata* espanhol, com recurso a técnicas destrutivas e equipamento e técnicas não destrutivas. Apresentam-se os resultados da análise estatística de correlação realizada sobre as duas séries de resultados e propõe-se expressões inéditas para a obtenção das principais propriedades mecânicas (E_o e f_m), em função dos resultados obtidos nos ensaios do *Resistograph* e do *Sylvatest*.

No *Capítulo 5* descreve-se um caso prático de estudo, realizado pelo autor da dissertação entre Março e Julho de 2005, o qual diz respeito à inspecção não destrutiva de vigas de madeira do edifício denominado "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", sito no centro histórico da cidade de Valência, Espanha. A metodologia de inspecção tinha como objectivo principal avaliar a capacidade resistente das 13 vigas de madeira principais do tecto da "Sala del Comercio" desse edifício, recorrendo a técnicas não destrutivas (*Resistograph* e *Sylvatest*), e como objectivo secundário, avaliar a integridade dessas mesmas vigas tendo em conta os ataques bióticos a que as mesmas estiveram sujeitas no passado. As vigas são em Pinho laricio (*Pinus nigra Arn.*), da região de Cuenca, Espanha, de acordo com o parecer do CIFOR-INIA.

Finalmente, no *Capítulo 6* apresentam-se as principais conclusões e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA POR MÉTODOS TRADICIONAIS

2.1 A madeira como material estrutural

2.1.1 Árvore e madeira serrada

A madeira resulta da transformação de um organismo vivo, a árvore, sendo um material heterogéneo e acentuadamente anisotrópico. Dada a diversidade de factores que influenciam o seu crescimento (como a natureza do solo, a altitude, as condições climáticas, entre outros), pode-se afirmar que não é possível encontrar numa árvore dois pontos distintos com características iguais. É um material complexo, estrutural e morfologicamente, sendo o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas indispensável para a correcta utilização como material estrutural.

Em função da sua estrutura anatómica, as madeiras podem ser divididas em dois grandes grupos botânicos: as **Gimnospérmicas** (vulgarmente denominadas de **Resinosas, Coníferas ou madeiras brandas**) e as **Angiospérmicas** (vulgarmente denominadas de **Folhosas ou madeiras duras**). Seguidamente veremos quais as principais características fibro-anatómicas que as distinguem.

As madeiras do grupo botânico das Angiospérmicas podem dividir-se em dois grandes grupos: as monocotiledóneas e as dicotiledóneas. O primeiro, de que são exemplo as palmeiras e os bambus, contém madeiras bastante fibrosas e de baixa resistência estrutural. As madeiras vulgarmente designadas de Folhosas inserem-se pois no grupo das dicotiledóneas, sendo que este alberga, tanto madeira de baixa, como de elevada qualidade. Foi feita esta nota para que se perceba que, apesar de vulgarmente se usarem os dois termos como equivalentes, não o são efectivamente.

O grupo botânico das Gimnospérmicas é composto por quatro classes, das quais apenas duas têm porte para produzir madeira estrutural, sendo a classe *coniferopsidos* e a ordem *conifiérales*, conhecida vulgarmente pelo nome de Coníferas, a mais utilizada em estruturas. Caracterizam-se por ter folha perene, boa resistência à compressão e ainda melhor à tracção, sendo utilizadas para estruturas (Capuz, 2003).

São exemplos de espécies de madeiras resinosas, o Pinheiro, o Abeto, o Cedro e o Cipreste; e de madeiras folhosas o Castanho, o Eucalipto, o Carvalho, o Choupo e a Nogueira.

Mais à frente nesta dissertação, abordam-se outras características que distinguem as madeiras Resinosas e Folhosas, nomeadamente no que diz respeito à sua estrutura microscópica.

2.1.2 Estrutura macroscópica da madeira

A madeira é proveniente das árvores, as quais são constituídas pela raiz, caule e copa. Como material de construção, é normal apenas o aproveitamento da madeira do caule (ou tronco). Antes de se proceder ao estudo da estrutura macroscópica da madeira, convém definir os distintos tipos de corte que se podem realizar no tronco de uma árvore (fig.2.1).

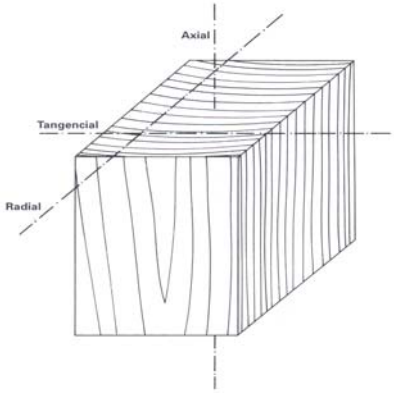


Figura 2.1 – Direcções principais de corte no tronco de uma árvore [Carvalho, 1996].

Vejamos agora quais os elementos celulares que compõem o tecido lenhoso da madeira, realizando um corte transversal pelo tronco de uma árvore, uma vez que este fornece maior informação sobre a sua estrutura macroscópica:

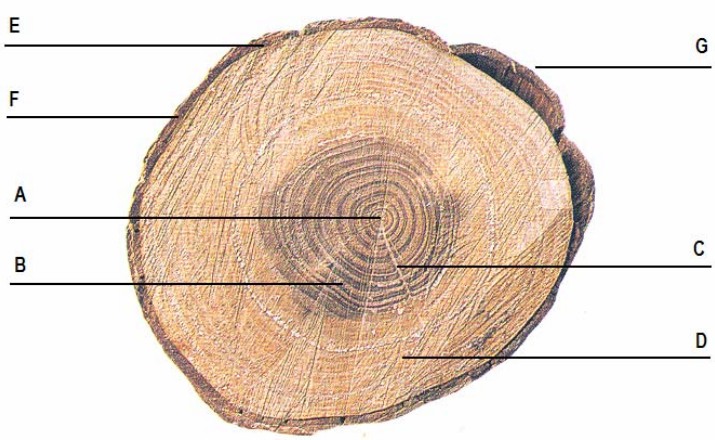


Figura 2.2 – Corte transversal de tronco de uma árvore. [Makepeace, 1993] Legenda A - medula / B- cerne / C – raio medular / D – borne / E – câmbio / F – líber / G - casca

A **casca**, camada mais externa do tronco, é uma capa de espessura irregular, sendo formada por duas secções distintas: a camada epidérmica, que corresponde à secção externa, formada por células mortas com função de protecção do lenho; e o líber, formado por células vivas, que além de garantir igualmente a protecção do tronco, procede à condução da seiva que foi elaborada nas folhas da árvore, permitindo o seu crescimento. Em função deste crescimento, a casca vai sendo renovada.

O **câmbio** tem a função de gerar células novas, sendo pois constituído por um tecido denominado por tecido merismático, em permanente transformação celular. Assim, a actividade do meristema líbero-lenhoso é responsável pelo engrossamento e transformação, quer do líber (na direcção exterior), quer do borne (na direcção interior), no qual serão visíveis os anéis de crescimento anual resultantes deste processo.

O **lenho** constitui o suporte da árvore e apenas desta secção é aproveitado material para utilização estrutural. É constituído pelo borne e pelo cerne.

O **borne**, camada mais externa, corresponde à madeira mais jovem da árvore. É constituído por células vivas e garante a condução da seiva bruta, desde a raiz da árvore até à sua copa, por ascensão capilar. Em geral, é menos espesso e de coloração mais clara que o cerne e contém grande quantidade de água e substâncias nutritivas.

O **cerne**, camada interior, é constituído por tecido morto, sem função circulatória de substâncias. Vai sendo progressivamente engrossado devido às transformações celulares que ocorrem no borne, nomeadamente pelo espessamento das paredes celulares, por sucessivas impregnações de lenhina, resinas, taninos e corantes (Sardinha, 1988). Deste modo, o cerne apresenta maior densidade, resistência e estabilidade perante a humidade e agentes de degradação biológica. Tem uma coloração mais escura do que o borne.

A **medula**, de reduzida espessura, é a parte central do tronco da árvore, sendo constituída por tecido sem qualquer resistência mecânica e durabilidade.

Nas secções do borne e cerne são visíveis os **anéis de crescimento anual**, resultado do crescimento transversal por adição de novas camadas concêntricas e periféricas, pela acção do meristema líbero-lenhoso.

Os anéis de crescimento variam muito de largura e distinção em função das diferentes espécies de madeira, e dentro da mesma espécie, consoante a altura da árvore e as condições a que se encontra exposta. São o reflexo do crescimento da árvore, sendo que nas zonas temperadas ou frias, o período vegetativo é anual, e então o número de anéis coincide com a idade da árvore,

formando camadas estreitas e bem diferenciadas; nas zonas tropicais este período é função das estações de chuvas, formando anéis de rápido crescimento, largos e pouco diferenciados.

A formação dos anéis caracteriza-se pela génese de duas camadas distintas: o *lenho inicial* ou lenho de Primavera (apenas para períodos vegetativos anuais), composto por células longas, de paredes finas e com escassez de fibras, dada a necessidade de uma intensa circulação de seiva; e o *lenho final*, tardio ou de Verão (igualmente apenas para períodos vegetativos anuais), composto por células estreitas, de paredes grossas, aumentando a quantidade de fibras e reduzindo-se a quantidade de vasos (Capuz, 2003). O lenho inicial é de formação rápida enquanto que o lenho tardio é formado mais lentamente, distinguindo-se do primeiro pela sua coloração mais escura.

Por fim, os **raios medulares**, que se estendem radialmente e de forma perpendicular ao eixo do tronco, desde a medula até à casca, têm como função transportar transversalmente e armazenar as substâncias nutritivas. Além desta função principal, são importantes para a classificação da madeira e para as suas propriedades, entre outras, contribuindo para a rigidez da estrutura do tronco. São formados por tecido laminar, mais brando que a restante madeira.

2.1.3 Estrutura microscópica e composição química da madeira

A compreensão do complexo e heterogéneo comportamento físico-mecânico do material madeira inicia-se pelo conhecimento da sua estrutura fibro-anatómica. Ainda que variando ligeiramente de espécie para espécie, são considerados dois grandes grupos de arranjos fibro-anatómicos nas madeiras: o das Resinosas e o das Folhosas.

As **Resinosas** são constituídas em cerca de 90 a 95% por células alongadas, denominadas de traqueídos, com 2 a 5mm de largura e 10 a 50μm de diâmetro, tendo os extremos uma forma afiada ou plana (Capuz, 2003). Uma vez que no início da época de crescimento (madeira de Primavera) a função dominante é a condução, enquanto que no final de estação (madeira de Verão) predomina a função de sustentação, as paredes celulares do final de ciclo de crescimento são mais grossas e densas do que a madeira de Primavera. Estas diferenças moleculares são visíveis macroscopicamente através dos anéis de crescimento.

Os traqueídos têm a função de suporte mecânico e condução de seiva. O armazenamento e condução de produtos ou substâncias alimentares e metabólicas são realizados pelas células denominadas de parênquima (ou mais vulgarmente, parênquima lenhoso), sendo que nas Resinosas estas se dispõem principalmente na direcção radial (Carvalho, 1996).

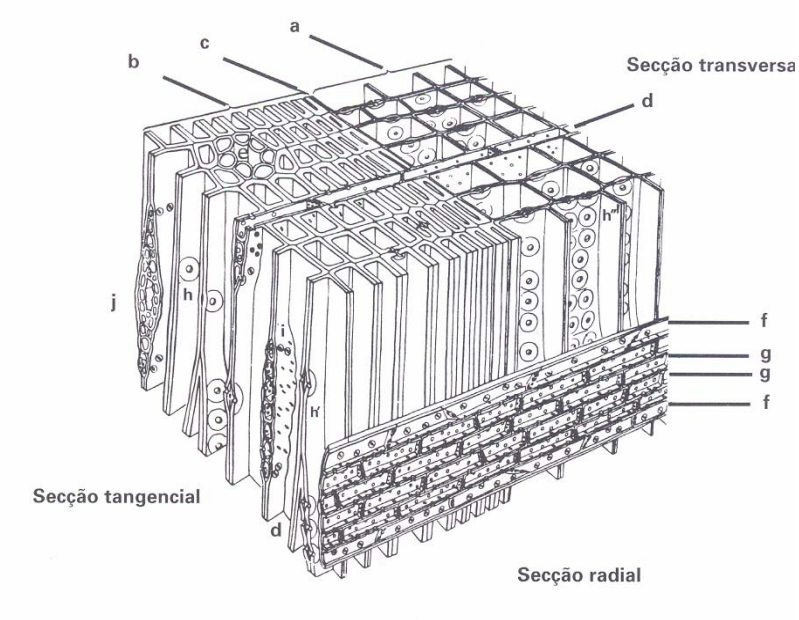


Figura 2.3 - Aspecto microscópico de madeira de resinosas [Carvalho, 1996]:

a – lenho inicial
b – lenho final
c – limite de camadas de crescimento
d – raio lenhoso
e – canal de resina vertical
f – traqueídeos radiais
g – células de parênquima
h – pontuação aureolada
i – pontuação de raio de cruzamento
j – raio lenhoso fusiforme com canal de resina horizontal

As **Folhosas** têm um arranjo fibro-anatómico um pouco mais complexo do que o das Resinosas, sendo formado por três tipos de células: os vasos, o parênquima lenhoso e as fibras. As fibras e os traqueídos formam o tecido básico da madeira das folhosas, existindo canais dispostos de forma concentrada (formando anéis), semi-difusa e difusa; denominados por vasos.

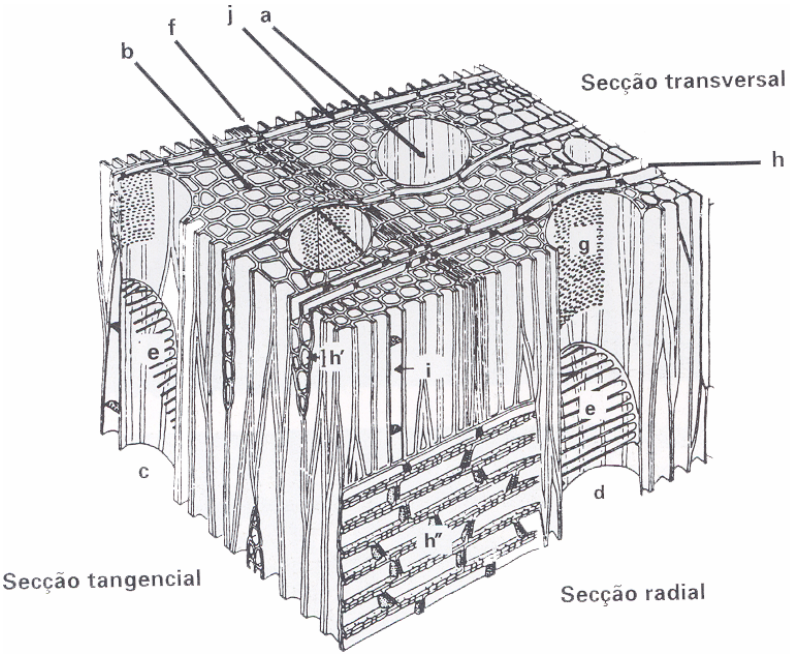


Figura 2.4 - Aspecto microscópico de madeira de folhosas [Carvalho, 1996]:

a – vaso
b – fibra
c – segmento vascular (secção tangencial)
d – segmento vascular (secção radial)
e – perfuração escalariforme
f – limite de camadas de crescimento
g – pontuações radio-vasculares
h – raio lenhoso bisseriado (secção transversal)
h' – raio lenhoso bisseriado (secção tangencial)
h'' – raio lenhoso (secção radial)
i – parênquima axial
j – raio lenhoso unisseriado (secção transversal)

As fibras das folhosas têm paredes de maior espessura e menor diâmetro interior dos que os traqueídos das resinosas. Assumindo como principal função a de suporte mecânico, formam um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente, sendo muito delgadas, com extremos

pontiagudos e fechados. Ao contrário das Resinosas, não é visível uma diferença tão nítida entre as fibras das madeiras de Primavera e Verão, e por isso, os anéis de crescimento não são tão nítidos. As células do parênquima lenhoso são muito mais numerosas e têm raios lenhosos mais desenvolvidos do que os das Resinosas, de igual função e dispostos na direcção radial (ou também na direcção vertical). Os vasos têm a função de transporte de seiva e apresentam dimensões bastante maiores e paredes mais delgadas que as restantes células, visível em corte transversal.

Quimicamente, as células da madeira são constituídas por quatro substâncias:

- **Celulose** ($C_6H_{10}O_5$) – constitui cerca de 40-50% da composição química da madeira (Merino, 1998). Sendo um polímero tridimensional, na forma de largas cadeias unidas por pontes de hidrogénio e ligações químicas do tipo Van der Waals, possui uma elevada resistência mecânica (entre outros esforços, resistente à tracção). Possui valências abertas e atrai quimicamente a água, constituindo-se assim como um material higroscópico, responsável pela mesma característica no material madeira. Não se altera se está seca e apresenta-se com maior densidade do que a água. É também insípida, inodora e de cor branca;

- **Hemicelulose** – constitui cerca de 20 a 30% da composição química da madeira (Merino, 1998). É um polímero tridimensional amorfo, ramificado por diferentes açúcares, de unidade variável. O seu grau de polimerização é bastante mais baixo do que o da celulose. Sendo parte de uma matriz que aglutina a celulose, garante a função de união entre as fibras, sem influenciar a sua dureza e/ou características mecânicas;

- **Lenhina** – constitui, tal como a hemicelulose, cerca de 20 a 30% da composição química da madeira (Merino, 1998). É um polímero tridimensional amorfo composto por unidades de fenil-propano, constituindo uma matriz que, tal como a hemicelulose, aglutina a celulose, contribuindo para a integridade estrutural das fibras. A esta função junta-se igualmente a sua contribuição para a rigidez e resistência da madeira à compressão e ao corte;

- **Outras substâncias** – constituem cerca de 5 a 7% da composição química da madeira, sendo pois componentes de menor expressão na sua composição, conferindo distintas características à madeira do cerne. São exemplos destes componentes as resinas, os taninos, os trementinos, as ceras e substâncias como proteínas e pectinas. (Merino, 1998)

Note-se que a quantidade de cada uma das substâncias não é fixa, variando ligeiramente em função de cada espécie de árvore, mas no entanto, em proporções semelhantes às apresentadas.

Por fim, numa escala ultramicroscópica (figura 2.5), diga-se que a parede celular da madeira é

composta por três membranas diferentes: a parede primária (mais exterior, composta por fibras dispostas de forma aleatória), a parede secundária (a qual, por sua vez, se divide numa sub membrana interior, intermédia e exterior) e a parede intercelular (ou lamela média), que consiste numa lâmina que confina e une as células, sendo composta por uma matriz de alto conteúdo em lenhina e hemicelulose, garantindo à madeira as características de resistência à tracção e compressão, elasticidade e durabilidade (Merino, 1998).

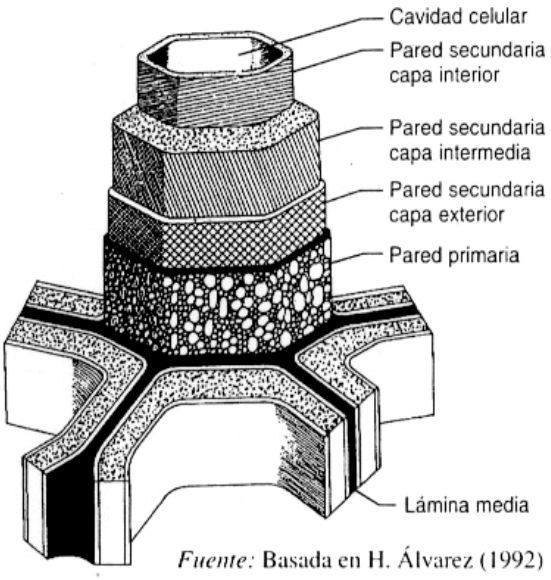


Figura 2.5 – Estrutura das células da madeira (escala ultramicroscópica) [Álvarez, 1992]

2.1.4 Propriedades físicas e mecânicas

Dada a natureza orgânica da madeira, existe uma complexidade de factores que influenciam as suas características físicas e mecânicas e que explicam a sua grande heterogeneidade. Deste modo, e de forma a enquadrar o âmbito deste trabalho, neste sub capítulo apenas se abordam as propriedades da madeira com maior relevância para a sua análise estrutural.

Conforme já foi referido atrás, as propriedades da madeira são bastante variáveis, sendo que apresentam como principais factores condicionantes:

a) Espécie botânica

A espécie botânica é uma condicionante da constituição química e do arranjo morfológico e estrutural dos elementos de madeira, definindo o seu comportamento físico-mecânico;

b) Localização do elemento de madeira no tronco da árvore

A zona do tronco de onde é retirada a peça de madeira influi nas suas características físico-mecânicas, pois a percentagem relativa de borne e cerne varia em função da altura da árvore;

c) Existência de defeitos

O crescimento da árvore e as condições a que esta está sujeita condicionam muito a existência de defeitos na estrutura lenhosa, os quais podem, em determinadas situações, provocar anomalias importantes no seu comportamento físico-mecânico (sendo os defeitos de influência mais relevante os nós e a inclinação do fio). Igualmente, a forma de armazenamento/aplicação das madeiras pode provocar a existência de defeitos, ainda que de menor relevância no comportamento da peça estrutural. Esta questão é abordada com maior profundidade no ponto 2.3.3;

d) Teor em água

O teor em água tem, para determinados intervalos, grande influência nas propriedades da madeira, nomeadamente na sua resistência mecânica.

Esta apresenta valores máximos quando a madeira se encontra seca ou anidra, diminuindo consoante aumenta o conteúdo de humidade, até atingir o mínimo de resistência quando a madeira se encontra totalmente saturada. Para teores em água iguais ou superiores a aproximadamente 30% (ponto de saturação), verifica-se que a resistência se mantém praticamente constante, observando-se um aumento considerável para valores inferiores. Esta relação é aproximadamente linear para teores em água entre 8% e 30%.

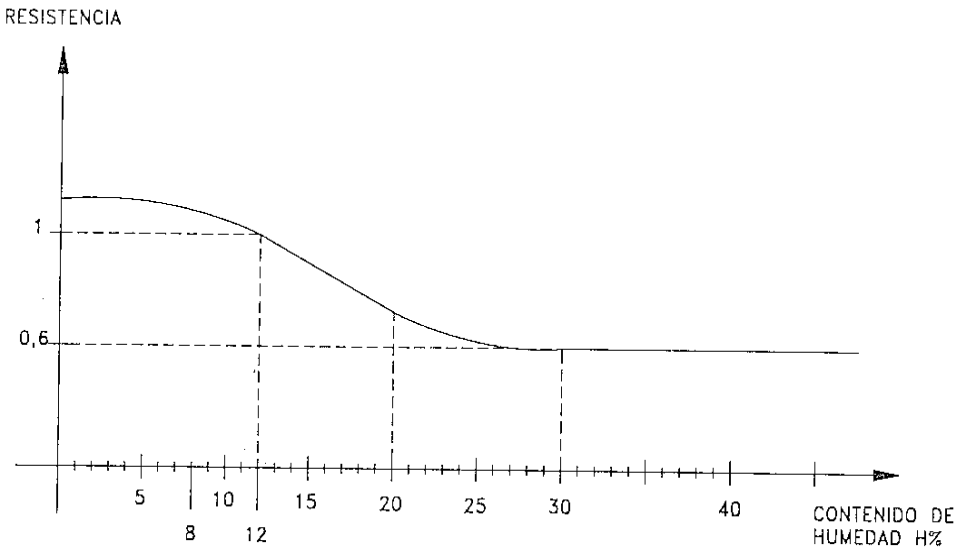


Figura 2.6 - Relação entre a humidade e a resistência mecânica. [Arguelles e Arriaga, 1996]

e) Temperatura

A temperatura tem uma influência bastante mais discreta sobre os parâmetros mecânicos da madeira, não sendo, regra geral, um factor condicionante, uma vez que só para valores extremos de temperatura é que se verifica a sua interferência nos valores de resistência.

Argüeles e Arriaga ("Estructuras de madera", 1996) propõem o seguinte intervalo de influência da temperatura sobre as principais propriedades mecânicas dos elementos estruturais de madeira:

- Para temperaturas inferiores a 0ºC, os valores característicos de resistência à flexão, compressão e impacto são ligeiramente superiores do que os verificados a temperaturas normais, relativamente às que vulgarmente estão em contacto as estruturas de madeira de edifícios;
- Para temperaturas muito elevadas existe uma perda de resistência dos elementos de madeira. No entanto, verificou-se que a resistência não é afectada até aos 37ºC, actuando de forma contínua, podendo, em função da espécie de madeira, alcançar ocasionalmente os 50ºC;
- Acima de 50ºC ocorre uma diminuição de resistência de difícil quantificação.

2.1.4.1 Propriedades físicas

Apresenta-se a análise das propriedades físicas de maior relevância na análise da madeira como material estrutural de construção e que são as seguintes:

- Conteúdo de humidade e higroscopicidade;
- Densidade (massa específica aparente);
- Retractilidade;
- Reacção e resistência ao fogo.

a) Teor em água e higroscopicidade

A água existe na madeira sob três formas diferentes:

- Água de constituição;
- Água de impregnação;
- Água livre.

Antes do seu abate, as árvores transportam os alimentos pelos vasos e traqueídeos através da água livre, que preenche os vazios intercelulares. Esta é rapidamente libertada após o abate, diminuindo drasticamente o teor em água da madeira até atingir o ponto de saturação ao ar,

correspondente a cerca de 30% HR[1]. A água livre altera os valores da massa volúmica da madeira mas não influencia as suas propriedades físicas e mecânicas.

Após libertar a água livre, a madeira pode alterar o seu teor em água, em função da higrometria do ambiente a que está exposta, ou seja, do conteúdo de vapor de água e da temperatura do ar com que contacta (figura 2.7). Este fenómeno chama-se higroscopicidade [2] e provoca alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, tanto maiores quanto menor for o seu conteúdo de água (ainda que diminua a sua tenacidade e resistência ao choque – Capuz, 2003). A água neste estado, denominada de água de impregnação, preenche os vazios das paredes celulares e é responsável por alterações volumétricas na madeira.

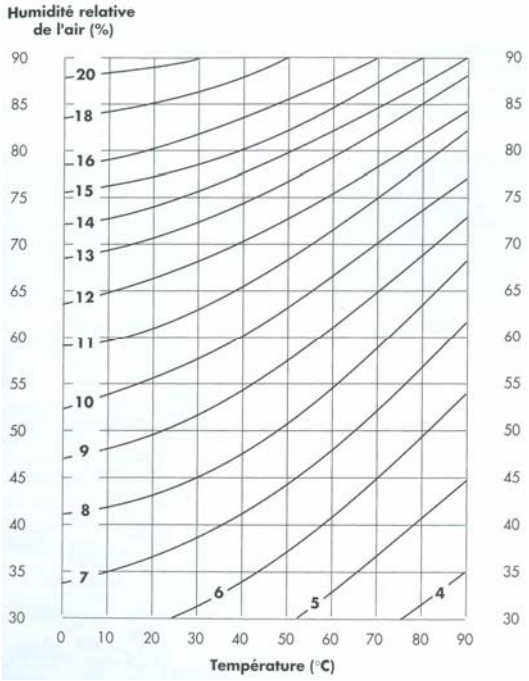


Figura 2.7 – Gráfico de curvas de equilíbrio higroscópico [Benoit, 1997].

A água de constituição existe combinada com os constituintes do material lenhoso, só podendo ser eliminada quando a estrutura molecular da madeira é destruída.

[1] Define-se teor em água da madeira, como a percentagem, em peso, da água retida em comparação com madeira seca ou anidra (Capuz, 2003). É quantificável pela seguinte expressão, sendo Po o peso residual resultante de um processo de secagem em estufa a 103 ± 2ºC, e Ph o peso do provete húmido:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o}.100 \quad [2.1]$$

[2] Define-se higroscopicidade como um parâmetro que caracteriza a capacidade de determinado material para fixar água por adsorção e de a restituir ao ambiente em que se encontra, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água do ambiente que o envolve (Freitas, 1998).

A madeira a aplicar com fins construtivos deverá ter um teor em água o mais próximo possível da humidade de equilíbrio higroscópico correspondente às condições higrotérmicas de serviço, de forma a evitar alterações volumétricas causadoras de anomalias de diversos tipos.

Estabeleceu-se o valor de 12% de humidade relativa como a medida internacional de referência para a realização de ensaios para apurar as propriedades físicas que dela dependam, sendo necessário efectuar correcções matemáticas quando tal não sucede.

Por fim diga-se que, em função do seu teor em água, é vulgar caracterizar as madeiras da seguinte forma (Sardinha, 1988):

- *Madeira verde* – apresenta um teor em água acima do ponto de saturação ao ar, mas normalmente superior a 30% (ponto de saturação);
- *Madeira semi-seca* – teor em água inferior ao ponto de saturação, mas superior a 23%;
- *Madeira seca* – teor em água compreendido entre 18% a 23%;
- *Madeira seca ao ar* – teor em água entre 13% e 18%;
- *Madeira dessecada* – teor em água oscilando entre 0% e 13%;
- *Madeira completamente seca ou anidra* – teor em água = 0%.

b) Densidade

A densidade ou massa volúmica é uma medida do peso da madeira por unidade de volume. Na área das madeiras, a densidade é considerada normalmente em termos de massa específica aparente, ou seja, considerando um volume aparente, em que não é deduzido o volume compreendido pelos poros. Assim, é um parâmetro que varia em função do teor em água da madeira, o qual influencia não só o seu peso, como também, o seu volume. É traduzida pela seguinte expressão:

$$Dh = \frac{Ph}{Vh}(g/cm^3) \qquad [2.2]$$

em que, P_h – peso do provete de madeira para o teor em água h

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

Dado ser dependente do valor teor em água da peça de madeira, o valor da densidade dado pela expressão anterior deverá ser corrigido para o teor em água normal de 12%, vulgarmente denominado de **humidade padrão**.

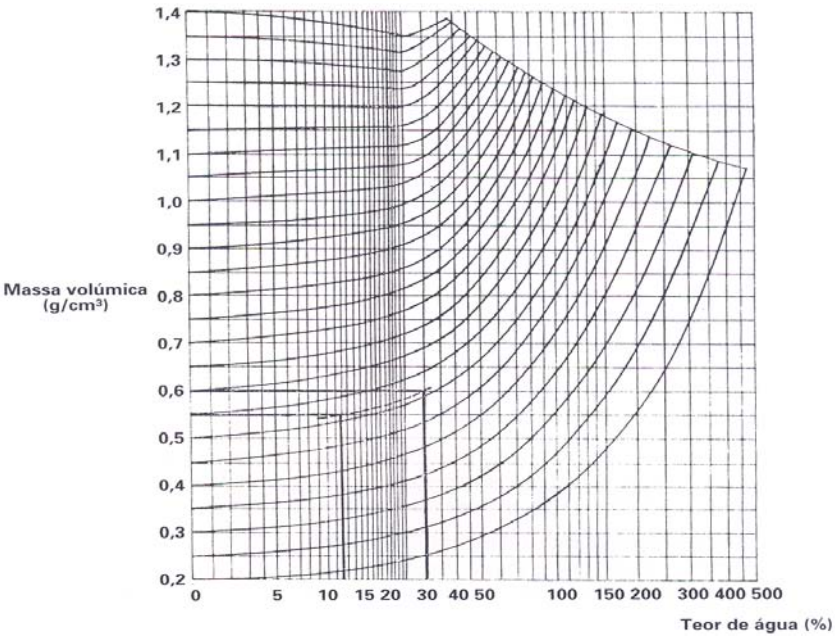


Figura 2.8 – Diagrama de Kollmann (humidade-peso específico) [Carvalho, 1996].

Sendo uma medida da concentração de substância por unidade de volume, a densidade da madeira está, logicamente, relacionada com a sua resistência mecânica. No entanto, esta relação não é directa, ou seja, não é possível estabelecer uma correlação perfeita entre os dois parâmetros, devido à grande heterogeneidade e diversidade morfológica de espécies.

Constata-se que, nas Resinosas, as madeiras com anéis de crescimento anuais muito espessos (rápido crescimento) são mais leves do que as de anéis mais estreitos (lento crescimento), contrariamente ao que acontece nas Folhosas, em que as madeiras de rápido crescimento (anel largo) são mais pesadas do que as de lento crescimento (anel estreito) (Sardinha, 1988).

Por fim, refira-se que as madeiras apresentam um valor de densidade relativamente baixo, comparando com a sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, o que lhe confere grandes potencialidades para o uso estrutural, dado o seu baixo peso, quando confrontada com outros materiais de iguais características de resistência mecânica (Capuz, 2003).

c) Retractilidade

Conforme já foi referido, quando a madeira alterna o seu teor em água entre o estado saturado e o anidro, de forma a manter um equilíbrio higroscópico com o meio, preenche/liberta os vazios das suas paredes celulares, o que resulta na alteração das suas dimensões.

No estudo desta propriedade interessa analisar a **retractilidade volumétrica** e a **retractilidade linear**.

A retractilidade volumétrica traduz a variação volumétrica da peça de madeira, para determinado teor em água, e pode ser quantificada *pelo índice de contracção volumétrica parcial*:

$$C_h = \frac{V_h - V_0}{V_0}.100 \quad [\%] \qquad [2.3]$$

em que, C_h – índice de contracção volumétrica parcial para o teor em água h
V_h – volume do provete para o teor em água h
V_o – volume do provete no estado anidro

O Índice de contracção volumétrica parcial varia de 0 (estado anidro) a 30% (estado verde).

A retractilidade linear é um conceito análogo ao anterior, sendo que considera a variação das dimensões nas 3 orientações espaciais: radial, tangencial e axial. A expressão [2.4] quantifica as contracções lineares das peças de madeira, para uma determinada humidade h:

$$C = \frac{L_h - L_0}{L_0}.100 \quad [\%] \qquad [2.4]$$

em que, C – retractilidade linear parcial
L_h – dimensão do provete para o teor de humidade h
L_o – dimensão do provete no estado anidro

Como material anisotrópico, a variação dimensional da madeira é diferente em função do sentido considerado, verificando-se de forma genérica, os seguintes valores (Capuz, 2003):

Variação dimensional na direcção axial	0,1 %
Variação dimensional na direcção radial	6 %
Variação dimensional na direcção tangencial	9 a 18 %

Note-se que estes valores são apenas uma referência de análise, uma vez que a espécie de madeira influencia igualmente a sua variabilidade dimensional, ainda que dentro da ordem de grandeza apresentada.

Este comportamento anisotrópico é explicado pela existência de dois estratos diferentes de células, em cada anel de crescimento: o lenho inicial e o lenho tardio. Este último, sendo constituído por

paredes celulares muito mais espessas, apresenta movimentos de expansão/contracção muito superiores aos do lenho inicial (Carvalho, 1996).

A existência de diferenças físicas e mecânicas, que resultam na anisotrópica variação dimensional, provocam igualmente a existência de tensões internas diferenciadas, que durante o processo de secagem podem estar na origem, por sua vez, da ocorrência de defeitos como empenos, rachas e fendas. Este último defeito pode ter uma influência importante na resistência mecânica das peças estruturais, sobretudo se existe inclinação de fio. Verifica-se assim que o modo como é cortada a peça de madeira condiciona a manifestação de alguns defeitos.

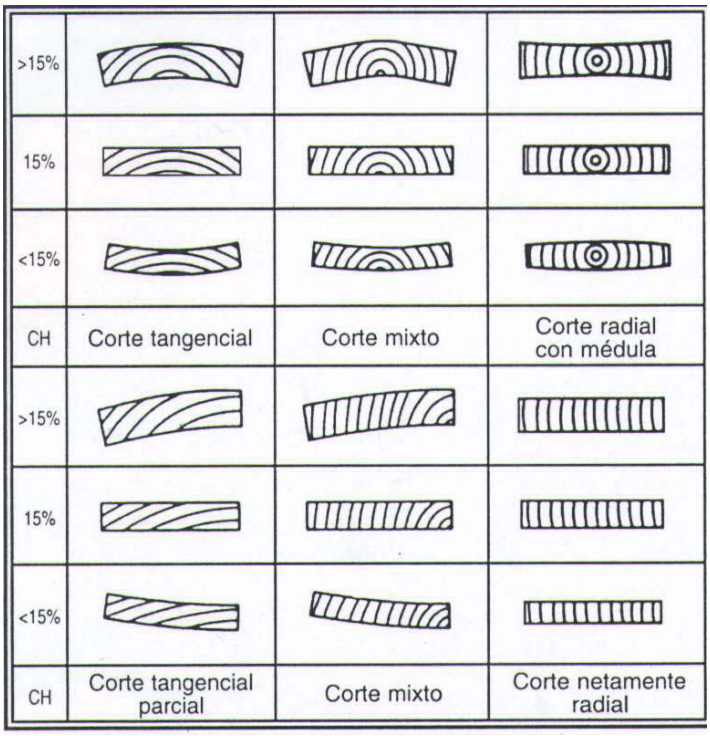


Figura 2.9: Efeitos da deformação por contracção, em função do tipo de corte. Fonte: G. Medina AITIM (Vignote e Jiménez, 1996)

d) Reacção 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. A combustão pode definir-se como um processo químico de reacção rápida e exotérmica, iniciado por uma ignição, a chama, entre um combustível, a madeira, e um comburente, o oxigénio

A madeira apresenta-se como um material cuja **reacção ao fogo** não é muito boa, ainda que a sua resistência perante este elemento seja bastante melhor.

Para madeiras normais, a combustão dá-se para temperaturas da superfície na ordem dos 300ºC, quando existe a presença de chama, ou superiores a 400ºC, quando tal não sucede (Arriaga, 2002). Até se dar a combustão, o processo é endotérmico, sendo que nesta fase a madeira utiliza a energia absorvida para libertar a água que contém. A partir desta temperatura, o processo passa a ser exotérmico, sendo visível o desprendimento de gases e de calor.

A madeira é normalmente classificada como pertencente à classe M3 ou M4, no que respeita à reacção ao fogo, de acordo com a especificação LNEC E326.

Em relação à **resistência ao fogo**[3], a madeira apresenta um bom comportamento, situação aparentemente contraditória e que não é do conhecimento comum de vários agentes da construção. A verdade é que uma estrutura de madeira tem melhor comportamento, quando exposta ao fogo, do que estruturas equivalentes em betão ou aço (ainda que as estruturas de madeira encontrem nas suas uniões, pontos de debilidade). Tal deve-se ao facto de que ainda que a temperatura ultrapasse largamente o nível de 280ºC, não sofre uma rotura súbita, pois mesmo num incêndio em que se atinjam 1000ºC, ela conserva durante algum tempo uma boa resistência mecânica (devido ao efeito isolante das camadas externas carbonizadas), ao contrário do que se verifica numa peça metálica, cuja resistência diminui drasticamente quando se atingem temperaturas da ordem dos 300ºC, em virtude da total alteração das suas propriedades físico-mecânicas (plastificação).

Para tal contribui a forma de combustão das madeiras, sendo que inicialmente a sua superfície exterior entra facilmente em combustão, mas logo cria uma capa carbonizada que é 6 vezes mais isolante que a própria madeira, atrasando o processo e permitindo que a madeira no interior da peça não seja afectada pela acção do fogo (Arriaga, 2002).

Verifica-se, pois, que o fogo degrada o material madeira, não pela diminuição das propriedades mecânicas devido à acção da temperatura (como para materiais como o aço), mas sim, por esta mesma diminuição devido à perda de secção da peça estrutural.

A densidade interfere na reacção da madeira ao fogo, verificando-se que quanto maior é esta, menor é a facilidade e velocidade de combustão. O teor em água da madeira influencia também este processo, atrasando-o, não sendo porém de grande relevância em estruturas em serviço, pois o teor em água é, nesses casos, normalmente, baixo.

[3] **Resistência ao fogo** pode ser definida como o período de tempo durante o qual a madeira mantém intactas as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, quando exposta a uma fonte calor.

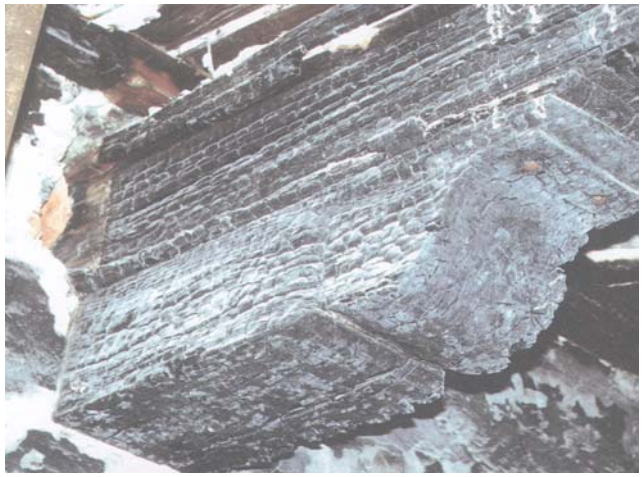


Figura 2.10: Cachorro de madeira após incêndio, com a superfície exterior completamente carbonizada [Tampone, 2005]

2.1.4.2 Propriedades mecânicas

O estudo do comportamento mecânico da madeira implica o conhecimento da sua estrutura anatómica, dada a natureza orgânica, higroscópica, anisotrópica e heterogénea que a caracteriza. A concentração e arranjo dos diferentes constituintes do tecido celular são os elementos definidores das propriedades mecânicas da madeira, com contributos diferentes para a sua resistência. Desta forma, torna-se indispensável o seu conhecimento para uma correcta avaliação da sua capacidade resistente e dimensionamento estrutural.

A estrutura fibro-anatómica da madeira caracteriza-se por um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente e implantadas numa matriz amorfa de hemicelulose e lenhina, sendo que cada um destes elementos contribui de forma própria para a resistência mecânica (ver ponto 2.1.3).

Deste modo, percebe-se que não é correcto falar de resistência mecânica global de um elemento estrutural de madeira, mas sim, do seu comportamento perante determinado tipo de solicitação, nomeadamente, da sua grandeza, duração e direcção. Este último, é mesmo um factor preponderante, pois verificam-se grandes diferenças de valores de resistência para solicitações no sentido paralelo e perpendicular às fibras (por exemplo, para o Pinho bravo, a resistência à tracção no sentido paralelo às fibras é cerca de 50 vezes superior à mesma resistência no sentido perpendicular).

De facto, as árvores desenvolvem o tronco de forma a resistir às solicitações a que estão sujeitas durante o seu crescimento, como a acção do vento (esforço de flexão) e as acções gravíticas (esforço de compressão), orientando a sua estrutura fibro-anatómica neste sentido.

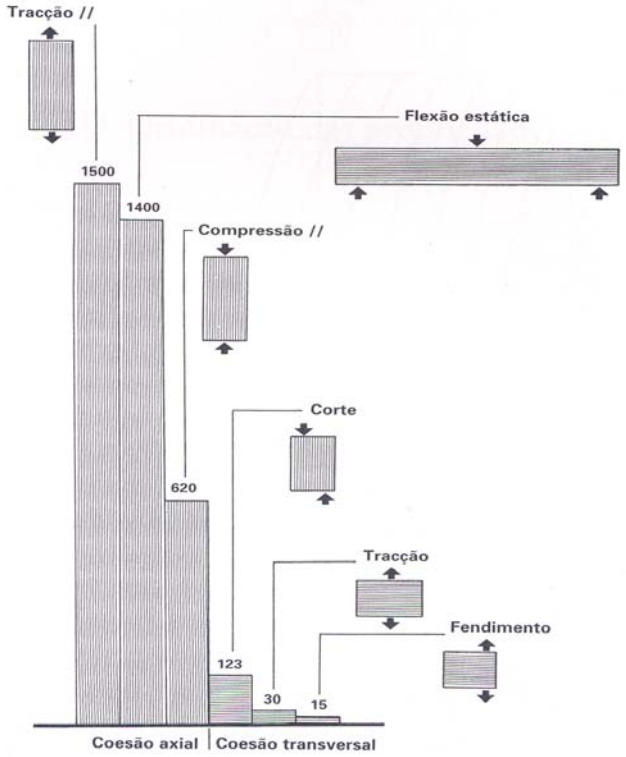


Figura 2.11: Diagrama de valores de resistência global da madeira, em função do esforço instalado. [Carvalho, 1996]

A caracterização mecânica da madeira implica pois o seu estudo em duas direcções principais, traduzidas em termos de **coesão axial** (que se reporta a tensões dispostas no sentido paralelo às fibras, como a compressão paralela, tracção paralela, flexão estática e dinâmica) e **coesão transversal** (que se reporta a tensões dispostas no sentido perpendicular às fibras, como a compressão perpendicular, tracção perpendicular, torção, cisalhamento, corte e fendimento).

Seguidamente apresenta-se uma análise resumida das principais propriedades mecânicas da madeira, ou seja:

- Resistência à tracção paralela às fibras ou axial;
- Resistência à compressão paralela às fibras ou axial;
- Resistência à flexão estática;
- Resistência à tracção perpendicular às fibras;
- Resistência ao fendimento;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras;
- Resistência ao corte ou escorregamento;
- Outras propriedades – dureza, fluência, resistência a cargas alternadas e resistência a cargas de longa duração.

a) Resistência à tracção paralela às fibras ou axial

Dada a natureza da estrutura fibro-anatómica da madeira, verifica-se que a sua resistência à tracção no sentido paralelo às fibras ou axial é bastante elevada, quando comparada com a resistência a outros esforços, nomeadamente à compressão axial. Segundo Sardinha, a resistência à tracção axial pode ser até 3 vezes superior à resistência à compressão axial, para peças livres de defeitos (Sardinha, 1988).

Este facto deve-se a que a solicitação de tracção, no sentido axial, provoca a aproximação das fibras, contribuindo para o aumento da coesão e aderência da peça de madeira. Deste modo, é compreensível que, normalmente, os elementos não sofram rotura pela acção isolada deste esforço, quer no estado de árvore, quer aplicada em estruturas correntes.

Por vezes, pode suceder que elementos estruturais sujeitos a esforços de tracção apresentem valores de rotura inferiores ao referido, sendo que nestes casos estão normalmente associados a outros tipos de solicitações. Refira-se, como exemplo desta situação, os esforços secundários instalados devido à interrupção das fibras nas zonas de ligações entre elementos estruturais, produzindo-se esforços de compressão e cisalhamento, entre outros.

b) Resistência à compressão paralela às fibras ou axial

Conforme já referido, as madeiras apresentam um valor de resistência à compressão axial menor do que para esforços de tracção, na ordem dos 40% do primeiro, para o Pinho bravo (figura 2.11), relação que se observa de forma semelhante para as restantes espécies.

A solicitação de compressão no sentido axial provoca a separação das fibras longitudinais, diminuindo assim a coesão do elemento estrutural, e consequentemente, a sua resistência global.

As normas portuguesas (NP 618) definem a tensão de rotura por compressão paralela às fibras ou axial (σ_{CH}), para um teor de humidade a H%, através da seguinte expressão:

$$\sigma_{CH} = \frac{F}{b.h} \qquad [2.5]$$

em que,

F – Força de rotura (Kgf)
b, h – dimensões transversais da peça de madeira (mm)

O valor obtido por esta expressão deverá ser corrigido para o valor do teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{C12} = \sigma_{CH}.[1 + K_1.(H - 12)] \qquad [2.6]$$

em que K_1 é um coeficiente calculado experimentalmente, sendo que se considera normalmente o valor de 0,05.

A resistência dos elementos estruturais de madeira à compressão axial está intrinsecamente ligada aos seguintes factores:

- **Teor em água** – atinge-se o valor máximo de resistência à compressão quando a madeira está sob o estado anidro, e mínimo, quando supera o ponto de saturação de 30% de humidade;
- **Massa volúmica** – quanto maior for esta grandeza, maior será o valor de resistência à compressão axial;
- **Defeitos** – pouca influência nos valores obtidos para esta grandeza.

c) Resistência à flexão estática

A madeira é um material que possui elevada resistência à flexão estática, atingindo valores próximos dos verificados para a sua resistência à tracção paralela às fibras. Por exemplo, para o Pinho bravo verifica-se que a resistência à flexão estática é da ordem dos 140 MPa (peças perfeitas), ou seja, cerca de 90% do valor da tracção axial.

A tensão de rotura por flexão estática (σ_{fH}), para a humidade H%, é dada pela seguinte expressão de MONNIN (Carvalho, 1996):

$$\sigma_{fH} = \frac{3.F.l}{2.b.h^{10/6}} \qquad [2.7]$$

em que,

F – Força de rotura (Kgf)
b, h – dimensões transversais da peça de madeira (mm)
l – vão da peça

O valor de σ_{fH} deverá ser corrigido para o teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{f12} = \sigma_{f12}.[1 + K_2.(H - 12)] \qquad [2.8]$$

em que K_2 é um coeficiente calculado experimentalmente, sendo que se considera normalmente o valor de 0,04.

A influência do teor em água, da massa volúmica e dos defeitos é em todo semelhante à referida para elementos estruturais sujeitos à compressão paralela às fibras.

O **módulo de elasticidade à flexão estática** na direcção do fio é uma propriedade muito importante na análise estrutural, constituindo-se como um indicador ou medida da flexibilidade ou rigidez de um material.

Define-se um material frágil, como um material cuja rotura se dá quando se atinge o limite de proporcionalidade, sem se verificar a ocorrência prévia de deformações que indiciem essa situação. Nos casos em que tal não sucede, considera-se que os materiais têm comportamento flexível.

Esta informação é bastante importante para o cálculo de estruturas, dada a correlação alta existente entre o valor do módulo de elasticidade à flexão estática e a tensão instalada no elemento solicitado, e entre a massa volúmica e a resistência mecânica da madeira submetida a esforços axiais.

O **módulo de elasticidade à flexão dinâmica** constitui-se como uma propriedade que tem por base a determinação da resistência dos elementos estruturais, quando sujeitos a esforços resultantes de uma solicitação dinâmica, no sentido de apurar a resiliência da peça. O coeficiente de resiliência obtido através dos ensaios de flexão dinâmica relaciona-se com a massa volúmica da peça ensaiada, constituindo-se a denominada cota dinâmica.

d) Resistência à tracção perpendicular às fibras

A madeira é caracterizada por possuir uma estrutura fibro-anatómica complexa, a qual lhe confere características mecânicas bastante diferentes, em função da direcção da solicitação. Conforme já foi referido, verifica-se que as fibras se dispõem preferencialmente no sentido longitudinal do tronco da árvore, sendo que no sentido transversal estas são escassas. Este facto condiciona bastante a resistência do elemento estrutural de madeira nesta direcção, devido à falta de travação entre as fibras longitudinais e a debilidade das ligações intercelulares transversais.

Para o Pinho bravo, verifica-se que a resistência à tracção no sentido perpendicular às fibras atinge valores muito baixos, na ordem dos 3,0 MPa (peças perfeitas), sendo que o mesmo esforço na direcção longitudinal é cerca de 50 vezes superior (figura 2.11).

A resistência à tracção normal não se relaciona com a massa volúmica, dado que esta não condiciona a aderência entre as fibras da peça de madeira (Sardinha, 1998).

De acordo com o definido na norma NP-621, a tensão de rotura à tracção perpendicular às fibras (σ_{tH}), para o teor em água h, é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{tH} = \frac{F}{a.b} \qquad [2.9]$$

em que,

F – Força de rotura (Kgf)
a – dimensão longitudinal da peça de madeira (mm)
b – dimensão transversal da peça de madeira (mm)

O valor de σ_{tH} deverá ser corrigido para o teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{t12} = \sigma_{th}.[1 + K_3.(H - 12)] \qquad [2.10]$$

em que K_3 é um coeficiente calculado experimentalmente, sendo que se considera normalmente o valor de 0,015.

e) Resistência ao fendimento

O fendimento é uma propriedade que pretende traduzir a coesão ou resistência da madeira ao descolamento entre as fibras, provocado por uma esforço de tracção transversal em apenas uma das superfícies.

Desta forma, o parâmetro definido pelos ensaios normalizados, a força unitária de fendimento, é expresso em função da largura do provete (Kgf/cm), e traduzido pela seguinte expressão, para o teor em água h:

$$F'_h = \frac{F}{b} \qquad [2.11]$$

em que,

F – Força de rotura (Kgf)
b – dimensão transversal da peça de madeira (mm)

O valor de F'_h deverá ser corrigido para o teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$F'_{12} = F'_H.[1 + K_4.(h - 12)] \qquad [2.12]$$

em que K_4 é um coeficiente calculado experimentalmente, considerando-se normalmente o valor de 0,015.

f) Resistência à compressão perpendicular às fibras

A resistência à compressão, no sentido perpendicular às fibras, pode ser traduzida pela sua resistência ao esmagamento, sendo função da massa volúmica do material.

Verifica-se que a resistência à compressão no sentido perpendicular às fibras é bastante inferior a igual solicitação, no sentido paralelo, na ordem aproximada de 20% (Carvalho, 1996) a 25% (Capuz, 2003).

g) Resistência ao corte ou escorregamento

A resistência ao corte ou escorregamento pode ser quantificado pela acção de 3 tipos de tensões, em função da orientação do fio da madeira:

- Tensões tangenciais, normais às fibras;
- Tensões tangenciais, paralelas às fibras;
- Tensões tangenciais, oblíquas às fibras.

Verifica-se que a resistência dos elementos de madeira é mínima no caso de tensões tangenciais paralelas às fibras, as quais provocam o seu deslizamento ou escorregamento. Deste modo, os ensaios de avaliação de resistência ao corte são, regra geral, realizados para esta situação, dado que retrata o cenário mais desfavorável de comportamento estrutural da madeira.

Para o Pinho bravo, verifica-se que a resistência ao corte ou escorregamento é da ordem dos 12,0 MPa (Carvalho, 1996). A resistência ao corte é bastante influenciada pela existência de defeitos, como fendas e fissuras (Sardinha, 1988).

A tensão de rotura por corte longitudinal (τ_h), para a humidade h, é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_h = \frac{F}{a.b} \qquad [2.13]$$

em que,

F – Força de rotura (Kgf)
a – dimensão longitudinal da peça de madeira (mm)
b – dimensão transversal da peça de madeira (mm)

O valor de τ_h deverá ser corrigido para o teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$\tau_{12} = \tau_h.[1 + K_5.(H - 12)] \qquad [2.14]$$

em que K_5 é um coeficiente calculado experimentalmente, sendo que se considera normalmente o valor de 0,05.

h) Outras propriedades mecânicas

h.1) Dureza

A dureza é uma característica mecânica que traduz a resistência do material no que concerne à sua penetração, riscagem e desgaste.

A dureza é um parâmetro com interesse em apurar, dado que se relaciona com a densidade e "trabalhabilidade" da madeira, e porque permite realizar uma selecção adequada da espécie de madeira em função do fim a que se destina (por exemplo, madeiras a aplicar em pavimentos deverão ter um índice de desgaste superficial baixo e logo uma dureza elevada).

As madeiras são normalmente designadas, em termos de dureza, como brandas, medianamente duras e duras.

São conhecidos dois métodos laboratoriais para a avaliação rigorosa da dureza de elementos em madeira, o método de Chalais-Meudon e o método de Janka (Carvalho, 1996). Existem também aparelhos para determinação por metodologias não destrutivas *in situ* das propriedades de dureza superficial de elementos de madeira, sendo o aparelho mais difundido no mercado designado como *Pylodin*. Este tipo de metodologias não destrutivas é bastante útil, pois permite a avaliação da dureza com uma precisão adequada, sem o envolvimento de grandes meios e equipamentos de ensaio.

h.2) Resistência à fadiga

Define-se resistência à fadiga ou a cargas alternadas, como a capacidade que um elemento estrutural tem em se deformar sem atingir a rotura, quando sujeito a esforços alternados de compressão e tracção.

Albino Carvalho apresenta um conjunto de considerações baseadas em dados experimentais, as quais se expõem:

- O quociente entre a resistência à fadiga e a resistência à flexão estática é, em média, da ordem de um terço;

- A cota de fadiga (quociente entre a resistência à fadiga e a densidade) da madeira é da

ordem de 6 a 7, enquanto que para o alumínio é de 5 e de 2 a 3, para alguns aços especiais;

- O teor em água tem grande influência no valor da resistência à fadiga, sendo que para cada diminuição de 1% do seu valor, se verifica uma redução de cerca de 3 a 4% do valor da resistência à fadiga.

h.3) Resistência a cargas de longa duração

A resistência a cargas de longa duração ou fluência corresponde à deformação ou perda de resistência de um elemento estrutural, quando sujeito a cargas prolongadas superiores ao limite de elasticidade do material.

Nestas condições, a madeira passa a deformar-se em regime plástico, atingindo a rotura para valores de tensão mais baixos do que os indicados pelos ensaios de carga de curta duração. Capuz Lladró aponta que as resistências obtidas nestas condições são da ordem de 60% das obtidas em ensaios de curta duração (5 ± 2 minutos).

O teor em água da madeira tem grande influência no coeficiente de fluência (quociente entre a deformação por fluência e deformação instantânea), sendo que para madeiras com maiores teores em água ou sujeitas a ciclos de humidificação/secagem, o seu valor é bastante superior.

Deste modo, a prevenção ou diminuição do impacto da fluência na resistência global de elementos estruturais de madeira pode ser garantida, se forem tomadas uma série de medidas previamente à sua aplicação:

- Garantir que o elemento estrutural não está sujeito a grandes variações térmicas e higrométricas;
- Aplicação dos elementos estruturais devidamente estabilizados, em termos de percentagem de humidade;
- Sobrestimar as cargas actuantes sobre a estrutura ou subestimar o valor do módulo de elasticidade, para efeitos de dimensionamento, de forma a impedir que o elemento estrutural entre em regime plástico;
- Emprego de contra-flechas.

2.2 Patologias dos elementos estruturais de madeira

2.2.1 Patologias de carácter biótico

O ataque biótico é uma das degradações mais comuns e que danos mais graves produz nas estruturas de madeira. Sendo um material bastante susceptível ao ataque biótico, existem inúmeros agentes de degradação que alteram as suas propriedades, quer se trate de uma árvore viva, quer de madeira serrada para construção.

Este capítulo pretende expor a forma como as diversas patologias bióticas influenciam as propriedades mecânicas da madeira. Pretende-se assim fornecer informação base fundamental para que a selecção da técnica de inspecção a aplicar, e a respectiva análise de resultados, seja sensível e consciente da acção de degradação mecânica que os agentes bióticos podem ter sobre as estruturas de madeira, permitindo uma mais correcta aplicação destas metodologias.

Para tal, apresenta-se um enquadramento breve dos principais agentes de degradação biótica. São apenas abordados os agentes de incidência mais comuns nas estruturas de madeira aplicada em edifícios, excluindo-se, por exemplo, agentes de deterioração associados a meios marinhos, entre outros.

Os agentes mais representativos do ataque biótico em estruturas de madeira em edifícios são os **fungos xilófagos,** os **insectos de ciclo larvar** e os **insectos sociais**. Apresenta-se, em seguida, uma breve abordagem às principais características de cada um destes agentes.

a) Fungos Xilófagos

Os fungos são vegetais inferiores de constituição morfológica muito primitiva, que pelo facto de não possuírem clorofila, se alimentam de constituintes orgânicos já existentes, pois não são capazes de sintetizar os nutrientes indispensáveis para a sua alimentação. Deste modo, tanto podem viver de forma saprófita, ou seja, alimentando-se de elementos mortos, como de forma parasitária.

O seu corpo vegetativo é constituído por filamentos microscópicos (de cerca de 2μm de espessura) (Merino, 1998), as *hifas*, que se entrelaçam, formando um tecido denominado de *micélio*, o qual, em determinadas condições, se transforma em corpo de frutificação ou reprodutor. As hifas têm a função de segregar e libertar as enzimas que degradarão a estrutura celular da madeira, e posteriormente recolher o alimento resultante. Do corpo de frutificação são lançados milhões de

esporos que, transportados pelo vento ou animais para outras zonas, se depositam e permanecem inactivos até se reunirem as condições propícias ao seu desenvolvimento.

O desenvolvimento e degradação dos fungos xilófagos pressupõe a presença de determinadas condições de temperatura e, principalmente, de humidade, caso contrário os esporos permanecem inactivos na madeira. As condições óptimas de humidade para o seu desenvolvimento nas estruturas de madeira corresponde a um conteúdo entre 35 a 50%, sendo que a partir de 18% a 20% poderão já encontrar condições mínimas para a sua actividade e sobrevivência (Arriaga, 2002).

Ainda que a humidade seja a premissa mais condicionante, a temperatura também influencia o desenvolvimento dos fungos xilófagos, sendo o valor óptimo para a sua actividade entre 23 e 30ºC, mínimo entre 3 a 5ºC e máximo entre 40 a 43ºC, morrendo a maioria dos fungos quando expostos a temperaturas superiores a 50ºC (Merino, 1998).

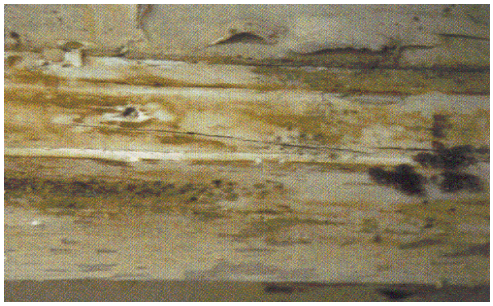
Em função do tipo de degradação que produzem, os fungos xilófagos são divididos em dois grupos: os **fungos cromogéneos** e **bolores** e os **fungos de podridão**.

a.1) Fungos cromogéneos e bolores

Os fungos cromogéneos e os bolores atacam superficialmente a madeira, alimentando-se das substâncias de reserva, que encontram nas células superficiais e matéria orgânica depositada (bolores) ou nas células do borne dos troncos (fungos cromogéneos). O seu ataque não se traduz em alterações das propriedades mecânicas da madeira, pois não afecta as paredes celulares, mas sim no ligeiro aumento da sua permeabilidade e em colorações da superfície atacada. Por este facto, os fungos cromogéneos e os bolores não são considerados como organismos xilófagos, propriamente ditos.

Os bolores apenas são detectados quando se forma o seu corpo de frutificação, alterando a superfície da madeira, que fica com um aspecto esponjoso de coloração que vai desde o branco ao negro. Uma vez que apenas alteram a superfície da madeira, são facilmente removidos por limpezas superficiais.

A acção dos fungos cromogéneos é caracterizada pelo aparecimento de colorações na madeira, das quais a mais característica é o azulado (podendo converter-se praticamente em negro quando se encontra num estado avançado de degradação). Ao contrário dos bolores, a sua acção não é apenas superficial, e a coloração que produz não é removível com uma simples limpeza superficial.



Figuras 2.12 e 2.13 – À esquerda, degradação provocada por bolores. À direita, degradação provocada por fungos cromogéneos [Arriaga, 2002]

Por fim, apesar de possuírem uma acção de degradação mecânica mínima, os fungos cromogéneos e os bolores potenciam o desenvolvimento dos fungos de podridão nos elementos de madeira, nomeadamente aumentando a sua higroscopicidade. Desta forma, constituem um útil indício do risco potencial de um ataque biológico futuro mais danoso.

a.2) Fungos de podridão

Encontrando condições adequadas para o seu desenvolvimento, os fungos de podridão podem causar danos graves nos elementos de madeira, pois através das enzimas que segregam, são capazes de destruir totalmente as paredes celulares, de onde retiram o seu alimento: a celulose, a hemicelulose e a lenhina. São pois organismos xilófagos propriamente ditos, ao contrário dos fungos cromogéneos e os bolores.

A sua actividade, vulgarmente designada de podridão, resulta na perda das propriedades mecânicas da madeira, nomeadamente da sua densidade e resistência estática e dinâmica. A madeira atacada por fungos de podridão torna-se bastante higroscópica e a sua coloração é alterada, em função do tipo de podridão presente.

Existem várias classificações relativamente ao tipo de podridão existente, sendo que vulgarmente se consideram três tipos distintos, em função da cor e aspecto que apresenta a madeira atacada (Arriaga, 2002):

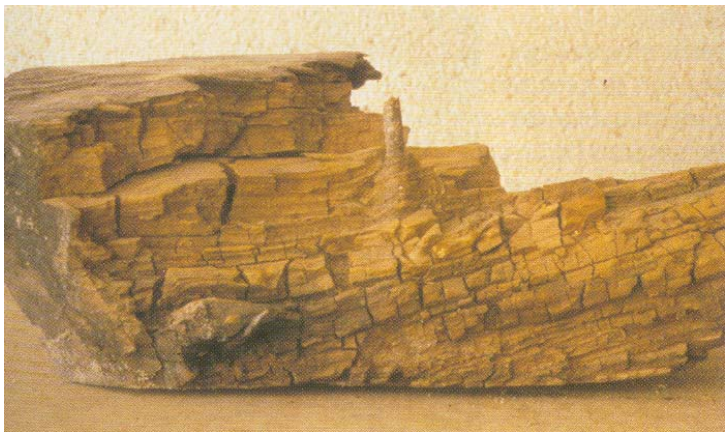
- Podridão parda ou cúbica;
- Podridão branca ou fibrosa;
- Podridão branda.

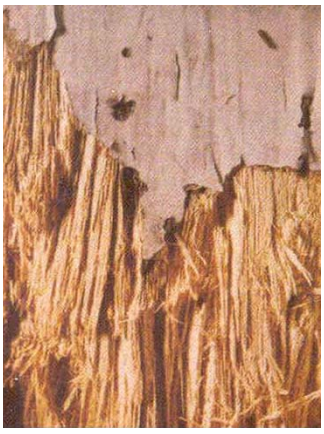
A **podridão parda ou cúbica** é realizada por fungos superiores (classe *Basidiomicetos*), os quais se alimentam preferencialmente da celulose e hemicelulose das paredes celulares, decompostas por um processo de hidrólise (Merino, 1998). A matéria remanescente é constituída principalmente por lenhina e adquire uma coloração escura. Após secagem, devido

às alterações de volume, as zonas atacadas formam um estrato de fissuração cúbica que se desagrega muito facilmente por contacto mecânico, desfazendo-se em pó. Sendo característica de zonas húmidas e mal ventiladas dos edifícios, de que são exemplo as entregas dos elementos estruturais do pavimento e cobertura nas paredes, em alguns casos especiais pode encontrar-se este tipo de ataque em elementos secos. Este tipo de podridão é denominada de podridão parda seca e acontece quando os fungos têm a capacidade de transportar a água de zonas húmidas para as zonas secas. É causada pela espécie *Serpula lacrymans* ou *Merulius lacrymans*.

A podridão parda apenas é visível no exterior da peça atacada, quando esta perde cerca de 10 a 20% do seu peso, que corresponde a uma perda de cerca de 80 a 95% da sua resistência mecânica (Arriaga, 2002). É pois um tipo de podridão bastante perigosa, porque implica danos graves nas madeiras e normalmente apenas é detectada num estado avançado de degradação.

A **podridão branca** ou **fibrosa**, à semelhança da podridão parda, é realizada por fungos superiores (classe *Basidiomicetos*), mas que se alimentam preferencialmente da lenhina das paredes celulares (e também celulose, ainda que em bastante menor quantidade), decompostas por um processo de oxidação (Merino, 1998). Após a sua acção de degradação, o complexo celulósico remanescente apresenta uma coloração esbranquiçada pouco uniforme, devido à falta de lenhina, e um aspecto morfológico fibroso, sem resistência mecânica. Este tipo de podridão é mais vulgar nas madeiras das espécies Folhosas do que das Resinosas, devido ao facto de possuírem maior quantidade de lenhina. Por fim, refira-se que as principais espécies causadoras deste tipo de podridão são as seguintes: *Schyzophyllum commune* F., *Polystictus versicolor* F. (nas Resinosas e Folhosas) e *Stereum hirsutum* W., *Eutypa flávio-virescens* F. e *Xylaria hypoxilon* G. (nas Folhosas).





Figuras 2.14 e 2.15 – À esquerda, exemplo de podridão parda. À direita, exemplo de podridão branca ou fibrosa. [Arriaga, 2002]

Finalmente, a **podridão branda** é o resultado da acção de fungos inferiores (classe *Ascomicetos*), os quais atacam a madeira em situações de grande concentração de humidade, excessivas para o desenvolvimento dos fungos que originam as podridões pardas e brancas. Assim, é frequente encontrar-se este ataque em zonas bastante húmidas e sem ventilação, em contacto com o terreno ou directamente com água, de que são exemplo os elementos de madeira dos sótãos, os postes de madeira em contacto com o solo, entre outros.

O ataque que caracteriza este tipo de podridão consiste na decomposição da celulose das paredes das células secundárias, caracterizando-se a superfície, enquanto húmida, com uma coloração esbranquiçada e um fácies esponjoso. Quando a superfície atacada seca, dá-se uma fissuração geral e desagregação desta zona em pequenos cubos. Apesar de ser um tipo de ataque lento e realizado por sucessivas camadas, pode ser perigoso, pois é uma situação irreversível, sendo apenas identificável exteriormente num estado avançado de degradação.

Os géneros que mais frequentemente provocam este tipo de podridão são os *Cephalosporium* e os *Chaetomium* (Merino, 1998).

Quadro 2.1 – Quadro resumo das principais características de cada um dos tipos de podridão que degradam as estruturas de madeira (E – Espécie / Z – Zona / NH – Necessidade de humidade) [adaptação de quadro resumo semelhante em Abasolo, 1998]

Tipo de fungo	Carácter	Ataque e restos	E	Z	NH
Cromogéneos	Não destrutiva	- Coloram a madeira - Propiciam outros ataques (fungos de podridão)	Resinosas e Folhosas	Borne	Sim
Podridão Branca ou Cúbica	Não destrutiva	- Atacam a lenhina dos apoios - Deixam uma coloração esbranquiçada e aspecto morfológico fibroso	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	Sim
Podridão Parda	Destrutiva	- Atacam a celulose e hemicelulose - Deixam resíduos pardos de coloração escura e fissuração cúbica - A madeira desfaz-se em pó entre os dedos	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	Sim
Podridão Branda	Destrutiva	- Atacam a celulose de madeiras em contacto com o solo e/ou zonas bastante húmidas e sem ventilação - Deixam a madeira com uma coloração esbranquiçada e fácies esponjoso	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	Sim
Podridão "Pasmada"	Destrutiva	- É um tipo de podridão "parda" com manchas avermelhadas	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	Sim

b) Insectos de ciclo larvar

Os insectos de ciclo larvar são organismos que estabelecem a acção destruidora dos elementos de madeira, tal como o nome indica, em função do seu ciclo biológico, o qual varia de espécie

para espécie e com as condições atmosféricas presentes. Neste ponto descrevem-se os insectos que pertencem à classe dos **Coleópteros**.

O ciclo biológico dos insectos de ciclo larvar ou Coleópteros inicia-se com o nascimento de insectos no estado larvar, a partir de ovos colocados pelos elementos adultos nos orifícios e/ou ranhuras da madeira, ou mesmo em profundidade, por baixo da superfície da peça (Arriaga, 2002). Estes ovos são de tamanho bastante pequeno, não visíveis pelo olho humano, tornando-se por isso difícil a sua detecção prévia. As larvas que deles nascem são, e ao contrário do que se poderá pensar, as responsáveis pela degradação mecânica da madeira, pois dela retiram o seu alimento. Para tal, possuem cabeças quitinizadas e mandíbulas que lhes permite escavar galerias no interior das peças, cujo diâmetro é função do seu estado de crescimento. Os produtos sobrantes da sua actividade alimentícia são misturados com os seus excrementos, formando o chamado serrim, que, em função da família a que pertence, é depositado ao longo da galeria ou no exterior da peça, quando já existem orifícios abertos por insectos adultos. Esta situação constitui uma valiosa pista para a detecção de um ataque em estado de desenvolvimento.

Quando a larva chega ao final do seu ciclo de vida desloca-se até próximo da superfície da madeira, onde sofre várias transformações físicas e morfológicas. Durante este processo não se alimenta e passa por um estado intermédio de metamorfose designado por crisálida, para finalmente adquirir a forma definitiva de insecto adulto.

Sob esta forma desloca-se para o exterior da peça de madeira, perfurando a fina camada que a larva havia deixado no final da galeria, constituindo orifícios circulares visíveis. O diâmetro dos orifícios e/ou o tipo de serrim existente é função da família de insectos presente, como seguidamente se expõe. Assim, o facto dos orifícios estarem visíveis indica que existiu pelo menos uma geração de insectos, mas não dá qualquer informação sobre a permanência ou não destes ou outros organismos, uma vez que as galerias podem ter sido aproveitadas pelos insectos adultos como local para colocarem novos ovos.

Por fim, após ter saído da peça de madeira atacada, o insecto adulto reproduz-se, sendo que as fêmeas voltam à peça de madeira para colocarem os novos ovos, iniciando-se novo ciclo. De notar que, por serem providos de asas, os insectos adultos podem alastrar a sua acção a outras peças de madeira. Poucas semanas após ter saído, normalmente na Primavera, o insecto adulto morre. Este ciclo tanto pode ter a duração de apenas algumas semanas, como de vários anos, em função da família de insectos e das condições reais do habitat em questão.

Segundo Arriaga (Arriaga, 2002), os insectos de ciclo larvar não são capazes de regular a temperatura do seu organismo, pelo que o seu ciclo biológico está intimamente ligado com as alterações do meio onde actuam, com maior ou menor influência em função das espécies

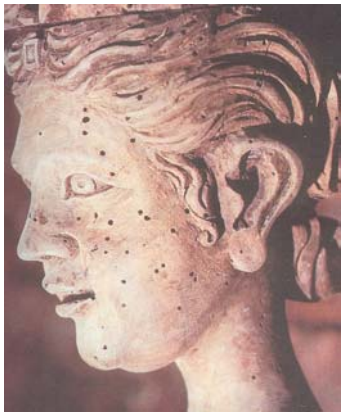
presentes. A título de exemplo, Liotta (Liotta, 2000) refere que insectos de ciclo larvar, actuando sobre elementos de madeira num ambiente atmosférico favorável, como zonas interiores de edifícios em uso ou com aquecimento, podem reduzir o seu ciclo biológico de 2 para 1 ano ou menos, em função da espécie presente.

Relativamente ao teor de humidade dos elementos de madeira, os diversos autores não referem a existência de uma relação íntima com a actividade de insectos de ciclo larvar, principalmente porque esta relação varia de espécie para espécie. No entanto, verifica-se que, de uma forma geral, o teor de humidade das peças de madeira tem pouca influência no início e desenvolvimento do ataque dos insectos de ciclo larvar (Pérez, 1998).

As principais famílias de insectos de ciclo larvar ou coleópteros que atacam a madeira são os **Anóbios**, os **Cerambicídeos**, os **Líctidos**, os **Curculiónidos** e os **Bostríchidos**.

Os **Anóbios** (caruncho) são insectos com comprimento de 2 a 11 mm, que se alimentam do borne da madeira. São frequentemente encontrados em madeira estrutural, a profundidades médias de 4-5cm. Ainda assim, atacam preferencialmente a madeira de mobiliário, produzindo ruídos audíveis, facilmente identificáveis pelo ouvido humano sem recurso a instrumentação específica, encontrando as condições ideais quando a madeira possui um teor em água elevado. O seu ataque pode ser identificável pelo serrim produzido, o qual consiste na mistura de porções de madeira e excrementos do insecto, preenchendo as galerias. O serrim desta espécie é bastante fino e rugoso, assemelhando-se a grãos de açúcar.

As principais espécies conhecidas são o *Anobium punctatum De Geer* (Europa e América do Norte), *Hadrobregmus carpetanus* (Península Ibérica), *Xestobium rufovillosum De Geer* (principalmente na Europa, mas também em África e América do Norte), *Ptilinus pectinicornis L.* (Europa), entre outros. (Liotta, 2000; Arriaga, 2002)



Figuras 2.16 e 2.17 – À esquerda, degradação provocada por Anóbios [Liotta, 2000]. À direita, aspecto morfológico dos Anóbios.

Os **Cerambicídeos** são vulgarmente designados como caruncho grande, e podem atingir os 30 mm de comprimento, no estado larvar, e 10 a 20 mm, no estado adulto. Atacam preferencialmente o borne da madeira, pelo que quando a peça atacada é constituída por uma grande percentagem de cerne, o seu ataque é limitado.

Os cerambicídeos atacam principalmente estruturas de madeira, frequentemente coberturas, e constituem um tipo de ataque muito perigoso para a segurança estrutural, uma vez que podem escavar galerias com diâmetros de cerca de 1cm, de orientação diversa, podendo mesmo chegar ao centro da secção. Um indício bastante útil da sua presença consiste no facto do seu ataque estar associado à produção de serrim.

As espécies de cerambicídeos mais comuns são o *Hylotrupes bajulus L.* (o mais importante da madeira de construção na Europa), *Hespherophanes cinereus Villers* (Centro e Sul da Europa) e *Stromatoum fulvum Villers* (Europa Mediterrânica, alguns países do Médio Oriente, América do Sul e Cuba), entre outros.

Figuras 2.18 e 2.19 – À esquerda, degradação provocada por Cerambicídeos [Arriaga, 2002]. À direita, aspecto morfológico dos Cerambicídeos.

Os **Líctidos** ou traça, como vulgarmente são designados, são insectos de pequeno tamanho, variando entre 3 e 8 mm de comprimento. Alimentam-se preferencialmente do borne das espécies folhosas, com vasos pequenos, sendo pouco comum o seu ataque a madeiras resinosas. O seu ataque é frequente em pavimentos de parquet de madeira de carvalho, sendo, porém, pouco usual em elementos estruturais. O risco de ataque desta espécie vai diminuindo em função da idade da madeira.

A traça produz um serrim muito fino, de coloração branca cremosa, assemelhando-se, ao tacto, a farinha ou pó talco (Arriaga, 2002).

As espécies mais comuns de Líctidos são os *Lyctus lineares Goeze* (Europa. Origem de França e Reino Unido) e *Lyctus brunneus Steph* (Origem tropical, em difusão na Europa), entre outros.

Figuras 2.20 e 2.21 – À esquerda, degradação provocada por Líctidos. À direita, aspecto morfológico dos Líctidos.

Os **Curculiónidos** ou escaravelho da madeira (ou gorgulho), como são frequentemente denominados, possuem comprimentos de 3 a 5 mm e realizam orifícios, para o exterior, nas peças de madeira, com diâmetro de 1 a 2 mm. O seu ataque pode ser detectado tanto em madeiras resinosas como folhosas, o qual é favorecido pela presença de madeiras húmidas, previamente atacadas por fungos.

Os Curculiónidos podem produzir danos graves nas estruturas de madeira, uma vez que, pelo facto de serem incapazes de voar, produzem ataques muito concentrados. Para além disso, têm a capacidade de escavar galerias em todas as direcções da peça de madeira, podendo produzir a completa destruição localizada de uma secção estrutural. É bastante comum a sua acção em cabeças de vigas de madeira, verificando-se por vezes a completa redução da sua secção resistente a uma massa de serrim pulverulento. Frequentemente, o seu ataque é confundido com o dos Anóbios, pelo facto do serrim produzido por ambas as espécies ser bastante semelhante, sendo, no entanto, mais fino.

As principais espécies de Curculiónidos conhecidas são o *Pselactus spadix H.*, *Hexartrum exiguum Boh.* e *Amaurorrhinus bewickiamus Woll (*Arriaga, 2002).

Figura 2.22 – Aspecto morfológico dos Curculiónidos. [Arriaga, 2002]

Por fim, os **Bostríchidos** são insectos que atacam preferencialmente o borne das folhosas, principalmente as tropicais, na presença de um certo grau de humidade. Possuem comprimentos entre 4 e 6 mm. A espécie mais representativa de Bostríchidos é a *Apate capucina L.* (Espanha).

c) Insectos sociais ou térmitas

"A origem etimológica da palavra térmita remete-nos para a palavra grega «*terma*», cujo significado é «*o fim*». Posteriormente os romanos adaptaram-na como «*termes-termitis*»; Da raiz do genitivo «*termit*» derivaram todas as denominações seguintes na maioria dos países europeus: les térmites, em francês, i termiti, em italiano, the térmites, em inglês e die termiten em alemão. Linneu foi a primeira pessoa a utilizar o vocábulo «*termes*», em 1758, no seu «*Systema Naturae*». Os primeiros documentos históricos sobre as térmitas procedem de Plínio o Velho, que no século I, equivocadamente as denominou de «*formigas brancas*» na sua «*Naturalis Historia*»"
(Benito, 1963. Tradução de excerto de Arriaga, 2002).

Os insectos sociais ou térmitas, nome por que são vulgarmente conhecidos, são insectos da ordem **Isoptera**, e como o mesmo sugere, vivem em colónias, inseridos numa organização social avançada, em que cada grupo desempenha funções específicas.

Conhecem-se cerca de 2.800 espécies de térmitas, as quais se encontram principalmente em países de clima tropical ou subtropical. Ao contrário do que seria expectável, apenas 70 a 80 espécies de térmitas têm uma influência económica negativa, sendo que a grande maioria traz benefícios através da decomposição de matéria orgânica existente no solo, reciclando os nutrientes das plantas, e assim, melhorando o arejamento e drenagem dos solos (Arriaga, 2002).

Morfologicamente, as térmitas apresentam uma constituição física bastante variável, intimamente associada com as funções que desempenham na colónia. Existem três classes sociais principais:

- Indivíduos sexuados ou reprodutores
- Soldados
- Obreiros

Os <u>indivíduos sexuados</u> ou <u>reprodutores</u> são os elementos mais importantes da colónia, e em função dos quais toda ela actua. Existem três tipos de classes com a função de reprodução e aumento da colónia, nomeadamente, os reprodutores principais (casal real fundador), reprodutores secundários (missão de garantir a reprodução da colónia na ausência dos reprodutores principais e/ou auxílio na reprodução da colónia) e os reprodutores com asas (missão de abandonar o ninho e criar novas colónias). Os reprodutores principais têm normalmente cor

escura e apresentam dois pares de asas similares, que perdem após o voo pré-nupcial (Liotta, 2000).

Os soldados têm como principal função a defesa da colónia, possuindo para tal, cabeça e mandíbulas grandes, comparativamente com o resto do seu corpo.

Os obreiros realizam as tarefas de manutenção da colónia, nomeadamente, na busca do alimento para os elementos reprodutores e construção/manutenção do ninho. Tal como os soldados, não possuem asas, sendo que, comparativamente com estes, têm uma cabeça mais pequena e um aparelho bucal adaptado a realizar tarefas de erosão (Liotta, 2000).

Figura 2.23 – Térmitas e suas diferentes classes sociais: Indivíduos sexuados, soldados e obreiras [CTBA, 2002]

Conforme referido, o ciclo de vida de uma colónia de térmitas inicia-se com o voo dos indivíduos sexuados para um novo local, de forma constituírem um novo ninho. Após a copulação, os ovos colocados pela fêmea convertem-se em ninfas, as quais assumem a forma de uma das classes sociais descritas, em função da necessidade da colónia. Naturalmente, as primeiras posturas de ovos resultam no nascimento de obreiros, de forma a se construir o novo ninho. Durante esse período a rainha apenas se dedica à postura de ovos (10.000 ovos por dia).

No final do primeiro ano de desenvolvimento, verifica-se a existência de apenas alguns obreiros, enquanto que os primeiros soldados normalmente surgem no segundo ano. Posteriormente, surgem os reprodutores secundários, de forma a incrementar a reprodução. As rainhas podem viver entre 10 a 80 anos. Uma colónia normal pode ser constituída por mais de um milhão de indivíduos (Arriaga, 2002).

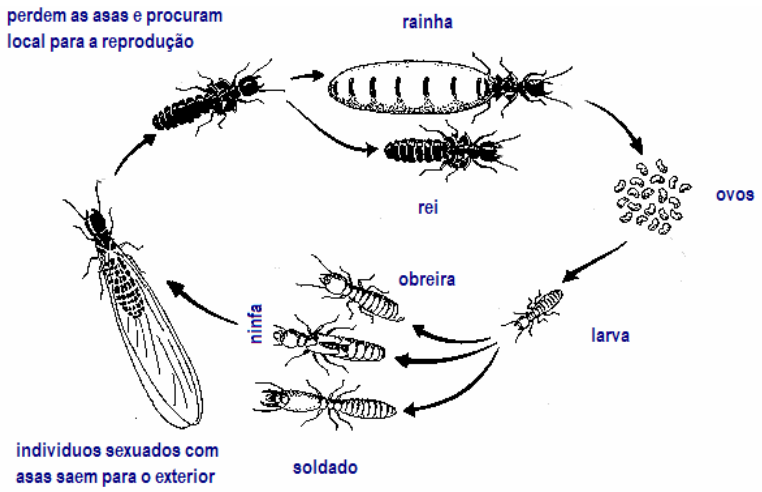


Figura 2.24 – Ciclo de vida das térmitas

As térmitas são constituídas por um exosesqueleto quitinizado de protecção, sendo que o seu crescimento é acompanhado da mudança desta carapaça, a qual pode suceder 6 a 10 vezes durante o seu período de vida. Pela ausência de pigmentação do seu corpo, evitam a luz directa, a qual pode levar à sua morte, e por isso deslocam-se sempre através de galerias interiores. Assim, na busca de alimento, as térmitas podem deslocar-se por galerias no solo, por vazios nas paredes, pelo interior de elementos de madeira ou por galerias exteriores fabricadas pelos obreiros, com saliva, excrementos ou partículas de terra ou de madeira. Esta última, constitui uma pista muito importante da sua presença, para a inspecção de estruturas de madeira, revelando-se quase como a única forma de detecção por inspecção visual, dado que as térmitas desenvolvem quase sempre a sua acção em galerias interiores.

As térmitas não são capazes de digerir, por si só, a celulose da madeira. Para tal, através de bactérias provenientes do aparelho digestivo das obreiras, a celulose é decomposta e transformada em açúcares assimiláveis, que servem de alimento para a colónia. Alimentam-se igualmente de indivíduos mortos e mutilados, bem como de papel e tecido. Com a excepção dos indivíduos sexuados, as térmitas são cegas, orientando-se por isso através do olfacto, sentido que têm bastante desenvolvido. Os indivíduos deixam gotas de um composto sobre o terreno (feromonas), as quais indicam o caminho a seguir até às fontes de alimento para os outros obreiros (Arriaga, 2002).

Em função do tipo de acção de degradação que desenvolvem sobre as estruturas de madeira, as térmitas são normalmente classificadas como **térmitas subterrâneas** (quando implantam os seus ninhos no subsolo) ou **térmitas de madeira seca** (quando implantam os seus ninhos na própria madeira), sendo que as primeiras apresentam maior incidência e relevância em Portugal.

Figuras 2.25 e 2.26 – Exemplo do ataque de térmitas: À esquerda, secção transversal. À direita, secção longitudinal.

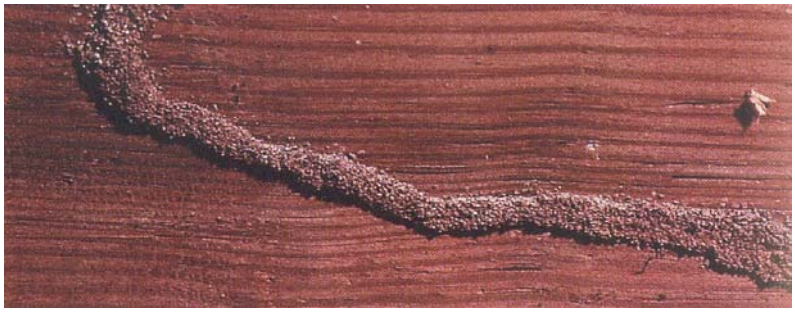
Os principais tipos de térmitas que se podem encontrar na Península Ibérica, e de acção perniciosa para estruturas de madeira, são a *Reticulitermes Lucifigus Rossi* e a *Criptotermes Brevis Walker*. Também é possível encontrar térmitas da espécie *Kalotermes Flavicollis Fabre*, porém a sua acção desenvolve-se principalmente sobre árvores, pelo que apenas se desenvolverá a descrição sumária das 2 primeiras espécies referenciadas.

Reticulitermes Lucifigus Rossi

Esta é uma das mais importantes espécies no ataque de estruturas de madeira na Península Ibérica. De acordo com o referido, classifica-se como *térmita subterrânea*.

O seu ciclo de vida é semelhante ao anteriormente descrito, nomeadamente no que respeita à copulação e formação de novos ninhos. Este é normalmente disposto no solo e no exterior dos edifícios atacados, aos quais as térmitas acedem através de galerias subterrâneas. Por vezes podem mesmo fundar ninhos secundários no interior dos edifícios. A terra fornece-lhes os três elementos indispensáveis para a sua sobrevivência: escuridão, temperatura moderada relativamente constante e humidade permanente (Arriaga, 2002). O acesso aos elementos de madeira é realizado por frinchas húmidas nas alvenarias ou através de galerias externas, onde criam condições óptimas de temperatura e humidade para a sua acção (figura 2.27).

Segundo Arriaga, esta espécie de térmitas encontra condições óptimas para sua acção a temperaturas próximas de 30 ºC, não sendo capaz de se desenvolver para temperaturas inferiores a 2 ºC. Necessitam de um certo grau de humidade no solo e de uma elevada percentagem de humidade relativa ambiental (condições óptimas em ambientes saturados). Se o teor em água da madeira for excessivo não se dá o ataque (Arriaga, 2002).



Figuras 2.27 – Exemplo de galeria exterior fabricada pelas térmitas para circulação [Liotta, 2000]

A degradação que produzem nas estruturas de madeira é bastante grave e perigosa, principalmente porque, regra geral, só são detectadas num estado avançado, quando se verificam deformações excessivas, fendilhações de revestimentos ou mesmo a rotura do elemento estrutural. Tal deve-se a que as térmitas abrem galerias, de espessura muito reduzida (1 a 2mm), paralelas à orientação do fio, deixando intacta a capa exterior. Atacam preferencialmente a madeira de primavera, menos densa, deixando intactas secções entre as galerias, o que se revela muito característico do seu ataque. Não atacam elementos de caixilharia e a sua presença em móveis é pouco frequente.

A velocidade de propagação da acção das térmitas é muito condicionada pelas condições de temperatura e humidade, sendo que, em condições óptimas, o seu ataque pode propagar-se a todo um conjunto monumental em poucos anos (Liotta, 2000).

Criptotermes Brevis Walker

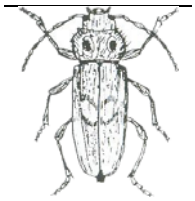
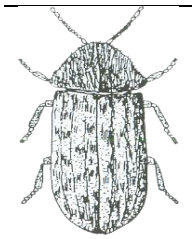
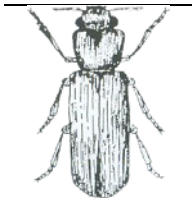
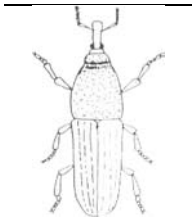
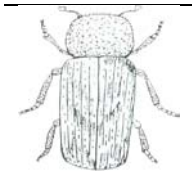
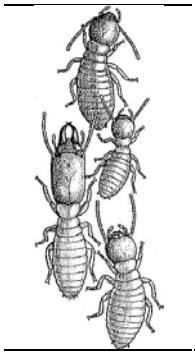
Esta espécie de térmitas ataca preferencialmente a madeira com baixo teor em água (limite máximo de, aproximadamente, 15%) e é classificada como *térmita de madeira seca*, pelo facto de criar os seus ninhos no interior de peças de madeira das edificações.

A *Criptotermes Brevis Walker* desloca-se, à procura de locais para acasalar e constituir um novo ninho, pelo ar, possuindo asas para esse efeito. Os voos pré-nupciais são muito esporádicos e ocorrem durante o Verão. Após perderem as asas, introduzem-se no interior do elemento de madeira, realizando perfurações na sua capa exterior ou entrando por fissuras ou fendas que existam superficialmente. Acasalam e dá-se o início de uma nova colónia, cujo desenvolvimento é bastante mais lento que o das *Reticulitermes Lucifugus Rossi*, sendo que a rainha apenas deposita 1 a 2 ovos por dia. As colónias, regra geral, não chegam a ser muito numerosas, raramente ultrapassando o milhar de indivíduos, sendo habitual existirem 100 a 250 indivíduos (Arriaga, 2002).

Tal como para as *Reticulitermes Lucifugus Rossi*, torna-se difícil a sua detecção, pelo facto da sua acção ser desenvolvida no interior das peças de madeira. Os dejectos que depositam nas galerias podem constituir um indício da sua presença, uma vez que possuem algumas características particulares (semelhantes a pequenas sementes, aspecto variado, cor parda e similar à da madeira atacada). Frequentemente, encontram-se colónias isoladas, por exemplo, dentro mobiliário interior.

A degradação produzida pela *Criptotermes Brevis Walker* é bastante semelhante à da *Reticulitermes Lucifugus Rossi*, sendo que, neste caso, é gerada pelas ninfas precedentes das larvas, as quais não se converteram em obreiras, mantendo-se no estado de ninfas. Possuem uma elevada capacidade de destruição, sendo capazes de destruir mobiliário fixo em meses, e estruturas de cobertura, muito atacadas, em um ou dois anos. Encontram-se também ataques a móveis, a armários, a molduras de quadros, a vigas de cobertura, etc. (Arriaga, 2002).

Quadro 2.2 – Quadro resumo dos agentes bióticos de degradação de estruturas de madeira (E – Espécie / Z – Zona / NH – Necessidade de humidade) [adaptação de quadro resumo semelhante em Abasolo, 1998]

Agente	Galeria	Dimensões Orifício / Agente	Marcas e Restos	E	Z	NH
Cerambicídeos 	sim Adulto sai para o exterior	**Orifício:** Ovóide 4x7mm **Agente:** 10 a 20mm (adulto)	- Serrim e excrementos - Faz ruído ao alimentar-se da madeira - Pode escavar galerias de 1cm de diâmetro, de orientação diversa (ataque perigoso)	Resinosas	Borne	Não
Anóbio 	sim Adulto sai para o exterior	**Orifício:** Circular 1 a 1,5mm **Agente:** 2 a 11mm (adulto)	- Atacam preferencialmente madeira de mobiliário - Serrim fino e rugoso - A fêmea emite ruídos audíveis, ao chamar o macho	Resinosas e Folhosas	Borne	Não
Traça 	sim Adulto sai para o exterior	**Orifício:** Circular 1 a 2mm **Agente:** 3 a 8mm (adulto)	- Serrim amarelado muito fino - Bastante comum o ataque a pavimentos de madeira	Folhosas	Borne	Não
Gorgulho 	sim Adulto sai para o exterior	**Orifício:** Circular 1 a 2mm **Agente:** 3 a 5mm (adulto)	- Serrim semelhante ao dos anóbios, sendo mais fino e pulvurento - Produzem ataques muito concentrados	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	> 20%
Bostríchidos 	sim Adulto sai para o exterior	**Orifício:** Circular 3 a 6mm **Agente:** 4 a 6mm (adulto)	- Atacam preferencialmente pavimentos de madeira - Produzem serrim muito fino, de cor creme	Folhosas	Borne	Sim
Térmitas 	sim Proveniente do termiteiro, deslocando-se por galerias	-	- A secção atacada possui galerias longitudinais de aspecto folhoso, não visíveis pelo exterior - deslocam-se em galerias subterrâneas, pelo interior das alvenarias ou por galerias de terra exteriores - Ninhos, normalmente no exterior do edifício atacado	Resinosas e Folhosas	Borne e cerne	-

2.2.2 Patologias de carácter abiótico

São os principais agentes de degradação abiótica da madeira, a acção dos agentes atmosféricos, dos agentes químicos e do fogo, os quais têm influência nas propriedades mecânicas e, consequentemente, nos resultados da avaliação com recurso a métodos de inspecção não destrutivos.

Dos **agentes atmosféricos** que provocam a degradação da madeira, destacam-se a acção da radiação solar, da chuva e da alternância de ciclos de secagem e humedecimento.

Quando a madeira se encontra directamente exposta à radiação solar, a sua superfície é degradada, especialmente através da acção dos raios ultravioleta. Torna-se então visível uma alteração da sua coloração superficial, que inicialmente apresenta uma tonalidade amarelada, para posteriormente se tornar acinzentada. Este fenómeno resulta da decomposição da lenhina pelos raios ultravioleta, sendo que apenas afecta uma camada superficial muito reduzida da madeira. No entanto, quando exposta à água da chuva, este processo pode ser mais célere, pois esta, por escorrimento, provoca a lavagem da superfície, ficando novamente a madeira sã exposta à radiação ultravioleta.

O teor de humidade da madeira não é, por si só, uma causa de degradação, verificando-se que quanto maior for o seu valor, menor vai ser a resistência mecânica da madeira, e maior vai ser a sua expansão volumétrica e a susceptibilidade de ser atacada por agentes biológicos.

O que realmente provoca a degradação da madeira, por acção das águas das chuvas, da radiação solar e da temperatura, é a ocorrência da alternância de ciclos de humidificação e secagem, com a consequente variação volumétrica do material. Esta variação provoca tensões internas na peça de madeira, resultando deste fenómeno o aparecimento de fendas (normalmente longitudinais), curvaturas e empenamentos.

Note-se que esta patologia, além de resultar no envelhecimento da estrutura celular e diminuição da resistência da peça, potencia o ataque de elementos biológicos, pois a existência de fendas abre novas vias de ataque e permite maior retenção de humidade na madeira.

A madeira é, regra geral, pouco alterada pelo contacto com **produtos químicos**, cuja acção resulta normalmente em simples mudanças da coloração superficial da peça atacada. No entanto, dependendo das espécies, em ambientes mais agressivos pode sofrer alterações mais importantes (Arriaga, 2002):

- Em ambientes ácidos ou alcalinos, podem ser rompidas as ligações de carbono da madeira, ficando a parte afectada com um aspecto semelhante ao da podridão parda. É mais frequente em madeiras folhosas e sucede frequentemente em ambientes industriais de grande contaminação;

- Em ambientes bastante alcalinos, é degradada a lenhina e a hemicelulose, perdendo pois a madeira parte da sua resistência e coesão.

Conforme já abordado no ponto 2.1.4.1, a acção do fogo tem uma influência perniciosa sobre a capacidade resistente dos elementos estruturais de madeira, devido aos danos que provoca na sua estrutura intercelular, principalmente nas secções mais próximas da área exposta. De igual forma, há que ter em conta que a redução de secção pode implicar uma maior influência dos defeitos na capacidade resistente global do elemento estrutural (por exemplo, havendo redução de secção, a área de um nó, relativamente à área total, é superior).

Muitas patologias de carácter abiótico devem-se à deficiente concepção e/ou utilização das estruturas. É frequente executarem-se aberturas, cortar apoios de vigas, aumentar as sobrecargas de utilização, suprimir apoios verticais, aumentar o vão de peças, mudar as condições termo-higrométricas de serviço, provocar condensações ou entradas de água líquida devido a alterações arquitectónicas ou falta de manutenção, entre outros.

Todos estes fenómenos constituíram, durante o século XX, a principal razão para o envelhecimento precoce de muitas estruturas de madeira e a sua consequente perda de prestígio como material estrutural.

Perante o exposto, é de esperar que os resultados dos ensaios baseados em técnicas não destrutivas sejam sensíveis a estes factos, sendo que a análise dos resultados deve sempre ser realizada de forma cuidadosa e consciente.

2.3 Avaliação das propriedades mecânicas da madeira por ensaios destrutivos

2.3.1 Ensaios sobre provetes de pequena dimensão

A capacidade resistente das diversas essências de madeiras foi avaliada até há cerca de 30/40 anos através de ensaios realizados sobre peças de pequena dimensão sem defeitos.

Para ter em conta os defeitos e a variabilidade da capacidade resistente das diversas peças com dimensões estruturais consideravam-se na altura coeficientes de segurança de valor elevado.

O cálculo era realizado por tensões de segurança comparando-se as tensões instaladas em serviço com a capacidade resistente das peças, minorada significativamente pelos atrás referidos coeficientes de segurança.

As normas portuguesas de ensaio para avaliação das principais propriedades mecânicas sobre provetes de pequena dimensão ainda estão em vigor (NP618:1973, NP619:1973; NP620:1973; NP621:1973; NP622:1973; NP623:1973). Servem para avaliar a resistência da madeira em condições óptimas.

2.3.2 Ensaios sobre peças com dimensões estruturais

2.3.2.1 Considerações gerais

A avaliação da resistência da madeira, com recurso a peças de pequena dimensão e sem defeitos, conduz a resultados que não podem ser directamente aplicados sobre peças estruturais com dimensões comerciais.

O actual método de cálculo de verificação estrutural, seguido na generalidade dos actuais códigos ou regulamentos de estruturas de madeira em todo o Mundo, prevê a verificação à rotura por metodologias semelhantes às seguidas para outros materiais estruturais como o aço e o betão.

A madeira actualmente usada em estruturas não pode ser livre de defeitos pois isso implicaria um custo absolutamente incomportável. A madeira comercial actualmente usada em estruturas tem assim “defeitos” e apresenta uma relativamente elevada variabilidade de qualidade.

As peças de madeira sem defeitos ensaiados à flexão, em geral, iniciam o processo de rotura pela zona comprimida (a madeira tem resistência à compressão inferior à flexo-tracção), onde ocorre a plastificação das fibras, o que implica a descida do eixo neutro e a consequente rotura das fibras traccionadas.

Em geral, os defeitos mais importantes nas peças correntes para estruturas são os nós. Nestas peças, o ensaio à flexão conduz a uma rotura à volta do nó por perda simultânea de resistência à tracção no sentido perpendicular e no sentido do fio, ocasionando a redução de secção útil da peça e a consequente rotura com início, em geral, na zona traccionada.

Por esses motivos, actualmente realizam-se ensaios sobre peças de dimensões comerciais e com defeitos semelhantes aos que ocorrem na madeira estrutural disponível no comércio.

2.3.2.2 Norma europeia EN408

Os valores obtidos na avaliação da resistência mecânica de peças estruturais em madeira dependem dos métodos de ensaio utilizados. É assim fundamental que esses métodos sejam normalizados, para que os resultados obtidos em diferentes laboratórios possam ser comparáveis.

A utilização do cálculo à rotura e de madeira classificada em classes de qualidade, por avaliação visual ou por máquina, implica também que os ensaios de avaliação das propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira tenham como principal função a monitorização dos processos de classificação, o que torna ainda mais premente a utilização de uma norma seguida pelo maior número possível de países.

Nesse sentido, há já vários anos que os países europeus juntaram esforços no sentido de afinar uma norma comum de ensaio de peças de madeira estrutural com dimensões comerciais. Essa norma é a EN408, com edição mais recente em 2003.

A Norma EN408 baseia-se na norma internacional ISO 8375, o que ainda lhe confere um carácter mais abrangente.

A norma EN408 especifica métodos de ensaio para a determinação das seguintes propriedades mecânicas de peças estruturais de média dimensão de madeira maciça ou lamelada colada:

- módulo de elasticidade em flexão;
- módulo de distorção;
- resistência à flexão;
- módulo de elasticidade em tracção paralela ao fio;
- resistência à tracção paralela ao fio;
- módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio;
- resistência à compressão paralela ao fio;
- módulo de elasticidade em tracção perpendicular ao fio;
- resistência à tracção perpendicular ao fio;
- módulo de elasticidade em compressão perpendicular ao fio;
- resistência à compressão perpendicular ao fio;
- resistência ao corte.

Adicionalmente, especifica-se o modo de determinação das dimensões, do teor em água e da

massa volúmica dos provetes de ensaio.

Os métodos aplicam-se a elementos de secção rectangular ou circular (aproximadamente constante) de madeira maciça, com ou sem ligações de entalhes múltiplos ("*finger-jointed timber*"), e a madeira lamelada colada.

O ensaio de peças com defeitos fornece informação muito importante sobre o comportamento das estruturas de madeira, pelo que é fundamental que o relatório de ensaio forneça informação detalhada sobre aspectos de qualidade das peças, designadamente:

- Número, dimensões e localização de nós nas zonas onde ocorrem a rotura;
- Inclinação do fio;
- Taxa de crescimento;
- Descaio.

2.3.3 Defeitos e anomalias das peças de madeira

O principal factor que afecta a qualidade e consequentemente os valores das propriedades físicas e mecânicas, de madeira são os defeitos e anomalias das peças. Os defeitos correntemente considerados são os seguintes:

- Nós;
- Desvio da indicação do fio em relação ao eixo da peça;
- Fendas;
- Empenos;
- Descaio;
- Taxa de crescimento (velocidade de crescimento irregular);
- Bolsas de resina;
- Presença de medula e entre-casco;
- Madeira de reacção;
- Madeira juvenil;
- Ataques de insectos e fungos: deficiências no material lenhoso.

Apresentam-se, em seguida, definições sintéticas dos diversos tipos de defeitos, de acordo com o disposto na norma NP180 e especificação E31 do LNEC.

Defeito – qualquer anomalia da estrutura do lenho ou resultado de ataque de agentes vivos (animais ou plantas) ou imperfeição de laboração que possa determinar a diminuição do valor comercial de uma peça de madeira.

Nós – defeitos associados ao processo de formação lenhosa, apresentando-se como secções simples da massa lenhosa que constituíam a porção base de um ramo inserida no tronco da árvore. Essa massa, de forma sensivelmente cónica, orienta-se na direcção da medula e tem nela, ou praticamente sobre ela, o seu vértice.

Figura 2.28 – Nó da madeira [Tampone, 2005]

A existência de nós implica o desvio localizado das fibras longitudinais, as quais ficam sujeitas a solicitações diagonais, constituindo uma situação para qual a madeira apresenta menor resistência. Conforme já referido, os nós constituem o defeito mais condicionante da resistência global da peça, ainda que não tenham tanta influência sobre o valor do módulo de elasticidade em flexão.

Desvio de inclinação do fio (fio diagonal ou fio torcido) – estes defeitos traduzem-se por uma inclinação mais ou menos acentuada do fio relativamente ao eixo longitudinal das peças. A presença deste defeito em peças estruturais de madeira pode tanto ser o resultado de um mau processo de corte, como da utilização de elementos de madeira cuja natureza morfológica possuía estas características (por exemplo, o corte de troncos curvos ou deformados).

O desvio de fibras apresenta como principais consequências tecnológicas, o facto de tornar difícil de trabalhar a peça e provocar fendimentos e empenos face a pequenas alterações de humidade, dadas as elevadas tensões internas que se instalam na madeira com estas características.

Fendas – as fendas são o resultado das elevadas tensões instaladas pela contracção diferencial da madeira entre as zonas periféricas e interiores do lenho, o que induz esforços de tracção transversal que tendem a romper a madeira segundo planos radiais. Conduzem à redução

da secção útil resistente de peça e podem ser muito graves se forem repassadas, ou seja, se ligarem faces opostas das peças de madeira, bem como se estiverem localizadas em zonas de união entre peças ou em elementos sujeitos a compressão axial. Pelo exposto, verifica-se que as fendas não são necessariamente o resultado de uma patologia de índole estrutural, sendo que, dentro de determinados limites dimensionais estabelecidos nas normas de classificação visual, têm reduzida influência na resistência da peça.

Figura 2.29 – Exemplo de uma fenda longitudinal

Empenos – os empenos são alterações de forma da peça relativamente a uma forma plana perfeita: podem ser em arco de face, em arco de canto, em hélice e em meia-cana.

Descaio – o descaio é um defeito de laboração que se traduz pela falta de madeira numa ou mais arestas das peças, afectando-as parcial ou totalmente ao longo do seu comprimento.

Taxa de crescimento – a taxa de crescimento indica a largura média em milímetros dos anéis de crescimento. A largura muito irregular dos anéis traduz um defeito de importância ligeira.

Bolsas de resina – bolsas de resina que integram o material lenhoso e são em geral da pequena dimensão.

Presença de medula ou entrecasco – as peças estruturais de madeira não deverão ter qualquer presença da medula ou de entrecasco, pois constituem um ponto fraco em termos de resistência mecânica.

Madeira de reacção – a madeira de reacção consiste na ocorrência de porções de material lenhoso torcido ou de forma irregular resultante de uma acção externa muito forte (vento, tronco torcido, árvore não ventilada, etc.), actuante sobre o tronco da árvore viva.

Madeira juvenil – refere-se à existência de madeira menos resistente com estrutura anatómica mais débil, nos primeiros anéis de crescimento de madeiras de resinosas.

Ataques de insectos e fungos – a madeira é um material lenhoso sujeito ao ataque de fungos e insectos xilófagos, conforme exposto no ponto 2.2.1, constituindo por isso um defeito muito grave das peças estruturais.

2.3.4 Outros factores que influenciam a resistência mecânica de madeira estrutural

Como vimos os "defeitos" das peças estruturais da madeira representam o principal factor que provoca a variação da sua capacidade resistente às acções mecânicas.

Para além dos defeitos, os outros principais factores com influência importante na resistência dos elementos estruturais de madeira são:

- A massa volúmica;
- O ângulo da direcção do esforço com o fio de madeira;
- O tempo de actuação de carga (fluência);
- As dimensões das peças;
- A fadiga;
- A idade da madeira.

Apresentam-se, em seguida, um conjunto de indicações sobre a forma de influência e a importância relativa de cada um desses factores.

Massa volúmica

A massa volúmica é um dos factores mais importantes que pode servir de indicador de resistência de um elemento estrutural em madeira. Pode afirmar-se que para peças de resinosas, com defeitos equivalentes, existe uma proporcionalidade directa entre a resistência à flexão na direcção do fio (e em menos escala das restantes propriedades) e a massa volúmica da madeira das peças. Para madeiras da mesma espécie florestal, a afirmação é totalmente rigorosa e aplica-se também a madeira de folhosas. Comparando diferentes espécies, a afirmação é ainda bastante rigorosa para as resinosas e não pode ser extrapolada para as folhosas.

Ângulo da direcção do esforço com o fio de madeira

Dado que a madeira é um material anisotrópico, com um comportamento que pode ser

aproximadamente definido como transverso isotrópico, a sua resistência diminui significativamente se a direcção da carga não é perpendicular à direcção do fio. Haverá que considerar sempre a redução de resistência para actuações de carga fazendo ângulo diferente de 90º com a direcção do fio.

Tempo de actuação de carga (fluência)

A madeira está, em geral, sujeita a um processo de fluência quando sobre a acção de tensões elevadas. Pode afirmar-se que a velocidade de aumento da deformação é aproximadamente proporcional ao estado de tensão instalado, o que implica que a madeira se comporta melhor em situações em que está sujeita a estados de tensão baixos para cargas permanentes, aguentando bem aumentos localizados de tensões, por períodos relativamente reduzidos de tempo.

Tendo em conta o referido, verifica-se que a influência de duração de carga na resistência e no aumento de deformação é maior nas peças de maior qualidade, onde as tensões instaladas são maiores face à melhor capacidade resistente das peças. Para eliminar o efeito do factor duração de carga nos ensaios, a norma EN408 impõe que a rotura se processe no intervalo de 3 a 7 minutos, a contar do seu início.

Dimensões das peças

Em geral a resistência aumenta com a diminuição das dimensões das peças. Este efeito é considerado no Eurocódigo 5, para peças de muito pequenas dimensões.

Fadiga

O fenómeno de fadiga relaciona-se com a perda de resistência como resultado do efeito de variações alternadas e muito frequentes dos esforços a que uma peça está sujeita. É mais importante nos casos em que essa variação do esforço actuante implica alterações frequentes de estados de tensão de compressão para tracção, como resultado, por exemplo, da acção do vento e da vibração induzida por máquinas. A madeira tem um óptimo comportamento à fadiga, contrariamente ao que ocorre em materiais estruturais com estrutura quimicamente organizada (do tipo cristalino).

Idade da madeira

Estudos realizados nos últimos 50 anos indicam que, em princípio, a resistência da madeira não diminui de forma visível com a idade.

Alguns estudos chegaram à conclusão que, com a idade, a madeira terá tendência a ficar com

uma maior dureza superficial e resistência mecânica, mas a perder flexibilidade, tornando-se mais frágil. Sujeita a cargas permanentes, terá tendência a sofrer uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade.

Não existem no entanto estudos de investigação suficientes que permitam generalizar as afirmações acima indicadas a todas as espécies de madeira, pelo que, será prudente considerar uma ligeira perda das propriedades para madeiras antigas, o que será compensado pelo facto da madeira antiga ter, em geral, muito menos defeitos congénitos de formação. Os maiores problemas da resistência das madeiras antigas associar-se-ão sempre às fendas e à perda de material lenhoso resultante de ataques de fungos e insectos xilófagos.

2.4 Valores das propriedades mecânicas de madeira a usar no cálculo à rotura

2.4.1 Madeira serrada classificada

Como se explica no ponto anterior, as peças estruturais em madeira apresentam uma grande variabilidade no que diz respeito às propriedades mecânicas, como resultado de diversos factores, dos quais se destacam a essência de madeira e os defeitos.

Por esse motivo, para que a madeira possa ser usada como um material de construção fiável e seguro, é necessário definir um esquema de controlo de qualidade que garanta que as peças estruturais com dimensões comerciais aplicadas pelos construtores tenham características físicas e mecânicas totalmente compatíveis com as especificações de projecto.

O procedimento actualmente seguido para esse efeito consiste no que genericamente se designa por **classificação visual** de madeiras.

Os sistemas nacionais de classificação visual de madeiras assentam em normas aplicáveis apenas a um conjunto reduzido de espécies e definem classes de qualidade associadas à limitação de defeitos. São exemplo dessas normas:

- a norma alemã DIN 4074.1, aplicável a madeiras de resinosas de pinho, espruce, abeto e cipreste;
- a norma nórdica INSTA 142, aplicável às mesmas resinas da norma alemã acima referida;
- a norma espanhola UNE 56544, aplicável a diversas espécies de pinho espanhol;
- a norma francesa B52-001, aplicável a madeira de carvalho;
- a norma portuguesa NP 4305, aplicável a madeira de pinho bravo português.

A importância da correcta classificação é facilmente ilustrada pela enorme variabilidade da capacidade resistente das peças, em função da classe de qualidade em que são inseridas.

A título de exemplo, pode referir-se que a norma nórdica INSTA 142 prevê as classes de classificação visuais T0, T1, T2 e T3 a que correspondem respectivamente as classes de resistência C14, C18, C24 e C30 o que ilustra a enorme variabilidade da capacidade de resistência das peças em função dos respectivos defeitos. De salientar ainda que o processo de classificação pode conduzir a peças que não cumprem os requisitos de limitação de defeitos previstos nas normas e que, por esse motivo, não deveriam ser usadas em estruturas. Este facto reforça a ideia da necessidade dos técnicos envolvidos no projecto, fabrico e montagem de estruturas de madeira terem conhecimentos mínimos de classificação de madeiras, para que, durante o processo seja rejeitada qualquer peça muito defeituosa que possa ter passado o crivo da classificação.

O que não é contestável é a necessidade de usar para estruturas de madeira, exclusivamente madeira classificada. No limite, a madeira terá de ser classificada informalmente pelo técnico projectista ou pelo construtor.

2.4.2 Normas europeias de classificação de madeiras em classes de qualidade

O sistema europeu de classificação de madeiras em classes de qualidade baseia-se nas 4 normas da série EN14081, editadas em 2005 e ainda não traduzidas para português:

- EN 14081.1 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements;
- EN 14081.2 - Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing;
- EN 14081.3 - Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 - Machine grading: additional requirements for factory production control;
- EN 14081.4 - Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 - Machine grading – grading machine settings for machine controlled systems.

Estas normas definem as regras gerais de classificação de madeiras, visual e por máquina, para uso estrutural. Estes apresentam-se como os dois métodos actualmente disponíveis para classificação de madeiras.

A **classificação visual** assenta na limitação de defeitos por classe (norma 14081.1) e é feita por operadores especializados.

Os principais defeitos a limitar são:

- o número e localização dos nós;
- o desvio do fio de madeira em relação ao eixo da peça;
- o descaio ("cantos cortados nas peças");
- os empenos;
- as fendas.

A norma EN 1310 (1997) define os critérios a seguir na medição dos defeitos.

A norma EN 14081.1 apresenta, na cláusula 5, diversos requisitos genéricos a cumprir para que a peça estrutural possa ser incluída numa determinada classe de resistência definida na EN 338. O Anexo A da mesma norma define as exigências de desempenho gerais relacionadas com defeitos a serem pormenorizadas nas normas específicas de classificação.

Para além das normas nacionais de classificação visual existentes em cada país, estão já disponíveis algumas normas europeias de classificação para madeira serrada tais como a EN 975-1 (1995) e a EN975-2 (2004) para folhosas (Choupo, Carvalho e Faia) e a EN 1611-1 (1999) para resinosas (Espruce, Abeto, Pinho e Pseudotsuga).

Estas normas e as normas de classificação de origem nacional têm características específicas em função das populações de madeira a que se referem, tendo em conta:

- a espécie ou conjunto de espécies;
- a origem geográfica;
- os diversos requisitos dimensionais;
- a qualidade geral do material disponível no mercado;
- influências históricas ou a tradição dos mercados.

Devido à diversidade de normas disponíveis em uso nos diversos países, e às questões acima referidas, é actualmente impossível definir um conjunto de normas europeias que possam ser usadas universalmente em toda a Europa.

Por esse motivo, o sistema de classificação visual que irá vigorar na Europa nos próximos anos assentará na norma EN 14081.1, que define as regras gerais, e nas normas de classificação específicas para grupos de espécies concretos, normas essas originárias de países europeus ou emitidas globalmente ao nível do CEN.

A **classificação por máquina** é de uso corrente num número elevado de países desenvolvidos onde o uso da madeira como material estrutural é vulgar (Norte e Centro da Europa, USA, Canadá, Austrália, Japão).

Os países usam basicamente dois sistemas de classificação por máquina: a classificação controlada pelo produto (*output controlled*) e a classificação controlada pela máquina ("*machine controlled*"). Ambos os sistemas exigem, em complemento, uma inspecção visual ligeira para detectar defeitos com influência importante na resistência mecânica e que a máquina não consegue detectar.

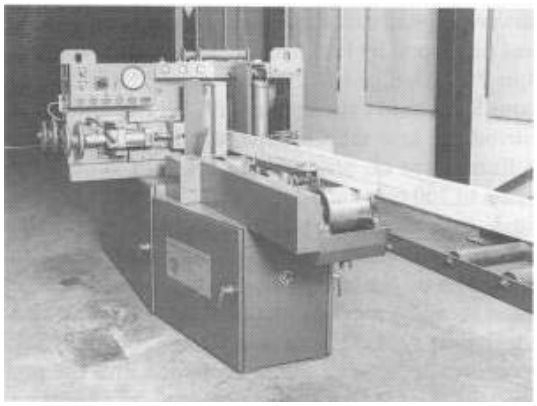
O sistema controlado pelo produto é adequado para utilizações em serrações para um número reduzido de dimensões, espécies e classes de qualidade, em produção contínua industrial em um ou mais turnos.

O controlo do produto classificado é efectuado diariamente através de ensaio de controlo, de acordo com a EN 408, de peças seleccionadas aleatoriamente dos lotes classificados. Estes ensaios, em conjunto com procedimentos estatísticos adequados, são usados para afinar os controlos de máquina com vista à correcta classificação em cada classe.

O sistema controlado pela máquina foi desenvolvido inicialmente na Europa e recorre apenas à avaliação contínua de uma propriedade mecânica determinante do grau, não necessitando de testes reais de controlo. A propriedade mecânica que normalmente serve para atribuir a classe é o módulo de elasticidade na direcção do fio, ou seja, existem deformações limite para cada classe tendo em conta uma dada tensão aplicada em contínuo às peças que vão entrando e saindo da máquina para classificação.

Este sistema assenta a sua fiabilidade num esforço contínuo de investigação que permita afinar continuamente a máquina para cada processo de classificação, esforço esse que é reproduzido em contínuo em todas as máquinas instaladas do mesmo tipo.

Não recorre a testes diários de validação à escala real, mas depende também da existência de operadores com conhecimentos mínimos de classificação visual para assegurar a expurga completa de peças com defeitos elevados ou críticos.



Figuras 2.30 e 2.31 – Máquinas de classificação não destrutiva da madeira. À esquerda, a Computermatic, a qual mede a deformação perante uma solicitação seleccionada. À direita, a COOK-BOLINDER, a qual mede a força necessária para se atingir determinada deformação.

2.4.3 Classes de resistência

O princípio das classes de resistência é o da atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma dada população de madeiras para estruturas, de forma simples e objectiva, de modo a facilitar a sua aplicação em trabalhos concretos de estruturas.

Cada classe de resistência é definida por uma sigla que identifica automaticamente as principais propriedades mecânicas a usar nos cálculos, facilitando assim extraordinariamente a especificação por parte dos projectistas.

Tradicionalmente, as propriedades eram associadas às siglas das classes de qualidade, por sua vez atribuídas com base nos requisitos definidos em normas de classificação visual ou mecânica.

O conceito de classes de resistência, implantado na Europa através da norma EN 338, pretende tratar a madeira para estruturas exactamente da mesma forma que o betão armado ou o aço, introduzindo assim um factor de segurança adicional na especificação dos materiais, já que bastará ao projectista definir a classe de resistência que usou no cálculo. Assim, passa a ser obrigação do construtor e da fiscalização garantir que as madeiras aplicadas sofreram um processo de classificação em classes de qualidade que valida a sua inclusão na classe de resistência especificada pelo projectista.

As propriedades físicas e mecânicas especificadas na EN338 para cada classe de resistência associam-se a classes de qualidade. As classes de qualidade resultam da classificação manual ou automática da madeira em função dos seus defeitos.

As classes de resistência mecânica definidas na norma europeia EN 338:2003 "Structural Timber – Strengh classes", encontram-se divididas em C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 e C50, para as resinosas, e D30, D35, D40, D50, D60 e D70, para as folhosas[4]. Esta norma apresenta os valores numéricos das propriedades físicas e mecânicas com interesse para o projecto de estruturas.

Para especificar assim a utilização de uma madeira maciça de pinho ou outra resinosa corrente de qualidade média-baixa, o projectista não necessitará de definir com rigor absoluto a espécie florestal, bastando-lhe referir nas suas peças escritas e desenhadas que a madeira a utilizar será de "pinho ou outra resinosa a aprovar da classe C18 (EN338:2003)". No cálculo à rotura, utilizará o valor médio ou característico das propriedades indicadas na norma (ver Quadro 2.4 e 2.5).

Os valores indicados na EN338 foram obtidos da seguinte forma:

- as principais propriedades físicas e mecânicas (massa volúmica, resistência à flexão na direcção das fibras e módulo de elasticidade) como resultado de campanhas intensivas de ensaios;

- as restantes propriedades mecânicas, como resultado de relações numéricas obtidas por extrapolação estatística de resultados de ensaios, ou seja, essas propriedades são obtidas a partir das 3 principais propriedades através da utilização de relações numéricas simples.

2.4.4 Relação entre a classificação visual e as classes de resistência

O controlo da qualidade da madeira assenta nas normas de classificação visual ou mecânica de madeira para estruturas, pelo que é necessário definir uma forma de relacionar essas normas com as classes definidas na EN338. Esse papel é realizado pela norma EN1912.

A norma europeia EN 1912 : 2004 "Structural Timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species" relaciona a madeira de diversas espécies (identificada pelo nome científico) com os diversos sistemas nacionais de classificação em classes de qualidade e a correspondente classificação em classes de resistência.

O Quadro 2.3 apresenta alguns exemplos concretos.

[4] "C" significa "coniferous", "D" significa "deciduous" e o número indica a resistência característica à flexão na direcção paralela às fibras, "$f_{m,k}$",

A única espécie de madeira com norma de classificação em classes de qualidade existente em Portugal é o Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.). Esta norma, NP 4305: 1995 "Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas – classificação visual" classifica a madeira de pinho bravo nas classes de qualidade "E" e "EE".

Visto não existir uma correlação directa entre o previsto na norma NP 4305 e na norma EN 1912, o "Documento Nacional de Aplicação" do Eurocódigo 5 – parte 1.1, actualmente em processo de revisão, define as propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo das classes "E" ou "EE", correspondendo aproximadamente às classes C18 e C35 da EN 338.

Quadro 2.3 - Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN1912:2004)

Espécie de Madeira	Classe de Qualidade (Norma)	Classe de Resistência
Pinho Bravo (*Pinus Pinaster Ait.)*	EN (NP 4305)	C18[5]
Casquinha (*Pinus Silvestris L.*)	SS (BS 4978) GS (BS 4978)	C24 C16
Espruce (*Picea Abies Kars*)	S13 (DIN 4074) S10 (DIN 4074) S7 (DIN 4074)	C30 C24 C16
Câmbala (*Milícia Excelsea A. Chev. ou M. Regia A. Chev.*)	HS (BS 5756)	D40

2.4.5 Valores de cálculo

Os Quadros 2.4 e 2.5 apresentam os valores das principais propriedades físicas e mecânicas a considerar no cálculo à rotura de estruturas de madeira. Estas tabelas são reproduzidas sem qualquer alteração da tabela que integra a EN338 (2003).

[5] Para a classe E do Pinho Bravo recomenda-se a adopção dos valores indicados na Ficha LNEC M2:"Pinho Bravo para estruturas".

Quadro 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (resinosas)

		Espécies Resinosas											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades resistentes em N/mm^2 (MPa)													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracção	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracção	$f_{t,90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compressão	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão	$f_{c,90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
Corte	$f_{v,k}$	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8
Propriedades de rigidez em KN/mm^2 (GPa)													
Módulo de Elasticidade	$E_{0,mean}$	7	8	9	9.5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de Elasticidade (5º percentil)	$E_{0,k}$	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7	7.4	7.7	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7
Módulo E	$E_{90,\ mean}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53
Módulo de distorção	G	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00
Densidade em Kg/m^3													
Densidade	P_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidade média	P_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Quadro 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (folhosas)

		Espécies Folhosas					
		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades resistentes em N/mm^2 (MPa)							
Flexão	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Tracção	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Tracção	$f_{t,90,k}$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compressão	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressão	$f_{c,90,k}$	8.0	8.4	8.8	9.7	10.5	13.5
Corte	$f_{v,k}$	3.0	3.4	3.8	4.6	5.3	6.0
Propriedades de rigidez em KN/mm^2 (GPa)							
Módulo de Elasticidade	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Módulo de Elasticidade (5º percentil)	$E_{0,k}$	8.0	8.7	9.4	11.8	14.3	16.8
Módulo E	$E_{90,\ mean}$	0.64	0.69	0.75	0.93	1.13	1.33
Módulo de distorção	G	0.60	0.65	0.70	0.88	1.06	1.25
Densidade em Kg/m^3							
Densidade	P_k	530	560	590	650	700	900
Densidade média	P_{mean}	640	670	700	780	840	1080

2.5 Propriedades físicas e mecânicas de peças de madeira aplicadas em estruturas existentes

Conforme atrás se refere, a correcta aplicação da especificação em classes de resistência implica a existência de madeira para estruturas, classificada em classes de qualidade, de acordo com normas aplicáveis. Tal implica, por um lado, a existência no mercado desses materiais, e por outro, a disponibilidade da madeira para classificação, ou seja, a madeira não poderá estar montada de forma oculta e com difícil acesso para apreciação visual.

É assim muito mais complexa a tarefa de avaliar a segurança estrutural de estruturas de madeira

existentes pois, para esse efeito, será necessário avaliar a resistência, o estado sanitário e a integridade dos elementos estruturais que as compõem.

O projectista nacional terá assim de seguir algumas vias simplificadas que a normalização europeia, actualmente de aplicação generalizada em Portugal, lhe disponibiliza.

A figura 2.32 esquematiza esses procedimentos, sendo que os mesmos se baseiam no ponto 6.2.2 da norma EN 338, a qual refere que é possível indexar uma determinada população de madeiras a uma dada classe de resistência, desde que a sua resistência à flexão na direcção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a sua massa volúmica (ρ_m) e o seu módulo de elasticidade médio na direcção paralela às fibras ($E_{0,m}$) sejam todos superiores aos indicados na classe respectiva.

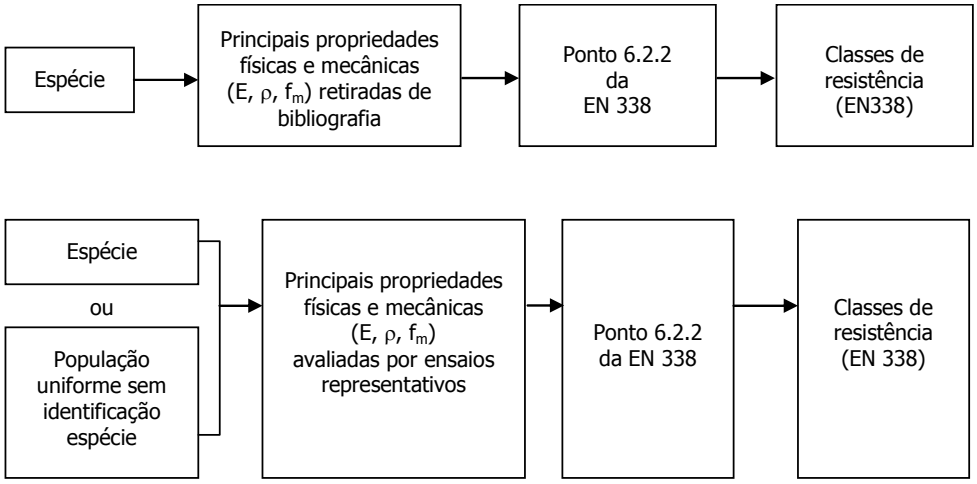


Figura 2.32 - Atribuição de classes de resistência a madeiras em serviço.

Para adoptar os procedimentos ilustrados na figura é assim fundamental conseguir identificar a espécie, o que implica conhecimentos das características visuais das madeiras (cor, largura dos veios de Verão e de Inverno, dureza superficial, diferenças entre o borne e o cerne, etc.) e, muitas vezes, a retirada de uma amostra real que possa ser avaliada em laboratório. A massa volúmica é sempre um indicador fundamental na aferição final de uma dada avaliação.

O Quadro 2.6 representa a aplicação destes princípios às principais madeiras nacionais usadas em Estruturas. Não se inclui o Pinho bravo português por ter uma norma específica de classificação que o inclui na classe C18, desde que tenha defeitos permitam ser enquadrá-lo na classe de qualidade E (NP4305). Os valores das principais propriedades mecânicas foram retiradas da publicação de Albino de Carvalho (Carvalho, 1996), à excepção do módulo de elasticidade, o qual foi deduzido de forma conservadora da consulta de *"Le guide des essences de bois"* (Benoit, 1997).

Quadro 2.6 - Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes

Espécie	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,m}$ (GPa)	ρ_k (Kg/m^3)	Classe EN 338
Castanho (*Castanea sativa*, Mill)	97	10	540	***D30***
Carvalho (Quercus faginea, Lam.)	122	11	800	***D40***
Eucalipto (*Eucaliptus globulus*, Labill)	137	12	765	***D40***
Choupo branco (*Populus Alba*, L.)	80	11	450	***C24***

É importante referir que é sempre essencial aplicar conhecimentos genéricos de classificação de madeiras que possibilitem descobrir as peças cujo estado não lhes permita mais resistir a cargas de forma segura. Os defeitos mais comuns são os resultantes das fendas de diversos tipos e de ataques de fungos e insectos xilófagos. É necessário avaliar a forma das secções residuais de madeira e verificar se ainda estão em condições de assegurar a estabilidade das estruturas onde estão aplicadas, sem recurso a próteses ou à substituição pontual de peças ou partes de peças.

Na avaliação da segurança de estruturas antigas, é também fundamental relacionar as lesões e defeitos resultantes do uso com os esforços a que as peças estão sujeitas, de modo a poder avaliar se esses defeitos são críticos, face aos esforços a que as peças irão estar sujeitas.

Fundamental é ainda descobrir as fendas resultantes de roturas provocadas por esforços mecânicos, muitas vezes provocados por erros humanos de utilização, falhas pontuais de elementos estruturais ou, ainda mais frequente, de falhas nas ligações.

O recurso a metodologias não destrutivas de avaliação da integridade das peças estruturais e da sua capacidade resistente é actualmente uma técnica fundamental de avaliação de estruturas existentes. Esse é o objecto de estudo fundamental desta dissertação e é, por esse motivo, objecto de maior desenvolvimento em outros capítulos da dissertação.

2.6 Principais características de madeiras correntemente usadas em Estruturas de Madeira em Portugal

As espécies de madeira mais correntemente utilizadas na execução de estruturas em Portugal evidenciam uma rigidez não muito elevada, comparativamente com outros materiais de construção,

baixo valor do módulo de elasticidade e uma boa resistência à flexão, tracção e compressão na direcção do fio. A madeira empregue em estruturas apresenta, em geral, um comportamento elástico-linear para solicitações paralelas ao fio e um modo de rotura à flexão e tracção considerado frágil, devido à presença dos defeitos nas peças. Por apresentarem um relativamente reduzido módulo de elasticidade, mesmo na direcção do fio, são bastante deformáveis. Por terem também uma massa reduzida, quando comparada com a capacidade resistente, implicam correntemente a existência de vibrações desagradáveis nas estruturas onde estão aplicadas.

Apresentam-se em seguida, de forma esquemática, as principais características das madeiras correntemente usadas em Portugal, na execução de estruturas.

Quadro 2.7 - Principais características da madeira de Castanho.

CASTANHO

Castanea sativa Mill

Sweet chesnut (in), Châtaigner (fr), Castagno (it), Edelkastanie (al), Castaño (es)

Procedência: bacia mediterrânica da Europa e da Ásia

Disponibilidade: média

Propriedades físicas:

Densidade – 540-590-650 Kg/m^3

Retracção – pouco nervosa

Dureza – média (2,1-2,5)

Durabilidade natural: durável (fungos), sensível (carunchos) e medianamente durável (térmitas)

Impregnabilidade: cerne pouco impregnável, borne medianamente impregnável

Propriedades tecnológicas: colagem, pregagem e aparafusamento sem problemas; requer tratamento prévio com tapa poros.

Descrição:

Madeira de folhosa, pálida ou castanha, de cerne distinto, poro em anel, textura grosseira e não uniforme, desenho venado (tem veios) e por vezes ondulado, dura, leve, fácil de trabalhar e muito durável. Madeira de excelente qualidade semelhante à do carvalho. Conserva-se melhor dentro de água do que exposto ao ar, não resistindo bem se exposto a intempéries, pela variabilidade das condições a que assim está sujeito. É atacado pelo caruncho. Tem larga aplicação nas construções, especialmente em exteriores.

Pelo seu conteúdo em ácidos tende a acelerar a corrosão nos metais, efeito que agrava na presença de humidade. Devido à presença de taninos podem aparecer colorações azuis escuras quando a madeira entra em contacto com metais férricos.

Quadro 2.8 - Principais características da madeira de Eucalipto.

EUCALIPTO

Eucaliptus globulus Labill

Southern blue gum (in), Eucalyptus bleu (fr), Eucalitto blu (it), Blaue eukalyptus (al), Eucalipto blanco (es)

Procedência: existente em praticamente todo o mundo

Disponibilidade: fácil

Propriedades físicas:

Densidade – 740-850 Kg/m^3

Retracção – nervosa

Dureza – semidura (3,9-5)

Durabilidade natural: não durável (fungos) e sensível (insectos)

Impregnabilidade: cerne pouco impregnável, borne impregnável

Propriedades tecnológicas: a colagem requer superfícies muito escovadas; mau comportamento à pregagem e aparafusamento pois tende a rachar; acabamentos sem problemas

Descrição:

Madeira de folhosa, amarelada ou castanho-avermelhada, de cerne distinto, poro difuso, textura uniforme, algo dura, pesada e difícil de trabalhar. Empena e fende com facilidade ao secar. Madeira elástica, resistente e compacta.

Quadro 2.9 - Principais características da madeira de Casquinha.

CASQUINHA

Pinus Silvestris L.

Redwood, Scots pine (in), Pin commun (fr), Pino silvestre (it), Fohre weiss (al), Pino silvestre (es)

Procedência: norte de Ásia e Europa

Disponibilidade: fácil

Propriedades físicas:

Densidade – 500-520-550 Kg/m^3

Retracção – nervosa

Dureza – moderadamente dura (2)

Durabilidade natural: muito pouco durável (fungos), muito sensível (caruncho grande)

Impregnabilidade: cerne não impregnável, borne impregnável

Propriedades tecnológicas: Recomenda-se a colagem logo após a escovagem com colas alcalinas se a madeira for muito resinosa; pregagem e aparafusamento sem problemas, grande resistência ao arrancamento;

Descrição:

Madeira de resinosa, pálida, de desenho venado, moderadamente pesada e dura, fácil de trabalhar. Apresenta canais resiníferos. Fibras rectas.

Quadro 2.10 - Principais características da madeira de Pinheiro bravo.

PINHEIRO BRAVO

Pinus Pinaster Ait

Maritime pine (in), Pin maritime (fr), Pino marittimo (it), Seestrandskiefer (al), Pino gallego (es)

Procedência: zona mediterrânica ocidental

Disponibilidade: fácil

Propriedades físicas:

Densidade – 565 Kg/m^3 (Pinho bravo – Viana); 640 Kg/m^3 (Pinho bravo – Leiria)

Retracção –nervosa

Dureza – moderadamente dura (2,2-3,6)

Durabilidade natural: pouco durável (fungos), sensível (insectos)

Impregnabilidade: cerne não impregnável, borne impregnável

Propriedades tecnológicas: Colagem após escovagem com colas de resorcina e lavagem prévia de superfícies; pregagem e aparafusamento sem problemas; requer tratamento prévio com tapa poros.

Descrição:

A madeira de pinho bravo continua a ser, nos dias que correm, a madeira mais utilizada na construção civil. Deste modo, com base na Ficha de Características do L.N.E.C. (1963), apresentam-se em seguida as principais características desta espécie de madeira:

Madeira de resinosa, de cor amarelo pálido no borne e castanho-avermelhado no cerne, textura grosseira moderadamente dura e pesada, fácil de trabalhar, pouco durável e com alguma capacidade de contracção (a variedade de pinheiro manso é idêntica mas mais nodosa). A existência do cerne varia para cada árvore mas a percentagem de cerne é sempre pouco elevada, particularmente nas árvores jovens ou na região superior do tronco. As camadas de crescimento, distintas, originam nas secções transversais os veios, que podem ser do tipo recto ou espinhado, consoante a intersecção do plano de corte, imprimindo à madeira de pinho o seu característico desenho venado. Os anéis anuais podem ter uma largura variável, embora se mantenha normalmente constante o anel de Outono; são em geral mais largos no centro, junto à medula, e mais apertados na periferia. A madeira é heterogénea, de fio recto e com acentuado odor resinoso.

Quadro 2.11 - Principais características da madeira de Choupo branco.

CHOUPO BRANCO

Populos alba L.

Poplar (in), Peuplier (fr), Pioppo (it), Pappel (al), Chopo europeu (es)

Procedência: Europa Meridional e Central, Ásia e norte de África

Disponibilidade: fácil

Propriedades físicas:

Densidade – 420-440-510 Kg/m^3

Retracção – medianamente nervosa

Dureza – branda (1,2 - 2,6)

Durabilidade natural: pouco durável (fungos), sensível (insectos)

Impregnabilidade: cerne pouco impregnável, borne impregnável

Propriedades tecnológicas: Colagem sem problemas, pregagem e aparafusamento regular. Serragem fácil.

Quadro 2.12 - Principais características da madeira de Carvalho.

CARVALHO

Quercus robur L.

Oak (in), Chêne (fr), Rovere (it), Stieleiche (al), Roble europeu (es)

Procedência: Europa, Ásia Menor, norte de África

Disponibilidade: fácil

Propriedades físicas:

Densidade – 670-710-760 Kg/m^3

Retracção – medianamente nervosa

Dureza – moderadamente dura (3,5 - 4,4)

Durabilidade natural: cerne durável, borne sensível (caruncho pequeno)

Impregnabilidade: cerne não impregnável, borne impregnável

Propriedades tecnológicas: Colagem sem problemas, molduragem fácil, furação perfeita, requer tratamento com tapa poros para aplicação de acabamento. Boa recepção de ceras, velaturas e tintas

CAPÍTULO 3

METODOLOGIAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA – MÉTODOS MODERNOS

3.1 Objecto

A inspecção de estruturas de madeira pressupõe, à partida, e principalmente no caso de existir valor patrimonial, a necessidade de se avaliarem as condições de conservação e as características mecânicas dos diversos elementos, sem se recorrer à sua desmontagem, ou seja, realizando ensaios *in situ* de natureza não destrutiva, com respeito pela lógica construtiva, integridade e valor do edifício e respectivos elementos estruturais.

Nesta linha de actuação, e inserido no âmbito deste trabalho, têm-se desenvolvido métodos modernos de inspecção de elementos estruturais e não estruturais de madeira, que permitem não só avaliar as suas características mecânicas por metodologias não destrutivas, mas igualmente, melhorar a análise e capacidade de caracterização, de forma a aproximar a informação fornecida pelas técnicas tradicionais (como classificação visual, utilização de martelos e lâminas metálicas, caracterização do teor de água, entre outros), porventura demasiado conservadoras, quanto à sua real capacidade resistente. Por exemplo, estudos efectuados referem que a norma espanhola de classificação visual (UNE 56.544) apenas atinge 40% de efectividade real, enquanto que a classificação mecânica por deformação (EN 14081) atinge valores de 65% (Capuz, 2003).

A redução do intervalo de valores entre as técnicas tradicionais e os métodos modernos de inspecção não destrutiva permitirá fornecer dados mais razoáveis, e experimentalmente apoiados, aos projectistas e promotores, condição essencial para que se inverta esta tendência abusiva e inconsciente de diversos agentes da construção que, por incapacidade de análise das condições presentes, invariavelmente optam por substituições ou reforços desadequados de estruturas de madeira, descurando as suas reais potencialidades estruturais.

Seguidamente descrevem-se alguns dos equipamentos e técnicas mais correntes no mercado, suas vantagens e desvantagens/limitações e situações em que deverão ser aplicados.

3.2 Métodos e equipamentos de avaliação não destrutiva

3.2.1 Resistograph

O *Resistograph* é um aparelho que perfura as peças de madeira, medindo a sua resistência à perfuração, em função da energia dispendida. É utilizado quer na inspecção de estruturas de madeira, quer de árvores, desde o ano de 1985, quando foi fabricado, na Alemanha, conhecendo-se o seu uso em diversas situações, como para a inspecção de estruturas de edifícios antigos (Bertolini, 1998), pontes de madeira nos Estados Unidos (Anthony et al., 1998) e avaliação da degradação biológica de árvores.

Apresenta-se como um método de inspecção não destrutivo bastante interessante para aplicação sobre estruturas em serviço, principalmente quando estas têm interesse patrimonial, pois as perfurações que realiza são quase imperceptíveis e sem qualquer influência na resistência mecânica da peça, permitindo assim detectar defeitos internos, variações de densidade e secções dos elementos estruturais, quando tal não é possível medir directamente.

O modelo adoptado no trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação, o **Resistograph 1410 – IML** (fig. 3.1 e 3.2), é constituído pelos seguintes componentes:

- Corpo central do aparelho - elemento perfurador;
- Bateria e impressora portátil;
- Cabos de conexão e carregador de bateria.

Figuras 3.1 e 3.2 – À esquerda, corpo central do Resistograph. À direita, bateria e impressora portátil

A perfuração é realizada a velocidade constante, ajustável pelo utilizador, através de uma agulha de diâmetro de 1,5mm, sendo mais larga na extremidade (3mm). Em função do modelo comercial, estas agulhas podem ter vários comprimentos, sendo que 280mm e 950mm são, respectivamente, os valores mínimos e máximos conhecidos.

No trabalho prático realizado, adoptou-se uma agulha de 400mm, que é o modelo mais correntemente utilizado, por ter características que se adequam melhor à inspecção das estruturas mais comuns de madeira, nomeadamente por ser facilmente manobrável por uma só pessoa, ser fácil de utilizar entre as vigas de madeira de pavimentos (normalmente as vigas de estruturas antigas encontram-se espaçadas de 40cm a 60cm) e possuir uma agulha cujo comprimento permite inspeccionar a maior parte das estruturas de madeira correntes (de notar que apesar de a agulha ter 400mm, apenas garante cerca de 282mm de perfuração efectiva, o que, ainda assim, abrange a generalidade das estruturas mais correntes de madeira).

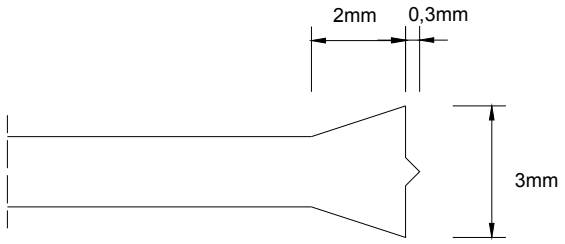


Figura 3.3 – Esquema representativo da agulha de perfuração do Resistograph

O *Resistograph* 1410 permite seleccionar 7 conjuntos diferentes de velocidades de perfuração:

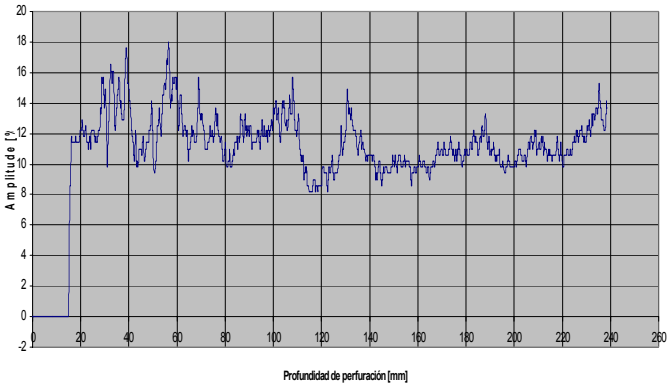
1 – 5 cm/minuto
2 – 10 cm/minuto
3 – 15 cm/minuto
4 – 20 cm/minuto
5 – 25 cm/minuto
6 – 35 cm/minuto
7 – 45 cm/minuto

No trabalho experimental realizado foi recomendado pelo fabricante a adopção da velocidade de perfuração de **20cm/minuto,** em função da espécie presente.

Não fornecendo informação sobre a resistência mecânica da madeira, o *Resistograph* relaciona-se com a massa volúmica, permitindo obter um perfil de variação radial desta ao longo da perfuração, nomeadamente, as diferenças de densidade entre o lenho inicial (ou de primavera) e o lenho final (ou de Outono), assim como perdas de densidade devido a degradações/vazios.

A figura 3.4 ilustra a saída de resultados do *Resistograph*, sendo perfeitamente visíveis os anéis de crescimento, assim como degradações/vazios no perfil radial da peça perfurada. O *Resistograph* fornece igualmente dados numéricos, ou seja, os valores que compõe o gráfico

anterior, de 0,04mm em 0,04mm, os quais podem ser importados para programas de cálculo, como o MICROSOFT EXCEL. Assim, estabelece-se um gráfico matemático que é tratado estatisticamente, nomeadamente retirando-se os valores iniciais e finais (1/6 da amostragem em cada extremidade), e calculando-se um valor médio, que se designa correntemente **Valor de Resistograph (VR)**. No capítulo 3.5.1 expõe-se de forma mais detalhada o cálculo estatístico realizado para a obtenção deste parâmetro.



Drilling depth : 28,19 cm
Identification : 86 F
Advance : 20,0 cm/min (4)
Date : 12.02.2005
Time : 06:26:00
Offset : 06,0%
Avg. curve : off
Diameter : 0,0 cm
Level : 0,0 cm
Direction :
Object species :
Location :

Assessment:
[…]

Measuring data:
Drilling depth [mm] ; Amplitude [%]

000,00 ; 00,0
000,04 ; 00,8
000,08 ; 00,8
000,12 ; 00,8
000,16 ; 00,8
000,20 ; 00,4
000,24 ; 00,4
000,28 ; 00,4
000,32 ; 00,4
000,36 ; 00,4
000,40 ; 00,4
000,44 ; 00,4
000,48 ; 00,4
000,52 ; 00,4
000,56 ; 00,4
[…]

Figura 3.4 – Saída de dados do Resistograph. Em cima, gráfico do perfil de resistência à perfuração. À direita, saída numérica de dados do software do Resistograph.

Pelo facto de perfurar a peça de madeira no sentido transversal, o *Resistograph* efectua medições **radiais** e **tangenciais** (em relação ao tronco da árvore que originou a peça). Na inspecção de estruturas em serviço não é possível distinguir qual o tipo de medição efectuada, porque a secção transversal está, normalmente, oculta, sendo que tem de se considerar um valor médio. Estudos realizados permitem, no entanto, concluir que não existe uma diferença relevante entre os valores de *Resistograph* radiais e tangenciais (Capuz, 2003), sendo que esta consideração não é, pois, errada.

Conforme já foi referido, os valores retirados do *Resistograph* são relacionáveis com as suas propriedades mecânicas, tais como a densidade ou massa volúmica (ρ), o módulo de elasticidade na direcção do fio (E_0) e o módulo de rotura na direcção do fio (f_m). Assim, de forma a ser possível extrair informação quantitativa da inspecção por este método, torna-se necessário estabelecer esta correlação numérica, em função de cada espécie. Existem estudos realizados neste sentido, nem todos de iguais conclusões, correlacionando os valores do *Resistograph* com os valores das propriedades apuradas por ensaios mecânicos destrutivos (f_m e E_0), obtendo-se graus de correlação bastante aceitáveis. São exemplos os estudos de Machado e Cruz (1997), em que se atinge um coeficiente de determinação (R^2) de 58% entre a resistência à furação e a massa volúmica, para Pinho bravo, e de Arriaga (2002), que afirma poder atingir-se um R^2 de 80% entre os valores do *Resistograph* e a massa volúmica, para madeira seca.

Um dos objectivos deste trabalho consiste, pois, em estabelecer uma correlação numérica entre as propriedades mecânicas de um conjunto de provetes de madeira de *Pinus radiata* e os resultados de ensaios por técnicas não destrutivas (*Resistograph* e Ultra-sons), de forma a "calibrar" o *Resistograph* e tornar os seus resultados quantitativamente interpretáveis, para a referida espécie.

3.2.2 Ultra-sons

Este método é um dos ensaios não destrutivos mais utilizado na inspecção de estruturas de madeira e consiste na estimação do módulo de elasticidade dinâmico, com base na relação da velocidade de propagação de ondas acústicas e as propriedades elásticas da madeira. Em função da espécie em análise, é possível correlacionar o seu valor com o módulo de elasticidade estático e com a resistência mecânica do elemento de madeira ensaiado.

A análise da propagação de ondas sonoras pode ser realizada por métodos distintos:

a) Método de ecos

O método de ecos analisa a reflexão das ondas ultra-sónicas em descontinuidades ou superfícies da peça, sendo normalmente utilizada apenas uma sonda (emissora e receptora). Revela-se pouco eficaz na inspecção de elementos heterogéneos, como a madeira, dado a grande dispersão das ondas que os atravessam (Arriaga, 2002).

b) Método de ressonância

O método da ressonância baseia-se na frequência fundamental de vibração de determinado corpo. Mediante a acção de um emissor electrodinâmico de oscilação sobre o elemento de madeira, dá-se um aumento brusco da amplitude de oscilação, pelo fenómeno de ressonância. Em função da frequência de ressonância, densidade e dimensões do elemento de madeira, é possível estimar o seu módulo de elasticidade. Este método implica equipamento bastante complexo, sendo, na maior parte dos casos, utilizado somente para a inspecção de chapas metálicas (Machado, 2003).

c) Método de transmissão

O método de transmissão consiste na propagação de ondas ultra-sónicas de frequência mais baixa do que no método dos ecos, sendo por isso mais adequada para a análise de elementos heterogéneos, pois tem maior alcance e maior capacidade para tornear os defeitos (Arriaga, 2002). Assim, na presença de defeitos/vazios/desvios de fibras, dá-se um fenómeno de refracção das ondas e, consequentemente, uma quebra da sua amplitude e aumento do tempo de propagação. A comparação com ensaios em elementos sem defeitos, da mesma espécie, permite estabelecer relações com a sua qualidade e propriedades mecânicas.

Este método necessita da utilização de duas sondas (uma emissora e outra receptora) e os aparelhos que realizam o ensaio são, normalmente, bastante simples e facilmente manejáveis.
A técnica da transmissão de ondas ultra-sónicas apresenta-se assim como a mais adequada e utilizada para a inspecção de estruturas de madeira.

d) Método de imersão

O método de imersão pode ser considerado como um método de ecos ou de transmissão, distinguindo-se destes apenas pela natureza do acoplante de contacto entre as sondas e a peça da madeira. Neste caso, as peças a analisar encontram-se imersas no próprio acoplante, sendo, para tal, utilizada água (Machado, 2003).

O fundamento físico do método de ultra-sons assenta na relação que existe entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e o módulo de elasticidade dinâmico e estático do elemento ensaiado, traduzida pela seguinte expressão (Bucur e Archer, 1984) (Sandoz, 1989):

$$E_{estático} = K \cdot E_{dinamico} = K \cdot v^2 \cdot \rho \qquad [3.1]$$

em que, $E_{estático}$ - Módulo de elasticidade estático

K – constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira

$E_{dinâmico}$ - Módulo de elasticidade dinâmico

v – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

ρ – massa volúmica

Como se pode verificar, o módulo de elasticidade estático ($E_{estático}$) é diferente do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{dinamico}$), sendo que o primeiro corresponde ao valor que se obtém do ensaio de caracterização em laboratório das propriedades físico-mecânicas de elementos estruturais de madeira (por exemplo, pela norma EN 334).

Existem alguns factores, além dos apontados (massa volúmica, módulo de elasticidade, nós/fendas/vazios), que podem condicionar a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, como a **o teor em água**, a **temperatura**, o **estado de tensão da peça**, a **direcção da medição**, as **diferenças anatómicas entre lenho de Outono e de Primavera**, entre outros.

Segundo Sandoz (1998), a humidade influencia ligeiramente a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, podendo concluir-se que para cada 1% de aumento do valor de humidade, a velocidade decresce 0,8%, numa relação linear, para o intervalo de 5 a 30%.

Em relação à acção da temperatura, sabe-se que o seu aumento diminui a velocidade de propagação, mas não se reconhece esta influência como um factor importante.

De igual forma, a tensão aplicada na peça não é também de grande relevância, dado as pequenas variações da velocidade para diferentes intervalos de tensão aplicados (Arriaga, 2002).

A direcção em que a medição é realizada tem influência nos valores da velocidade de propagação, sabendo-se que a velocidade é superior na direcção longitudinal das fibras, em comparação com as direcções transversais (McDonald, 1978; Bucur, 1995).

Por fim, as diferenças anatómicas existentes entre o lenho de Outono e de Primavera também condicionam a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, sendo que se observa que esta é superior no primeiro caso (Feeney et al., 1998).

Os aparelhos que se encontram mais difundidos no mercado, para a inspecção de estruturas de madeira pela avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons, são o **PUNDIT** (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester) e o **Sylvatest**.

O **PUNDIT** é um aparelho portátil, constituído por sondas cilíndricas para o contacto com a superfície de madeira por intermédio de um acoplante (água, gel ou massas lubrificantes). As sondas são caracterizadas pelo seu pico de ressonância, de 37KHz, 54KHz e 150Khz. O seu funcionamento baseia-se na técnica de transmissão de ondas ultra-sónicas, sendo normalmente utilizado no ensaio de betões ou na avaliação da capacidade resistente, *in situ*, de estruturas de madeira de edifícios antigos (Ceccotti e Togni, 1996; Togni 1995)

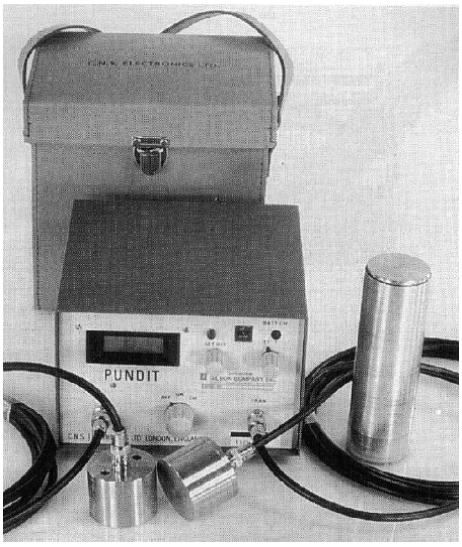


Figura 3.5 – Pundit

O **Sylvatest** é um aparelho portátil especialmente concebido para a inspecção de estruturas de madeira, cuja base de funcionamento é semelhante à do *PUNDIT*, sendo que utiliza frequências mais baixas (20 MHz).

O modelo *Sylvatest* utilizado na parte experimental deste trabalho é constituído por:

- Sylvatest Duo;
- Sylvion (Psion);
- 2 Sondas cónicas, sendo uma emissora e a outra receptora;
- Cabos de conexão.

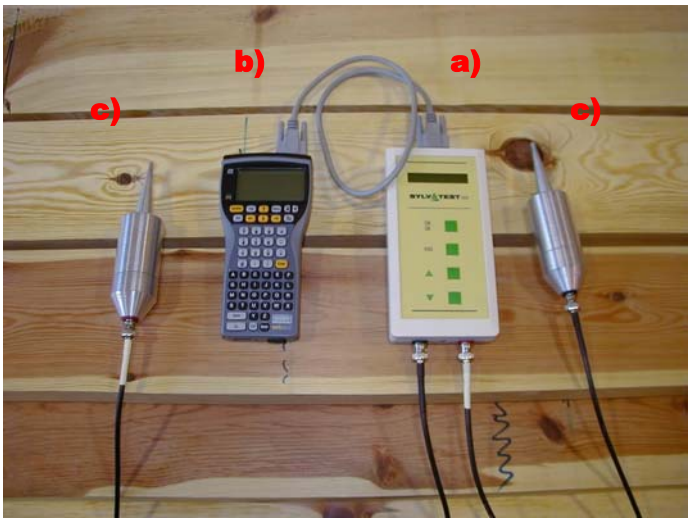


Figura 3.6 – Componentes do aparelho Sylvatest: a) Sylvatest Duo / b) Sylvion (Psion) / c) sondas [Capuz, 2003]

O *Sylvatest Duo* e o *Sylvion* são os aparelhos centrais, que geram a emissão de ondas ultra-sónicas e tratam a informação obtida das sondas, colocando-a à disposição do utilizador. O ensaio pode ser realizado com o uso conjunto do *Sylvatest Duo* e do *Sylvion* ou apenas com o uso do primeiro, sendo que a natureza dos resultados é ligeiramente diferente, conforme se expõe no ponto 3.4.2.

O utilizador terá de caracterizar previamente a peça a ensaiar, nomeadamente em relação à distância entre as duas sondas (único requisito quando se utiliza o *Sylvatest Duo*), tipo de medida (directa ou indirecta), espécie de madeira, teor em água e tipo de secção avaliada.

O ensaio de ultra-sons permite-nos obter o valor da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas – $V_{sylvatest}$ (m/s), o tempo de propagação da onda entre as duas sondas – t (s) e a energia utilizada - ε (mV). Com o valor da velocidade estima-se o módulo de elasticidade dinâmico e estático, de acordo com a expressão [3.1].

O uso do aparelho *Sylvion* associado ao *Sylvatest Duo* permite obter instantaneamente estes resultados, bem como a classificação em classes de resistência (C18, C24, etc.) e o módulo de rotura. No entanto, entendemos que o seu uso deverá ser feito com reservas, pois a informação do fabricante é omissa em relação à metodologia de cálculo utilizada.

Em função dos valores obtidos pelo ensaio de ultra-sons é possível inferir as propriedades mecânicas de peças ensaiadas, aplicando expressões de correlação conhecidas para a espécie em questão, entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e as propriedades mecânicas da madeira. As correlações conhecidas entre as propriedades mecânicas e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas na direcção longitudinal são de certa forma razoáveis, estando na ordem de 63% a 85% (Sandoz, 1989; Machado et. al, 1998).

Perante o exposto, conclui-se que o método de propagação de ultra-sons é interessante para a caracterização do módulo de elasticidade de peças de madeira, ainda que não o seja tanto para a avaliação do seu módulo de rotura, pois este pode ser muito condicionado por defeitos localizados, com menor influência no valor da velocidade de propagação das ondas. Por esta razão, diversos autores sugerem a utilização do método de ultra-sons conjuntamente com outra técnicas (Sandoz, 2000), nomeadamente a classificação visual (segundo Ceccotti e Togni, 1996, é possível atingir, por regressão linear múltipla com o módulo de elasticidade obtido por ultra-sons, o coeficiente de correlação de 80%), o uso da técnica do *Resistograph* (Capuz, 2003), o uso conjunto do Resistograph e raios-X (Bucur, 1985), entre outros.

O uso de ultra-sons também tem interesse na detecção de defeitos localizados como podridões e ataques de insectos xilófagos, fendas (Fuller, 1994), nós (Karsulovic, 2000) e inclinação do fio (Bucur, 1984; Kabir, 2001). Tem igualmente aplicação industrial, nomeadamente, pela possibilidade do seu uso para classificação automática de peças serradas em classes de resistência (Machado, 2003).

3.2.3 Georradar

O Georradar é uma técnica geofísica de alta resolução utilizada para a análise não destrutiva de meios materiais. Ainda que de funcionamento análogo, as suas potencialidades de inspecção são muito superiores aos métodos geofísicos clássicos, como os métodos sísmicos, magnéticos, gravimétricos, etc. É um método utilizado desde os anos cinquenta em áreas como a Geologia, a Engenharia, a Arqueologia, as Minas, etc.; sendo que na área de inspecção de estruturas de madeira está ainda num período de desenvolvimento inicial.

O seu funcionamento baseia-se na análise da propagação de ondas electromagnéticas, na banda de frequências UHF-VHF (normalmente entre 100 MHz e 1,5 GHz), emitidas por impulsos de curta

duração, sendo captadas por antenas. A propagação destas ondas é função da heterogeneidade do meio que atravessam, provocando fenómenos de reflexão, refracção e difracção. A antena receptora capta as diferenças de energia electromagnética, e assim pode-se caracterizar o meio atravessado, através das alterações das propriedades magnéticas dos materiais.

A propagação de ondas num campo electromagnético é um fenómeno bastante complexo, que envolve mecanismos de polarização, condução eléctrica e trocas de energia entre os campos electromagnéticos e os materiais. Por sua vez, estes mecanismos são influenciados pela temperatura, pressão, frequência do meio, etc. Assim sendo, dado o âmbito deste trabalho, neste capítulo apenas se faz uma breve abordagem, aos fundamentos teóricos, o esquema de propagação de ondas e os factores que o influenciam.

Os principais parâmetros que caracterizam os campos eléctricos são a **intensidade de campo eléctrico**, a **indução eléctrica**, a **densidade de corrente,** a **intensidade do campo magnético** e a **indução magnética** (García, 1997).

A propagação das ondas é definida através das expressões de Maxwell para ondas electromagnéticas, relacionando os campos magnéticos e eléctricos com as suas fontes. Esta relação é completada com as chamadas equações de continuidade, as quais caracterizam o comportamento deste campos em zonas onde há distribuições superficiais de carga, ou melhor, descontinuidades no meio atravessado (García, 1997).

Os principais parâmetros magnéticos dos materiais que interessa analisar por este método são a constante dieléctrica, a permeabilidade magnética e a condutividade eléctrica:

- ε_a - constante dieléctrica absoluta (F/m).
- μ_a - permeabilidade magnética absoluta (H/m).
- σ - condutividade eléctrica relativa (S/m).

O percurso das ondas electromagnéticas é traduzido por um perfil de variação vertical, denominado de registo de radar ou radargrama, o qual corresponde a um mapa de variação dos parâmetros magnéticos, mediante uma escala pré-definida de cores para valores dos parâmetros magnéticos dos materiais.

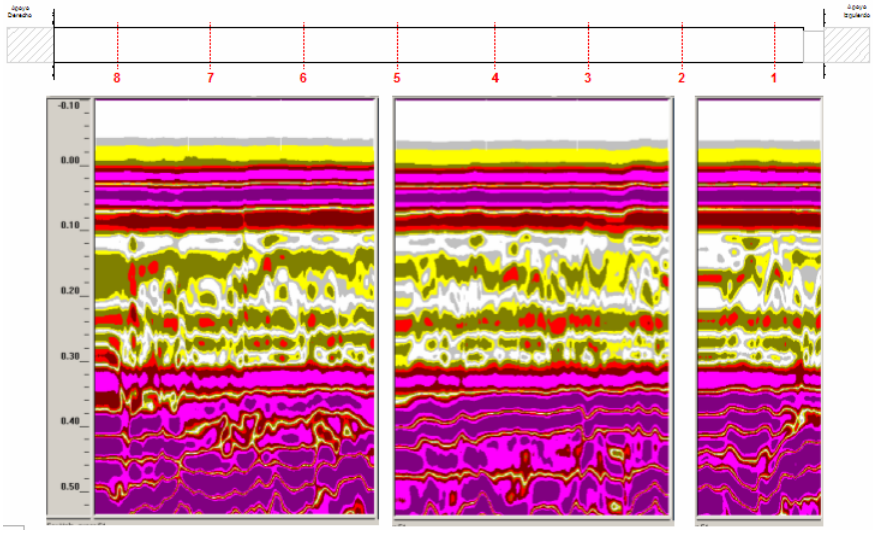


Figura 3.7 – Exemplo de um radargrama, relativamente ao perfil de variação longitudinal de uma viga de madeira

A velocidade de propagação das ondas electromagnéticas é dada pela seguinte expressão:

$$t = \frac{2H}{v} \quad \text{e} \quad v = \frac{c}{\varepsilon'} \qquad [3.2]$$

em que, v - velocidade de propagação das ondas
c – velocidade da luz
t – tempo de propagação e reflexão da onda
H – profundidade da onda electromagnética
ε' – constante dieléctrica

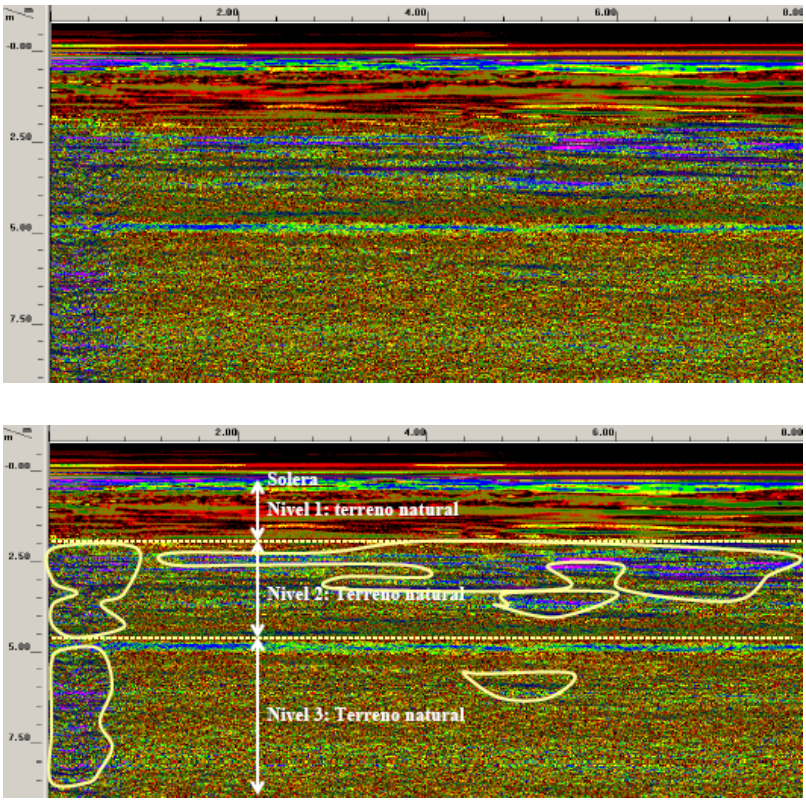
Os parâmetros electromagnéticos são influenciáveis por vários factores, como a temperatura, a densidade, a dureza, e outras, mas a variação do teor em água apresenta-se como o de maior relevância na interpretação dos resultados fornecidos por este tipo de método de inspecção. Assim, para pequenas flutuações deste parâmetro, verificam-se grandes variações da constante dieléctrica, e consequentemente, da velocidade de propagação das ondas. Desta forma, é possível localizar facilmente, por exemplo, nas estruturas de madeira, focos de humidade/degradação, pois os valores da constante dieléctrica ou da velocidade são muito superiores aos valores conhecidos para a madeira.

Uma metodologia de inspecção, aplicada a estruturas de madeira ou outros elementos construtivos, passa pois, por se conhecer previamente as características eléctricas dos materiais que constituem o meio (quadro 3.1), e detectar a existência de diferentes materiais e/ou focos de humidades ou fendas, pela diferença de valores em relação aos esperados.

Quadro 3.1 – Valores de características eléctricas de vários materiais, para uma frequência de medição de 100 MHz [Cabanes, 2005]

Litología/ substancia	σ S/m	Γ dB/m	ε'	v_r m/µs
Aire	0	0	1	300
Agua dulce	10^{-3}	0.18	81	33
Agua salada	4	330	81	33
Arenas secas	$1.5 \cdot 10^{-4}$	0.14	3	170
Arenas húmedas	$7 \cdot 10^{-3}$	2.3	25	60
Arcillas secas	$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.28	3	170
Arcillas húmedas	$5 \cdot 10^{-2}$	20	15	78
Granito seco	10^{-8}	10^{-5}	5	130
Granito húmedo	10^{-3}	0.6	7	110
Basalto húmedo	10^{-2}	5.6	8	110
Pizarra arcillosa húmeda	10^{-1}	45	7	110
Areniscas húmedas	$4 \cdot 10^{-2}$	24	6	120
Calizas húmedas	$2.5 \cdot 10^{-2}$	14	8	110

Este método permite também a fácil análise qualitativa, através do recurso à análise directa dos perfis de variação verticais ou mesmo de reconstruções tridimensionais dos elementos construtivos, após cruzamento de informação de medições realizadas em diferentes direcções. Apesar de não fornecerem informação numérica passível de ser correlacionada com outros métodos, estes diagramas são de grande utilidade na inspecção de elementos construtivos, pois permitem visualizar perfeitamente a existência de diferentes materiais e/ou focos de humidade/degradações ou fendas.



Figuras 3.8 e 3.9 – Em cima, **d**iagrama de perfil de variação vertical. Em baixo, diagrama de perfil de variação vertical, sendo ilustrado os diversos estratos presentes [Cabanes, 2005]

O Georradar é constituído pelos seguintes elementos:

- Unidade central e monitor;
- Antenas;
- Outros acessórios

a) Unidade Central

A unidade central é o elemento que coordena o funcionamento dos restantes aparelhos, ao qual todos se encontram conectados. É responsável pela emissão dos impulsos magnéticos, através das antenas, e pelo tratamento, visualização e armazenamento da informação resultante. Permite ainda alterar a amplificação do sinal emitido, condicionando o tempo de propagação e a precisão dos resultados.

Possui um software informático que permite visualizar, no monitor da unidade central, e configurar a saída de resultados deste processo de ensaio. Assim, é possível ao utilizador escolher entre a representação dos resultados por curvas, em que se determina a amplitude do sinal em cada instante, ou perfis de cor, em que cada gama de amplitude é representada por uma cor, que se selecciona previamente. Esta última é a forma de representação mais imediata e de maior facilidade na interpretação dos resultados (figuras 3.8 e 3.9).

b) Antenas

As antenas actuam como um transdutor electromagnético, uma vez que transformam os impulsos eléctricos, emitidos pela unidade central, em ondas electromagnéticas que se propagam pelo meio, em frequências que variam com o tipo de antena utilizada.

As ondas electromagnéticas são transmitidas através de impulsos de curta duração com potência suficiente para ter resolução até 30 ou 40m de profundidade, em função da direcção e frequência adoptada para as antenas. Existem diversas gamas de frequências em antenas, sendo geralmente da ordem dos 1.5 GHz, 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz, 200 MHz e 100 MHz. A frequência deverá ser escolhida em função da necessidade de utilização, sendo que quanto maior é o seu valor, maior é a precisão e o grau de resolução, mas também maior é a atenuação do sinal e consequentemente, menor é a profundidade de penetração. Por exemplo, para trabalhos em que se pretende identificar humidades ou diferentes materiais em paredes, é normal utilizar antenas de 1.5 GHz de frequência, que garantem grande precisão de análise, ainda que o sinal se atenue drasticamente a poucos centímetros de profundidade.

Além de emitirem as ondas electromagnéticas da forma atrás descrita, as antenas têm também a capacidade de receber a energia reflectida pelas descontinuidades electromagnéticas do meio atravessado e que regressa à superfície.

As antenas podem ser monoestáticas ou biestáticas, conforme a emissão-recepção das ondas electromagnéticas é realizada por uma ou duas antenas.

c) Outros acessórios

Por fim, o Georradar pode ser constituído por outros acessórios como um odómetro electrónico ou survey wheel (permite obter distâncias com grande precisão), impressora (possibilidade de ter, em campo, um registo em formato papel dos resultados) ou unidades de disco para registo magnético dos dados. Sendo um aparelho de funcionamento eléctrico, é também constituído por fontes de alimentação eléctrica, como pilhas secas (por exemplo de 12V) ou baterias.

Figuras 3.10 e 3.11: Á esquerda, Georradar modelo SIR-3000 – unidade central, onde se podem ver os perfis electromagnéticos do meio. Em cima, antena do Georradar. [Cabanes, 2005]

Resumindo, o Georradar é um método de inspecção de grande utilidade na área do Património Edificado, dada a sua natureza de método não destrutivo e a possibilidade de fornecer informação de grande precisão e interesse como detecção de diferentes materiais, humidades e fendas em elementos como estruturas de madeira, alvenarias, pavimentos, abóbadas, etc. Porém, torna-se necessário que se desenvolvam estudos que quantifiquem esta informação, de forma a poder ser correlacionável com outros métodos de inspecção não destrutiva.

3.2.4 Método das vibrações induzidas

Este método consiste na medição da velocidade de propagação de ondas de choque ao longo das fibras da madeira, podendo ser um bom indicador das suas propriedades mecânicas. Conhecendo-se a geometria e valores de propriedades mecânicas de peças da mesma espécie, previamente ensaiadas, é possível estabelecer-se correlações que permitam obter parâmetros como o módulo de elasticidade, a massa volúmica, etc. Da mesma forma, e uma vez que as ondas de choque se propagam mais rapidamente em madeira sã do que em madeira degradada, é possível identificar podridões/defeitos/vazios interiores, tal como na técnica de medição da velocidade de propagação de ultra-sons. Assim, à semelhança deste, pela sua natureza de funcionamento, o método das vibrações induzidas tem diversas aplicações na inspecção das estruturas de madeira, como a possibilidade de caracterização mecânica, classificação de estruturas, detecção de degradações/vazios e controlo de qualidade das peças.

De entre os aparelhos existentes no mercado, cujo funcionamento se baseia na análise de vibrações induzidas, destaca-se o METRIGUARD, por estar mais difundido e por ter grande aplicabilidade na inspecção de estruturas de madeira, sendo que o mesmo é constituído por (figura 3.13 e 3.14):

- Unidade central;
- Martelo de impacto;
- 1 ou 2 acelerómetros.

A **unidade central** é o elemento onde a informação recolhida pelos acelerómetros é tratada e posta à disposição do utilizador. A este aparelho estão ligados os acelerómetros e o martelo de impacto, assim como as alimentações à corrente eléctrica (tanto pode funcionar com pilhas alcalinas de 9V como por alimentação directa da electricidade) e outros acessórios, como mesas de ensaio com acelerómetros incluídos (cujo sistema de funcionamento é específico para ensaios laboratoriais). É bastante leve (2,3Kg, variável com a referência comercial) e de pequenas dimensões (230x150x200mm, variável com a referência comercial), sendo facilmente portátil e manejável, o que é bastante útil na inspecção de estruturas.

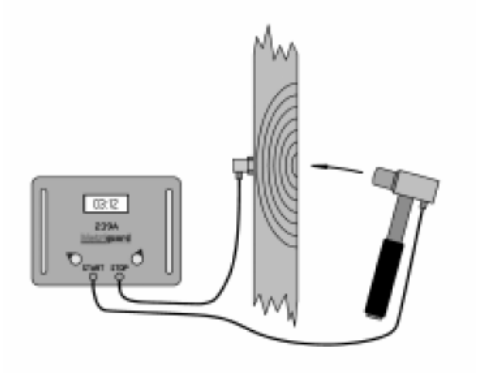


Figura 3.12 - Esquema de funcionamento do aparelho METRIGUARD

Pela sua facilidade de utilização e pela natureza da informação que produz, este método pode ser aplicado com bons resultados em diversas situações:

- Detecção de podridões/defeitos/vazios em árvores em serviço e postes de telecomunicações em madeira (de utilização muito difundida nos Estados Unidos da América);
- Inspecção de estruturas de madeira;
- Medição da integridade e comprimento de estacas de pontes (Anthony, 1998).

Figuras 3.13 e 3.14 - Componentes do aparelho METRIGUARD: À esquerda, unidade central. À direita, martelo de impacto.

3.2.5 Medição da densidade superficial - Pylodin

A medição da densidade superficial da madeira constitui uma técnica de inspecção não destrutiva, sendo a mesma realizada por um aparelho denominado de **Pylodin**. Este consiste num cilindro metálico, constituído no seu interior por uma barra metálica circular de 2,5mm, a qual é introduzida na madeira por impacto, com determinada energia. Em função da profundidade de penetração, cujo valor máximo é de 40mm, é possível estabelecer relações com a dureza da madeira na direcção transversal e, consequentemente, com a sua densidade ou massa volúmica.

Figura 3.15 – PYLODIN – Aparelho de medição da densidade superficial

O interesse deste método para a inspecção de estruturas de madeira é discutível, por um lado, porque as correlações obtidas com a resistência da madeira não são significativas (Bonamini e tal., 1992), e por outro, porque a avaliação do estado superficial das peças de madeira pode ser facilmente substituída por técnicas tradicionais, como o uso de martelos ou lâminas metálicas.

Esta técnica é semelhante ao esclerómetro utilizado para avaliar qualitativamente, *in situ*, a resistência de estruturas de betão armado.

3.2.6 Detecção acústica de insectos xilófagos

Como a sua designação induz, esta técnica consiste na utilização de aparelhos para a detecção de insectos xilófagos, nomeadamente térmitas e cerambicídeos, pela captação e amplificação das ondas sonoras que estes produzem durante a sua actividade, as quais se propagam através das fibras da madeira. Em função do volume e natureza do sinal sonoro produzido, é possível, para alguns modelos comerciais, estimar a intensidade do ataque e distingui-lo da acção de outros organismos vivos, como por exemplo, os roedores.

Apresenta-se como de grande utilidade na inspecção de estruturas de madeira *in situ*, dado que permite detectar zonas atacadas, as quais poderiam eventualmente não ser identificadas por uma simples inspecção visual, e controlar a eficiência de tratamentos realizados.

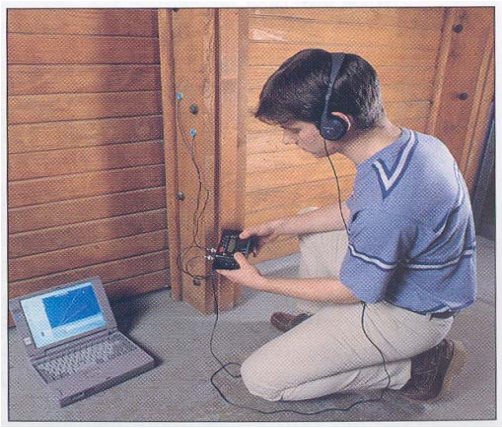


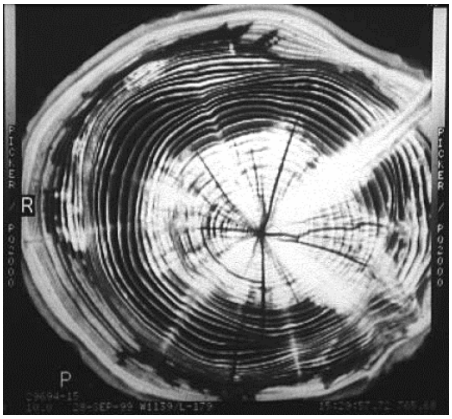
Figura 3.16 – Detecção acústica de insectos xilófagos.

3.2.7 Radiografia - raios X e raios gama

O raios-X é uma tecnologia conhecida desde 1895, quando Roentgen formalmente anunciou a sua descoberta, mas o seu uso para inspecção de estruturas de madeira apenas se conhece a partir dos anos 60 (Anthony, 2005). Ainda assim, foi uma das primeiras técnicas a ser utilizadas com este propósito.

O método baseia-se na transmissão de energia radiográfica através do material a inspeccionar, sob a forma de raios-X, fornecendo uma imagem da sua constituição. Uma vez que a densidade do material condiciona a quantidade de radiação que o atravessa, o resultado consiste num

esquema bidimensional da variação de densidade do elemento atravessado. Esta técnica tem sido, pois, bastante utilizada, pelo facto dos seus resultados permitirem identificar degradações, vazios e elementos diversos (ligadores, diferentes materiais, entre outros) sem perturbar o funcionamento da estrutura.



Figuras 3.17 e 3.18 – À esquerda, equipamentos para a aplicação da técnica de raios-X à inspecção de estruturas de madeira. À direita, exemplo da saída de resultados do ensaio por raios gamma.

No entanto, o seu elevado custo e possível perigosidade das radiações que emite, levou a que fosse progressivamente abandonada, em detrimento da radiografia por raios gama (ou radiografia digital). Esta, por sua vez, tem diversas vantagens sobre a radiografia por raios-X, quer pela menor perigosidade do tipo de radiações que utiliza, quer pelo menor custo, mas principalmente, por fornecer uma imagem do elemento em análise em tempo real, isto é, funcionando como uma câmara.

3.2.8 Dendocronologia

A dendocronologia consiste numa metodologia de inspecção a partir da qual se consegue apurar, com grande precisão, o tempo de vida de determinado elemento estrutural de madeira. O fundamento do método consiste na análise dos anéis de crescimento da madeira, a partir dos quais, e com base no estudo das características específicas da espécie em questão, é possível inferir o tempo de vida do elemento inspeccionado. Conforme já foi referido, a espessura dos anéis de crescimento pode ser distinta para cada espécie e é o resultado das condições de desenvolvimento da árvore.

A disposição dos anéis de crescimento pode ser observada na secção transversal da peça de madeira, o que não é, regra geral, possível em elementos de madeira de estruturas em serviço, pelo facto dos mesmos estarem ocultos nas alvenarias de suporte ou ligados topo a topo a outras peças de madeira. Desta forma, normalmente são retiradas pequenas carotes do elemento estrutural, no seu sentido transversal, para análise dos anéis de crescimento (figura 3.19).

Figura 3.19 – Extracção de uma carote de uma viga de madeira.

Esta técnica tem bastante interesse na qualificação de Património histórico-artístico e pode, igualmente, fornecer informação qualitativa com grande utilidade na avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais, nomeadamente na compreensão de fenómenos de fadiga e de fluência.

Por fim refira-se que a dendocronologia apenas pode ser aplicada a espécies de formação lenhosa "uniforme", ou seja, com a formação de anéis de crescimento definidos, como é o caso das madeiras resinosas e algumas espécies de folhosas (Carvalho, entre outras).

3.2.9 Resumo

Conforme exposto, existem várias técnicas de índole não destrutiva para a inspecção de estruturas de madeira, cada qual com a sua especificidade, fiabilidade e aplicação. No Quadro 3.2 apresenta-se um resumo das principais metodologias e instrumentos de ensaio existentes no mercado, para a inspecção e caracterização mecânica de estruturas de madeira.

Quadro 3.2 - Resumo de métodos de ensaio não destrutivos para inspecção de estruturas de madeira. [Adaptação de quadro semelhante apresentado em Machado, 2003]

Técnica não destrutiva	Medição efectuada	Propriedade a estimar	Meios disponíveis	Ref. Bibliográficas
Análise de imagem	Imagem superficial da madeira	• defeitos • anéis de crescimento		Pham e Alcock (1998)
Classificação visual	Avaliação visual de defeitos e massa volúmica	• $E_{m,0}$; F_m	• Normas de classificação visual	Machado (1994) Glos (1995)
Introdução de esforços mecânicos	Avaliação do $E_{m,0}$	• F_m	• Normas de classificação mecânica	Boström e Holqvist (1999) Glos (1995)
	Avaliação da resistência ao impacto	• Dureza e $F_{C,90}$	• Pylodin	Giuriani e Gubana (1993)
	Avaliação da resistência à perfuração	• ρ	• Resistograph	Rinn (1994) Capuz (2003)
Micro-ondas	Velocidade e atenuação da onda	• teor de água • detecção de defeitos • inclinação do fio • ρ	• Finnograder	Boström (1994) Leicester e Seath (1996)
Propagação de ondas de choque (1)	Alteração de parâmetros da onda (incluindo a velocidade)	• $E_{m,o,dyn}$	• Sylvatest • Metriguard stress wave timer • Pundit	Bucur (1995) Govindarajoo e tal. (1994) Sandoz (1990)
Propriedades eléctricas	Constante dieléctrica	• Inclinação do fio	• Model 520 Grain Angle Indicator	Cramer e MacDonald (1989)
Propriedades electromagnéticas	Propagação de ondas electromagnéticas	• Teor de humidade • Detecção de defeitos /vazios/ degradações • Constante dieléctrica	• Georradar GPR (Ground Penetrating Radar) – modelo SIR-3000 Geophysical Survey Inc.	Garcia (1997)
Raios gamma		• ρ	• Finnograder • RDS probe	Boström (1994) Madsen (1994)
Raios X	Absorção de radiação	• ρ • detecção de defeitos	• CAT – Portable computer-aided tomographic scanner • X-ray Lumber Gauge	Ziegler (1997)
Vibração	Frequência de ressonância	• $E_{m,0}$	• Metriguard transverse vibration • E-computer	Cai et al. (2000)

(1) Embora no presente quadro esta técnica abranja a propagação de ondas no campo sonoro e ultra-sónico, nas referências de língua inglesa esta técnica é subdividida nas técnicas designadas de *stress wave methods* e *ultrasonic based methods*, respectivamente.

3.3 Vantagens e inconvenientes dos métodos e equipamentos de inspecção não destrutiva

Apresenta-se em seguida um resumo das principais vantagens e desvantagens/aplicações de

algumas das técnicas de inspecção não destrutiva de estruturas de madeira, com maior difusão no mercado.

3.3.1 Resistograph

Vantagens:

- Facilidade de utilização, sendo apenas necessário um operador, para determinados modelos e condições de inspecção;
- Possibilidade de se detectarem podridões/vazios/defeitos interiores, não visíveis por inspecção visual;
- Informação qualitativa de grande interesse, pois fornece um registo desenhado da variação da resistência à perfuração, à escala 1/1, facilmente interpretável;
- Possibilidade de avaliar o estado de conservação de elementos estruturais não acessíveis, por exemplo, por estarem encobertos por outros.

Desvantagens/Limitações:

- É um método que implica algum dispêndio de tempo no tratamento estatístico dos dados, pelo que a sua utilização deverá ser considerada em função da natureza e importância da intervenção a realizar;
- Existem algumas limitações no fundamento do método que poderão induzir em erros, sobretudo quando se pretende deduzir valores quantitativos;
- O técnico deverá ter conhecimento das propriedades da madeira, de forma a ser capaz de analisar correctamente determinados aspectos da saída de dados, como a identificação de anéis de crescimento e zonas dos lenhos inicial e final, capacidade de distinção entre medições radiais e tangenciais, identificação de defeitos, entre outros.

3.3.2 Ultra-sons

Vantagens:

- Bom estimador do módulo de elasticidade de elementos de madeira, obtendo-se boas correlações deste parâmetro com o valor da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas no sentido longitudinal, quando utilizado conjuntamente com outras técnicas de inspecção, como a classificação visual, o Resistograph, o raios-X, entre outros;
- Possibilidade de obtenção de um perfil de variação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade à flexão) ao longo do comprimento das peças de madeira (Machado, 2003);
- Bastante útil na detecção de defeitos localizados como nós, fendas, vazios e degradações (Machado, 2003);
- Grande facilidade de uso, devido ao seu pequeno porte, peso e simplicidade metodológica do ensaio;

- Adequado para a inspecção de estruturas *in situ*, quer pelo exposto nos pontos anteriores, quer por permitir ensaiar peças com apenas uma face acessível e não danificarem o elemento ensaiado;
- Baixo custo, comparando com outras técnicas de inspecção não destrutiva de elementos de madeira.

Desvantagens/Limitações:

- Não é um método muito adequado para estimação do valor do módulo de rotura de estruturas de madeira, dado que este pode ser muito condicionado pela existência de defeitos localizados, os quais, por sua vez, podem ter pouco reflexo sobre o valor global da velocidade de propagação de ultra-sons no elemento ensaiado. Porém, no caso de peças limpas de defeitos, a situação é distinta, sendo que este método possui a capacidade de estimar a tensão de rotura à flexão e a massa volúmica com boa precisão (Machado, 2003);
- Necessário o conhecimento da espécie e da massa volúmica do elemento ensaiado. Nos casos em que o técnico não é capaz de obter essas respostas *in situ,* através de inspecção visual, terá de se proceder à extracção de provetes para análise laboratorial ou aplicar intervalos de classificação retirados da bibliografia (este ponto será adequadamente desenvolvido no capítulo 3.4);
- Implica uma metodologia de ensaio cuidada, nomeadamente garantindo a existência em todos os ensaios efectuados das mesmas condições de contacto entre as sondas e a madeira, pois os resultados podem ser influenciados por esse facto.

3.3.3 Georradar

Vantagens:

- Informação de grande precisão;
- Possibilidade de detecção de diferentes materiais, humidades e fendas em elementos como estruturas de madeira, alvenarias, pavimentos, abóbadas, entre outros;
- Possibilidade de se estabelecer uma reconstrução tridimensional com as características electromagnéticas do elemento inspeccionado, tornando os resultados bastante visuais e de fácil interpretação.

Desvantagens/Limitações:

- É uma metodologia que possibilita conclusões assentes, sobretudo, em bases qualitativas, sendo necessário realizar mais estudos que garantam resultados numéricos, passíveis de se correlacionarem estatisticamente com outros métodos de inspecção;
- Os seus resultados são bastante sensíveis a pequenas variações de humidade;

- Tratamento de dados moroso e complexo, pelo que a sua utilização deverá ser considerada apenas em casos cuja importância arquitectónica e artística assim o exijam.

3.3.4 Método das vibrações induzidas

Vantagens:

- Facilidade de utilização, sendo que em determinados modelos pode ser manejado por apenas um operador;
- Obtenção de um perfil de variação longitudinal da peça, sendo possível detectar podridões/vazios/defeitos interiores, não visíveis por inspecção visual.

Desvantagens/Limitações:

- Bastante variável com a orientação das fibras (Ross et al, 1995);
- Nem sempre é possível aplicar em estruturas em serviço, dada a necessidade de que ambas as faces da peça estejam acessíveis. Para medições longitudinais torna-se difícil a sua aplicação, pois normalmente os topos das vigas não estão acessíveis.

3.3.5 Medição da densidade superficial - Pylodin

Vantagens:

- Método simples para estimar o estado de conservação superficial e a secção residual de peças de madeira;
- Grande facilidade de utilização.

Desvantagens/Limitações:

- Não garante correlações significativas com a resistência mecânica das madeiras;
- Apenas é capaz de caracterizar o estado superficial da peça, não sendo sensível à existência de defeitos/degradações/vazios no seu interior;
- Pode ser substituído por técnicas tradicionais, em inspecção corrente.

3.3.6 Detecção acústica de insectos xilófagos

Vantagens:

- Possibilidade de detectar a natureza e extensão do ataque de insectos xilófagos quando este ainda não é visível no exterior do elemento atacado;
- Grande utilidade na detecção das zonas atacadas e controlo de eficiência de tratamentos realizados;
- Facilidade de utilização, por simplicidade instrumental e metodologia de análise.

Desvantagens/Limitações:

- Não é um método de avaliação da capacidade resistente da madeira, mas apenas de detecção da existência de ataques biológicos por insectos xilófagos. Da mesma forma, não fornece qualquer informação em relação à secção residual das peças.

3.3.7 Radiografia - raios X e raios gama

Vantagens:

- Excelente método de avaliação qualitativa, pelo facto de fornecer resultados de grande precisão e informação visual, sob a forma de registos radiográficos bidimensionais, no caso dos raios-X, e registos radiográficos em tempo real, no caso da radiografia digital;
- Possibilidade de detectar facilmente degradações, vazios e elementos diversos no interior das peças.

Desvantagens/Limitações:

- Custo elevado (principalmente, a radiografia por raios-X);
- As radiações utilizadas podem representar algum perigo para os seus utilizadores, ainda que os modelos mais recentes estejam cada vez mais seguros em relação a este aspecto;
- A portabilidade dos aparelhos não é a mais adequada, quando se pretende inspeccionar estruturas de difícil acesso;
- Necessária alguma investigação que torne mais úteis os resultados quantitativos fornecidos por este método, no que respeita à avaliação da degradação dos elementos (Anthony, 2005)

Tendo em conta esta lista de vantagens e desvantagens, percebe-se que existem inúmeras técnicas não destrutivas para a inspecção e avaliação mecânica de estruturas de madeira, cada uma com as suas características particulares e específicas. Embora permitam retirar informações, principalmente qualitativas, valiosíssimas na avaliação de estruturas *in situ*, estas técnicas deverão ser correlacionadas entre si e complementadas por técnicas tradicionais de inspecção (classificação visual, entre outras), de forma a aumentar o grau de fiabilidade e de segurança da inspecção.

Este procedimento exige-se na avaliação das propriedades mecânicas das madeiras, principalmente para a estimação dos valores da resistência, pois nenhum destes métodos, por si só, é capaz de o fazer com um grau de confiança aceitável.

É, pois, indispensável que se desenvolvam estudos no sentido de se melhorar os métodos existentes e/ou de permitir estabelecer correlações interessantes entre as diversas técnicas, de modo a que se consiga melhorar as metodologias correntes de classificação resistente de

estruturas de madeira, as quais assentam invariavelmente sobre as conservadoras classificações visuais.

Por fim, apresenta-se um conjunto de critérios de selecção relativos à opção sobre a técnica de inspecção não destrutiva a aplicar, em função do objectivo da avaliação (Quadro 3.3):

Quadro 3.3 – Critério de escolha da técnica não destrutiva a utilizar, em função do objectivo da inspecção.

Objectivo da inspecção	Técnica não destrutiva
Identificação da espécie de madeira	- inspecção visual - análise laboratorial
Identificação de tipo de degradação biológica	- inspecção visual - detecção acústica
Detecção da extensão de degradação biológica	- meios tradicionais (lâmina metálica, martelo, etc.) - Resistograph - Raios-X - Método das vibrações induzidas – METRIGUARD - Georradar - Sylvatest
Classes de qualidade	- observação visual - Sylvatest - Georradar - Raios-X
Teor de água	- humedímetro - Georradar (de forma indirecta)
Detecção de defeitos localizados	- Sylvatest - Resistograph - Raios-X - Método das vibrações induzidas – METRIGUARD
Determinação do Módulo de Elasticidade	- Sylvatest - Resistograph - Método das vibrações induzidas - METRIGUARD
Determinação da massa volúmica	- Resistograph
Determinação da densidade superficial	- Pylodin
Datação das madeiras	- Dendocronologia

3.4 Metodologia de atribuição de classes de resistência a madeiras existentes por ensaios não destrutivos – Resistograph e Sylvatest

Pretende-se neste capítulo, expor a metodologia de atribuição de classes resistentes de acordo com as duas técnicas de inspecção não destrutivas, cuja utilização serviu de base ao estudo desenvolvido nos capítulos 4 e 5: o *Resistograph* e o *Sylvatest*.

3.4.1 Resistograph

3.4.1.1 Considerações gerais

Conforme já exposto no capítulo 3.2.1, o *Resistograph* fornece um perfil de variação radial da resistência à perfuração, o qual é alvo de um tratamento estatístico, de forma a permitir obter um valor médio, denominado de ***Valor de Resistograph*** **(VR)**.

Neste capítulo explica-se como é realizado este tratamento e de que forma se poderão relacionar os resultados obtidos com as características mecânicas dos elementos de madeira ensaiados.

No que concerne à metodologia de ensaio e respectivas precauções a tomar, apenas convém referir a necessidade de se manter o aparelho numa posição estável e perpendicular à face a perfurar, de modo a que este não se mova durante o ensaio, pois solicitações transversais podem danificar a agulha e/ou alterar os resultados.

3.4.1.2 Resultados e metodologia de atribuição de classes resistentes

O *Resistograph 1410 – IML Resi B300* fornece, como saída de resultados, um gráfico de variação da resistência à perfuração, em função da profundidade, em formato de papel (no corpo central do aparelho) e formato informático (tabela de dados numéricos que dão lugar ao gráfico). Este gráfico, que denominaremos como *Gráfico Máquina*, quantifica os valores de resistência à perfuração de 0,04mm em 0,04mm.

De forma a poderem ser tratados estatisticamente, os valores do Gráfico Máquina são transformados num ficheiro tipo TXT e, após eliminação das linhas que não produzem valores numéricos, o ficheiro é exportado para o MICROSOFT EXCEL. Através desta ferramenta de cálculo, procede-se à diminuição do intervalo de análise e construção de um novo gráfico, que denominaremos como *Gráfico Matemático*.

A razão de se proceder à diminuição do intervalo de análise reside no facto de, nos intervalos iniciais e finais, o *Resistograph* não ter um funcionamento estável, pelo que estes valores não são representativos do valor global da resistência. Assim, é visível uma subida brusca dos valores no início do traçado do gráfico, passando-se o inverso no seu final. A selecção do início e fim do intervalo de análise (pontos A e B) é feita por análise gráfica ou numérica, e consiste em seleccionar, respectivamente, os pontos em que se atinge o valor máximo da curva inicial de estabilização e o último valor máximo na curva descendente de estabilização (figuras 3.20 e 3.21).

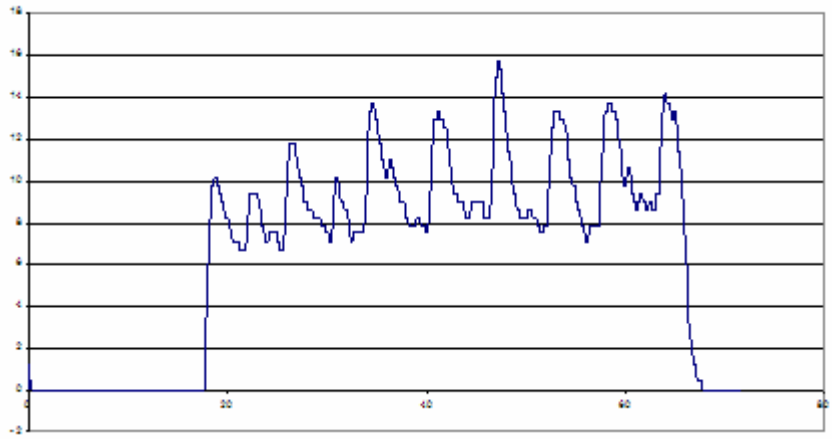


Figura 3.20 – Gráfico Matemático, obtido através do Microsoft Excel.

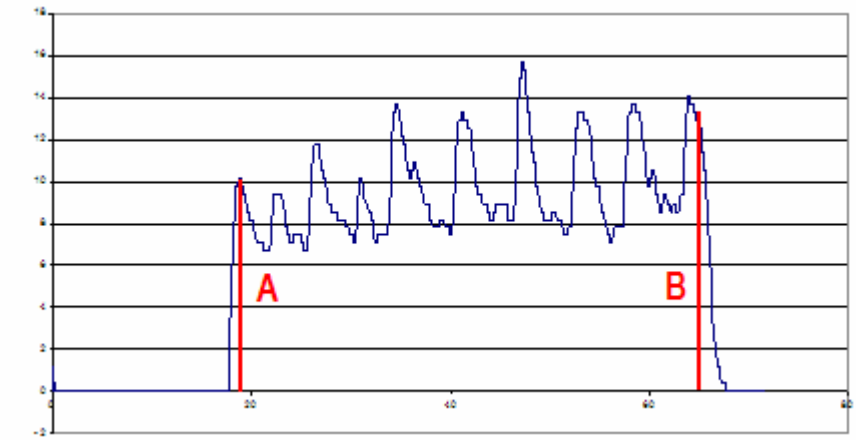


Figura 3.21 – Valores iniciais (A) e finais (B) do intervalo em que se admite um funcionamento estável do Resistograph.

Seleccionados os pontos A e B, procede-se ao desenvolvimento de um algoritmo que permite obter um valor médio do gráfico, o qual se pretende que seja representativo da resistência global à perfuração da peça.

Uma metodologia conhecida consiste em analisar apenas 2/3 do intervalo [A,B], fundamentando-se na ideia de que o valor médio da resistência deverá ocorrer em valores intermédios da perfuração, e assim eliminam-se valores presumivelmente incorrectos devido ao processo de corte da amostra (Capuz, 2003). Esta metodologia, porém, não faz tanto sentido na análise de peças atacadas biologicamente, sendo que nestes casos, em vez de se eliminarem os sextos iniciais e finais, se deverá considerar apenas a zona sã, interpretando-a como secção útil.

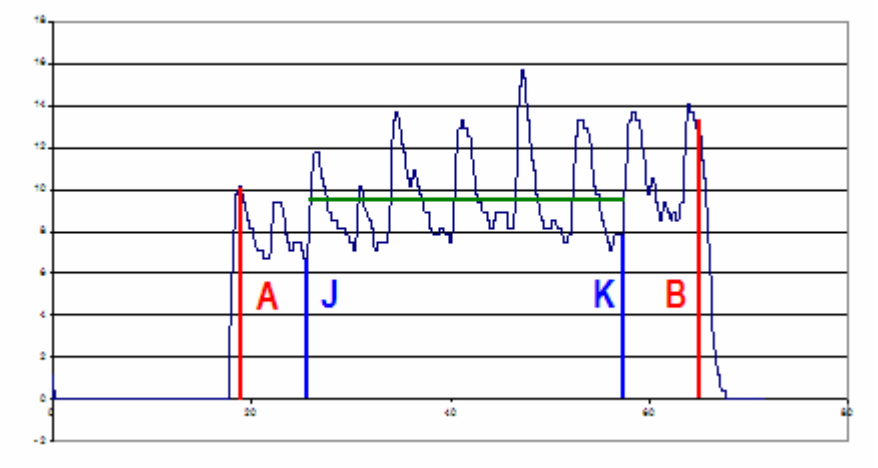


Figura 3.22 – Valores iniciais (J) e finais (K) do intervalo considerado para o cálculo da resistência média, considerando apenas 2/3 dos seus valores. A linha verde é visível o valor médio obtido por este método.

Seguindo, a metodologia exposta por Capuz, calcula-se então um valor médio de resistência à perfuração ($VR_{médio}$) para o intervalo [J,K], conforme se pode ver na figura 3.22. Estes pontos podem determinar-se através das seguintes fórmulas:

$$J = A + \frac{1}{6}(B - A) \qquad [3.3]$$

$$K = B - \frac{1}{6}(B - A) \qquad [3.4]$$

O valor médio ($VR_{médio}$) calcula-se pela seguinte expressão:

$$VR_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^{N} R_i}{N} \qquad [3.5]$$

$$N = \frac{K - J}{0.04} \qquad [3.6]$$

em que, R_i corresponde à resistência à perfuração, para cada um dos pontos do gráfico (intervalo de 0,04 em 0,04mm)

Para se retirar informação dos resultados do *Resistograph* sobre as características mecânicas da peça, é necessário estabelecer correlações entre o $VR_{médio}$ e valores conhecidos de ensaios mecânicos (por exemplo, para a determinação do módulo de elasticidade, E_o, e módulo de rotura, f_m, segundo a EN 408), para a mesma espécie. Apenas através destes ensaios é possível inferir, exactamente, o valor das características mecânicas de elementos estruturais, sendo pois necessário correlacioná-los com os valores obtidos do *Resistograph*. Desta forma, obtêm-se equações de regressão, para a espécie em causa, que permitem calcular o E_o e f_m, através do uso

isolado do *Resistograph*, com determinado grau de correlação, sendo possível a sua utilização com os dados obtidos de ensaios *in situ*.

Conforme se refere no ponto 2.1.4, existe grande variedade de características mecânicas entre as diferentes espécies de madeira, sendo pois necessário que haja uma "bibliografia" de expressões de correlação entre ensaios mecânicos e ensaios do *Resistograph*, para as diferentes espécies. Existem já diversos estudos realizados neste sentido, como se expõem no quadro 3.4, sendo também um dos objectivos deste trabalho estabelecer uma correlação numérica entre as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus radiata* e os valores retirados do *Resistograph*, bem como dos valores retirados do ensaio do *Sylvatest* Ultra-sons (Capítulo 4).

Pretende-se, pois, criar uma metodologia de classificação em classes resistentes, para a referida espécie, pelo uso de técnicas de inspecção não destrutivas de aplicação *in situ*, cujos resultados estão validados por ensaios mecânicos previamente efectuados.

Quadro 3.4 – Expressões de correlação entre o $VR_{médio}$ e algumas das principais propriedades mecânicas de elementos de madeira (os vários autores utilizam notações diferentes para o parâmetro $VR_{médio}$, sendo que no quadro apresentado se uniformiza esta notação, para maior facilidade de análise)

	Expressão	R^2	Espécie	Nº peças	Autor
[3.7]	$MOR = -41.62 + 8.86 \cdot VR_{medio}$	26.56 %	Pinus nigra	122	Capuz (2003)
[3.8]	$VR_{medio} = 2.07 \cdot \rho - 1005.2$	71,0 %	Castanea Sativa Mill. (novo)	47	Feio et al. (2005)
[3.9]	$VR_{medio} = 13.94 \cdot E_{C,O} + 216.2$	60,0 %	Castanea Sativa Mill. (novo)	47	Feio et al. (2005)
[3.10]	$VR_{medio} = 2.6 \cdot f_{c,0} + 212.1$	59.0 %	Castanea Sativa Mill. (novo)	47	Feio et al. (2005)
[3.11]	$VR_{medio} = 1.59 \cdot \rho - 666.9$	68.0 %		47	Feio et al. (2005)
[3.12]	$VR_{medio} = 16.82 \cdot E_{C,O} + 126.0$	64,0 %	Castanea Sativa Mill. (antigo)	47	Feio et al. (2005)
[3.13]	$VR_{medio} = 1.81 \cdot f_{c,0} - 188.2$	64.0 %		47	Feio et al. (2005)
[3.14]	$\rho^2 = 1242214{,}93 \cdot VR_{medio}^{0,1} - 2020664{,}3$	91,0 %	23 espécies chinesas (medições radiais)	23	Pin-Hui Tsai et al. (2004)
[3.15]	$MOE = 28122{,}195 - 2206{,}53 \cdot VR_{medio}^{0,5} + 0{,}101 \cdot \rho^2$	80,6 %		23	Pin-Hui Tsai et al. (2004)
[3.16]	$MOE = -18319{,}605 + 11087{,}75 \cdot VR_{medio}^{0,1} + 0{,}02281 \cdot \rho^2$	75,0 %	23 espécies chinesas (tangenciais)	23	Pin-Hui Tsai et al. (2004)
[3.17]	$MOE = -11245{,}51 + 6962{,}51 \cdot VR_{medio}^{0,1} + 0{,}01595 \cdot \rho^2$	86,6 %	26 espécies chinesas (radiais e tangenciais)	26	Pin-Hui Tsai et al. (2004)

Em 2003, Capuz Lladró propõe uma primeira aproximação, pelo menos em Espanha, ao estabelecimento de um intervalo de classificação resistente de elementos estruturais de *Pinus nigra*, com base no uso do *Resistograph*. Dado que as correlações obtidas, entre o f_m e o $VR_{médio}$, foram baixas (R^2 de 26,56%), o mesmo autor realizou um ajuste gráfico da equação de regressão linear, de forma a incluir 95% dos dados em estudo.

Esta consideração, ainda que aparentemente bastante conservadora, permite considerar diversos factores que podem não ser considerados quando se aplica esta técnica de inspecção, nomeadamente:

- A expressão [3.7] foi obtida através do ensaio de peças estruturais de qualidade controlada, e portanto, sem a presença de defeitos e degradação biológica;

- O valor do f_m (ou MOR, conforme designação adoptada por Capuz) pode ser bastante condicionado pela existência de defeitos localizados, sendo que a qualidade global da peça, E_o (ou MOE, conforme designação adoptada por Capuz), é caracterizadora do seu valor (Capuz apenas conseguiu uma baixa correlação de 15,1%, com o valor de $VR_{médio}$, para o *Pinus nigra*);

- A expressão [3.7] é pouco estável, fornecendo resultados muito díspares para pequenas variações do valor do VR.

Ainda que a metodologia proposta por Capuz subestime, do lado da segurança, os valores reais da amostragem, não se julga ser demasiadamente conservativa, pelas razões já apontadas, sendo que se constitui como uma ferramenta efectiva e ajustada às condições reais de inspecção de elementos estruturais *in situ*.

Os resultados deste método poderão ainda ser cruzados e balizados, pela utilização conjunta com outras técnicas de inspecção não destrutiva, como a inspecção visual e o *Sylvatest*, entre outros, permitindo assim obter uma metodologia de inspecção estrutural de elementos *in situ* mais ajustada, e ultrapassando algumas das limitações apontadas

3.4.2 Sylvatest

3.4.2.1 Considerações gerais

O *Sylvatest* é um aparelho especialmente projectado para a inspecção de estruturas de madeira, de tal forma que a metodologia de ensaio e os parâmetros a definir estão enquadrados nesse âmbito.

Conforme já foi referido no capítulo 3.2.2, o ensaio pode ser realizado com ou sem o uso do *Sylvion*, sendo a metodologia de ensaio ligeiramente diferente, para cada um dos casos. No entanto, pelo apontado no mesmo capítulo, julga-se adequada apenas a primeira situação, sendo que neste trabalho apenas será abordado o ensaio sem o uso do *Sylvion*.

3.4.2.2 Metodologia de ensaio

A metodologia de ensaio com o uso do *Sylvatest* é bastante simples, sendo apenas necessário definir a distância entre sondas (em milímetros), de forma a ser possível o cálculo da velocidade de propagação das ondas emitidas.

Dada a natureza do método, a metodologia de ensaio implica a execução cuidada de alguns procedimentos, para que os resultados não sofram interferências, nomeadamente:

- Deve-se colocar a extremidade da sonda num local onde foi efectuada uma perfuração prévia de cerca de 0,5cm, para que haja contacto perfeito com a madeira, no final da incisão, e de forma a minimizar a perda de sinal. Pretende-se pois que a onda inicie a sua propagação numa zona sã da madeira, sendo que quando existe uma capa de degradação biológica, esta deve ser retirada e realizada a perfuração em madeira sã, pelo menos na zona da incisão;

Figura 3.23 – Furação na viga de madeira para colocação da sonda do Sylvatest.

- Quando se realizam medidas indirectas, a extremidade da sonda deve fazer um ângulo inferior a 45º com o eixo horizontal da peça (de preferência 35º, de acordo com as recomendações do fabricante). Por sua vez, quando se realizam medidas directas deve manter-se a sonda numa posição horizontal;
- Para medições directas, não se deverão efectuar medidas na medula, porque esta tem características mecânicas muito diferentes do resto da peça de madeira (pode-se medir, se é conhecido, o intervalo em que estão compreendidos os seus valores de ensaio, no

entanto, tal não é recomendável por se tratar de um tecido jovem e brando). Os resultados conhecidos entre as medidas do borne e do cerne não são muito diferentes.

Por fim, refira-se que as medidas devem ser realizadas na sua totalidade de acordo com a mesma metodologia, para que os resultados sejam o mais correctos possível, principalmente quando se utiliza uma técnica de ensaio "sensível", como é o *Sylvatest*. Um bom auxiliar de laboratório, não é o que faz tudo perfeito, pois tal não existe, mas sim o que o faz sempre da mesma forma e regista tudo o que se produz, eliminando o factor subjectividade da análise de resultados.

Em função de como é realizado o ensaio, as medições têm diferentes classificações:

a) Medições directas

Quando as sondas são colocadas de tal forma que a emissão da onda e a sua recepção se encontram no mesmo alinhamento longitudinal, ou seja, a direcção principal de propagação das ondas é segundo a orientação das fibras longitudinais da madeira. O *Sylvion* distingue entre secções longitudinais constantes (Sawing) e variáveis (Log):

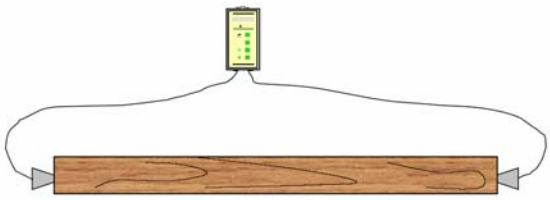


Figura 3.24 – Medição directa - secção longitudinal constante (Sawing)

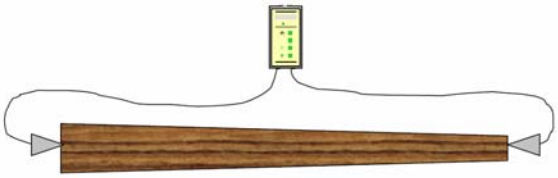


Figura 3.25 – Medição directa - secção longitudinal variável (Log)

b) Medições indirectas

A propagação entre o emissor e o receptor não é realizada de forma directa, ou seja, num alinhamento longitudinal principal. O *Sylvion* distingue entre secções longitudinais constantes (Sawing), variáveis (Log) e árvores (standing tree).

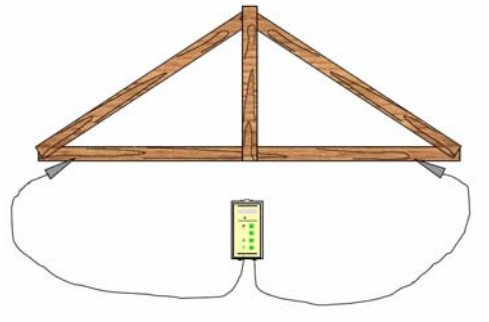


Figura 3.26 – Medição indirecta - secção longitudinal constante (Sawing)

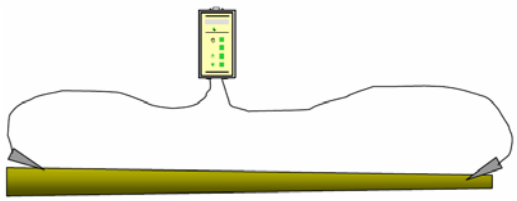


Figura 3.27 – Medição indirecta - secção longitudinal variável (Log)

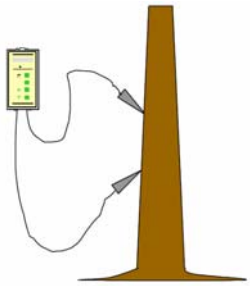
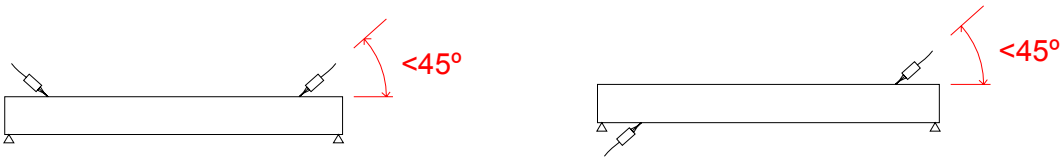


Figura 3.28 – Medição indirecta - secção longitudinal de tronco de árvore (Standing Tree)

Dentro das medições paralelas podemos ainda considerar dois tipos de medições diferentes, sendo estas as medições paralelas e as medições cruzadas.



Figuras 3.29 e 3.30 – À esquerda, medição paralela. À direita, medição cruzada.

c) Medições radiais

Quando as medições são efectuadas perpendicularmente às fibras, ou seja, no sentido radial, são designadas de medições radiais.

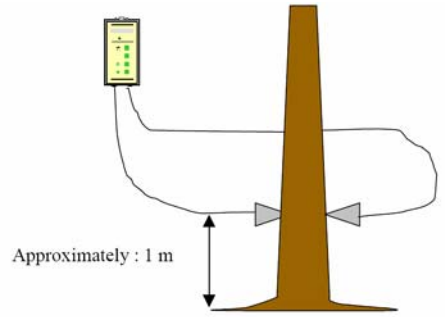


Figura 3.31 – Medição radial

3.4.2.3 Resultados e metodologia de atribuição de classes resistentes

Do ensaio do *Sylvatest* retiram-se as seguintes grandezas:

- Tempo de propagação da onda entre sondas – t [μs]
- Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas – v [m/s]
- Energia utilizada – ε [mV]

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas é calculada pelo *Sylvatest*, em função do tempo de propagação t (em μs) e a distância ente sondas L (em mm), sendo por isso necessária a definição prévia da distância entre sondas. Conforme já foi exposto no ponto 3.2.2, em função do valor obtido para a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, é possível calcular o **Módulo de Elasticidade Dinâmico** do elemento de madeira ensaiado, aplicando a expressão [3.1].

A aplicação desta metodologia pressupõem o conhecimento do valor da massa volúmica (ρ) do elemento de madeira ensaiado, o que constitui uma das dificuldade do processo, dado que é difícil estimar com precisão este parâmetro, para cada um dos elementos. No caso de ensaios laboratoriais, normalmente são retiradas amostras para se controlar o seu peso e volume, o que não se justifica para estruturas *in situ*.

Correntemente, estima-se o valor da massa volúmica de estruturas de madeira *in situ* por duas formas:

- **Conhecimento da espécie da madeira** – através da qual se retira da bibliografia o valor da massa volúmica. Normalmente, e porque o processo de identificação visual da espécie de madeira não é simples e exige bastante experiência, e dado que os valores deste parâmetro podem ter um intervalo de variação considerável dentro da mesma espécie;

- **Utilização de técnicas de inspecção não destrutivas** – conforme já descrito no ponto 3.2, existem técnicas modernas de inspecção não destrutiva capazes de estimar o valor

da massa volúmica com graus de correlação bastante aceitáveis. Desta forma, é possível estimar o seu valor de forma experimental, ultrapassando-se as dificuldades do ponto anterior. Como exemplo, refira-se que o *Resistograph* é uma metodologia de inspecção não destrutiva bastante adaptada a esta situação, dado que consegue atingir valores de R^2 na ordem dos 80 % com o valor da densidade (Arriaga, 2002).

Pelo exposto, verifica-se que a estimativa do valor do Módulo de Elasticidade Dinâmico ($E_{dinâmico}$) se baseia numa metodologia bastante simples e sem necessidade de tratamento de dados demasiado complexo e moroso. Porém, a classificação mecânica em classes resistentes, de acordo com a normativa vigente (EN338), não prevê o valor do Módulo de Elasticidade Dinâmico ($E_{dinâmico}$) como variável caracterizadora das propriedades mecânicas dos elementos estruturais, sendo pois necessário apurar-se o valor do Módulo de Elasticidade Estático ($E_{estático}$ ou E_o, de acordo com a simbologia do Eurocódigo 5).

O valor do Módulo de Elasticidade Estático pode, por sua vez, ser apurado por dois métodos:

- **Realização de ensaios mecânicos segundo a EN 408** – Procedimento de ensaio mecânico para madeira estrutural – Não tem aplicação para a inspecção não destrutiva de estruturas *in situ*, porque implicaria o seu desmonte e ensaio até à rotura. Porém, existe uma metodologia para a realização de ensaios mecânicos não destrutivos, a qual consiste na execução de provas de carga *in situ* através da colocação de sacos de material (na ordem dos 20 a 40% da sua carga última, ou seja, num intervalo onde a madeira tem um comportamento perfeitamente elástico, e medir a deformação produzida.

- **Conhecida a correlação com ensaios mecânicos,** traduzida pela constante K da expressão [3.1], conforme exposto em 3.2.2 ($E_{estático} = K \cdot E_{dinamico} = K \cdot v^2 \cdot \rho$).

Este último método apresenta-se como a única opção razoável para o cálculo do E_o através do *Sylvatest*, em estruturas de madeira *in situ*, dado que a realização de ensaios de carga envolve elevados encargos financeiros.

A utilização desta metodologia implica que exista já algum estudo realizado, relativamente à espécie em questão, utilizando-se as expressões de regressão conhecidas (Quadros 3.5 e 3.6). Porém, não existe ainda uma "base de dados" extensa de ensaios com o uso do *Sylvatest*, o que condiciona o seu uso para a avaliação das propriedades mecânicas de estruturas de madeira *in situ*. Note-se que este *handicap* apenas se aplica à avaliação das propriedades mecânicas dos elementos de madeira, relacionada com a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, sendo que a detecção de defeitos, vazios e desvio de fibras podem ser facilmente obtidos, bastando para tal comparar os valores obtidos com os de zonas sãs da mesma peça.

Quadro 3.5 – Correlações conhecidas entre o valor obtido por ensaios de ultra-sons ($E_{dinâmico}$) e as propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira (os vários autores utilizam notações diferentes para o parâmetro $E_{DINÂMICO}$, sendo que no quadro apresentado se uniformiza esta notação, para maior facilidade de análise).

	Expressão	R^2	Espécie	Nº de amostras	Autor
[3.18]	$E_{c,o} = 0{,}004 \cdot E_{DINÂMICO} + 3.0$	70,0 %	Castanea Sativa Mill. (novo)	47	Feio et al. (2005)
[3.19]	$f_{c,o} = 0{,}019 \cdot E_{DINÂMICO} + 18.2$	67.0 %	Castanea Sativa Mill. (novo)	47	Feio et al. (2005)
[3.20]	$E_{c,o} = 0{,}005 \cdot E_{DINÂMICO} + 1.7$	65,0 %	Castanea Sativa Mill. (antigo)	47	Feio et al. (2005)
[3.21]	$f_{c,o} = 0{,}043 \cdot E_{DINÂMICO} - 17.1$	62.0 %	Castanea Sativa Mill. (antigo)	47	Feio et al. (2005)
[3.22]	$E_{DINÂMICO} = 1183{,}87 + 1{,}14502 \cdot E_{ESTÁTICO}$	68,0 %	Pinus nigra Arn.	325	Díez et al. (2004)
[3.23]	$E_{ESTÁTICO} = (-23{,}0676 + 0{,}0254737 \cdot V)^2$	53,0 %	Pinus sylvestris	735	Díez et al. (2003)
[3.24]	$E_{ESTÁTICO} = -11303{,}39 + 0{,}000500587 \cdot V^2$	51,0 %	Pinus nigra Arn.	735	Díez et al. (2003)
[3.25]	$E_{ESTÁTICO} = 1415{,}2 + 0{,}55 \cdot E_{DINÂMICO}$	17,0 %	Pinus pinaster Ait. (livre de defeitos)	550	Machado (2003)

Quadro 3.6 – Resenha bibliográfica dos resultados obtidos pela aplicação do *Sylvatest* (correlação entre a velocidade de propagação longitudinal e o módulo de elasticidade ou a tensão à rotura à flexão) [Machado, 2003]

Referência	Espécie ensaiada	Dimensões dos provetes ensaiados (cm)	Coeficientes de determinação	
			Módulo de elasticidade à flexão	Tensão de rotura à flexão
Sandoz (1989)	Espruce europeu (Picea abies H. Karsten)	10 / 14 / 280	-	0,45
		10 / 18 / 360		
		10 / 22 / 440		
Boström (1994)	Espruce europeu (Picea abies H. Karsten)	4,5 / 12 / ?	0,29	0,20
		7 / 17 / ?	0,26	0,17
		4,5 / 19,5 / ?	0,48	0,50
Perstorper (1994)	Espruce europeu (Picea abies H. Karsten)	7 / 29 / 580	0,85	0,64
Togni (1995)	Abeto-branco (Abies alba Mill.)		0,72	0,44
Sauter e Metzger (1996)	Scots pine (Pinus sylvestris L.)	6 / 12 / ?	-	0,44
Baillères et al. (1998)	Angélique (Dicorynia guianensis Amsh.)	5,5 / 13,8 / 300	0,62	0,1
	Gonfolo (Qualea spp.)	5,5 / 13,8 / 300	0,74	0,3
Casagrande (1998)	Spruce (?)	4,5 / 9,6 / 210	0,42	-

Com base em estudos experimentais realizados, alguns autores propõem intervalos de classificação resistente de elementos estruturais de madeira, em função dos valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas.

Dada a dificuldade descrita de apurar o valor da massa volúmica de elementos de madeira *in situ*, Arriaga propõe os seguintes intervalos aproximados, para a classificação mecânica em função das velocidades de propagação de ondas obtidos pelo ensaio do *Sylvatest* (Arriaga, 2002):

V_{baixa} = 4.100 a 4.600 m/s : Classe resistente C14 a C16.
$V_{média}$ = 4.600 a 5.100 m/s : Classe resistente C18.
V_{alta} = 5.100 a 5.400 m/s : Classe resistente C22

Refira-se que os intervalos de classificação apresentados por Arriaga são de certa forma demasiado seguros, o que não se considera desajustado quando se pretende avaliar a capacidade resistente de elementos estruturais *in situ*, principalmente quando são peças com vários anos de serviço. Esta postura pretende prevenir o uso indevido das expressões de correlação obtidas, dado que estas são realizadas em condições controladas e em elementos livres de defeitos e não têm em conta factores tais como a existência de defeitos localizados, degradação biológica, fluência e teores diferenciais em água dos elementos estruturais ensaiados.

Por sua vez, Sandoz propõe o seguinte intervalo de classificação, com base em estudos experimentais realizados em 341 peças de espruce (picea abies) de madeira nova, com esquadrias de 100 x 140mm até 100 x 220mm (Sandoz, 1989):

$v \leq 5.250$ m/s:	E = 10.500 N/mm^2;	F = 22,7 N/mm^2 (aprox, C22)
5.250 m/s $< v \leq$ 5.600 m/s:	E = 12.450 N/mm^2;	F = 30,3 N/mm^2 (aprox, C30)
$v >$ 5.600 m/s:	E = 14.100 N/mm^2;	F = 38,4 N/mm^2 (aprox, C35)

Esta abordagem conservativa, mas consciente, pode ser bastante interessante se for utilizada conjuntamente com outras técnicas não destrutivas, como a classificação visual, o *Resistograph*, entre outros. Mais, constitui uma ferramenta bastante útil e simples, não envolvendo excessivos meios, contrariamente ao que sucede com outras técnicas de inspecção não destrutivas.

Na sua tese de Doutoramento (Machado, 2003), Saporiti Machado apresenta uma proposta de avaliação da capacidade resistente de peças de Pinho bravo português (*Pinus pinaster Ait.*), com recurso ao Sylvatest. No entanto, a mesma é aplicável a peças disponíveis para serem testadas em laboratório, o que não se enquadra no espírito da presente dissertação.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE PINUS RADIATA UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE RESISTOGRAPH E SYLVATEST

4.1 Amostragem e objecto

Neste capítulo descreve-se o trabalho experimental realizado, o qual consiste no ensaio por metodologias não destrutivas, mais concretamente pela técnica do *Resistograph*, de 300 peças da espécie *Pinus radiata*, provenientes da zona de Cuenca, Espanha, com as dimensões de 30x15x5cm.

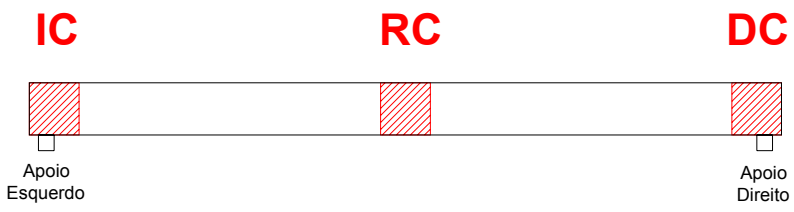
Figuras 4.1 e 4.2 - Amostragem de provetes ensaiados de Pinus radiata – 300 peças de 30x15x5 cm

As peças ensaiadas são propriedade da UPV, tendo sido disponibilizadas pelo Laboratório de Estructuras de Madera do CIFOR-INIA (Instituto Nacional de Investigación Agrária, Madrid, Espanha), o qual pertence ao Ministério da Ciência e Tecnologia espanhol.

Os ensaios do *Resistograph* foram realizados pelo autor no Laboratório de Madeiras da Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación, da Universidad Politécnica de Valencia (Valência, Espanha), durante o período de Maio a Julho de 2005.

As peças ensaiadas foram extraídas dos extremos e meio vão de 100 vigas de *Pinus radiata*, após terem sido realizados os ensaios mecânicos destrutivos para determinação das suas propriedades físico-mecânicas, de acordo com as normas EN408 e EN338. Os ensaios destrutivos foram realizados no CIFOR-INIA.

Os provetes foram designados de IC, RC, DC, conforme foram retirados, respectivamente, do apoio esquerdo, meio vão e apoio direito das vigas. Para cada uma destas referências, existiam 100 provetes, numerados de 4101 a 4200, perfazendo o total de 300 provetes (figuras 4.3 e 4.4).



Figuras 4.3 e 4.4 – À esquerda, provete nº4101, retirado do apoio esquerdo da viga 4101. À direita, zona de extracção dos provetes

Previamente à realização dos ensaios mecânicos descritos, a amostragem foi ensaiada e caracterizada através da metodologia não destrutiva de análise de propagação de ultra-sons, pelo uso do aparelho *Sylvatest*.

A selecção da amostragem, a extracção dos provetes, os ensaios destrutivos segundo a EN408 e EN338 e o ensaio não destrutivo pela técnica do *Sylvatest* foram realizados pelo Laboratório de Estructuras de Madera do CIFOR-INIA, tendo os seus resultados sido fornecidos à Universidad Politécnica de Valencia, para realização deste estudo, em virtude do convénio de colaboração existente entre ambas as entidades.

O principal objectivo deste trabalho experimental foi o seguinte: conhecendo os resultados dos ensaios mecânicos e do *Sylvatest* realizados pelo CIFOR-INIA, definir correlações com os dados retirados do ensaio do *Resistograph*, de forma a obter uma expressão matemática que relacione os valores do *Resistograph* e *Sylvatest* e as principais características mecânicas da madeira de *Pinus radiata* (tensão de rotura à flexão na direcção do fio, f_m, e módulo elasticidade na direcção do fio, E_o).

Foram estudadas regressões simples e múltiplas (mais do que uma variável independente em análise), no sentido de se atingir coeficientes de correlação mais elevados pelo uso combinado de mais do que uma técnica de ensaio não destrutivo (neste caso, o *Resistograph* e o *Sylvatest)*.

Pretendia-se pois, chegar a uma expressão que, em função do grau de correlação obtido, pudesse constituir uma ferramenta eficiente na inspecção e classificação mecânica de elementos estruturais de *Pinus radiata*, pelo uso das técnicas de inspecção não destrutivas *Resistograph* e *Sylvatest*, ultrapassando assim a morosidade associada às metodologias de classificação visual de elementos estruturais de madeira, que, para além disso, implicam um conhecimento profundo das normas de classificação aplicáveis.

Por fim, refira-se que este trabalho foi inserido num protocolo de colaboração estabelecido entre a Universidad Politécnica de Valência e a Universidade do Porto, através da FEUP, sendo os assuntos tratados neste capítulo e no capítulo 5, um resumo do trabalho realizado pelo autor e dos relatórios técnicos produzidos pelo mesmo, por ocasião da sua estadia em Valência (Botelho, 2005).

O trabalho surgiu na sequência da tese de doutoramento de Capuz (Capuz, 2003) e integrou um programa de investigação mais vasto em curso na UPV, relacionado com a avaliação da capacidade resistente por métodos não destrutivos de elementos estruturais em madeira.

4.2 Base de trabalho

Conforme referido, previamente ao ensaio do *Resistograph*, foram realizados, pelo Laboratório de Estruturas de Madeira do CIFOR-INIA, ensaios para a caracterização das principais propriedades mecânicas das 100 vigas de *Pinus radiata*, de acordo com as metodologias das normas EN408 e EN338, e ensaio de propagação de ultra-sons, tendo sido apurados os seguintes parâmetros:

- Humidade;
- Massa volúmica ou densidade;
- MOR (ou f_m, segundo a notação do Eurocódigo 5) – Tensão de rotura à flexão na direcção do fio, segundo a EN408;
- MOECTO (ou E_o, segundo a notação do Eurocódigo 5) - Módulo de elasticidade na direcção do fio, avaliado na face traccionada;
- MOETM (ou E_o, segundo a notação do Eurocódigo 5) - Módulo de elasticidade na direcção do fio, obtido por ensaio de máquina classificadora normalizada;
- MOE_US - Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de ultra-sons (*Sylvatest*);

Dado que o cálculo e as publicações efectuadas na Universidad Politécnica de Valencia relativamente a este trabalho usam a notação dos parâmetros anteriores, e uma vez que esta linha de investigação vem no seguimento da efectuada por Capuz (Capuz, 2003), neste capítulo será adoptada igual notação para a designação dos parâmetros mecânicos, sendo que no seu final se fará a transposição para a que se encontra preconizada pelo Eurocódigo 5.

No ANEXO I.1, apresentam-se os resultados obtidos pelo CIFOR-INIA para as 100 vigas de *Pinus radiata*, numeradas de 4101 a 4200, relativamente aos ensaios destrutivos de acordo com as normas EN338 e EN408, bem como os resultados do ensaio com o *Sylvatest*.

4.3 Método de ensaio – Resistograph

4.3.1 Procedimento e observações

O ensaio do *Resistograph* foi realizado utilizando um aparelho da série **Resistograph 1410 – IML Resi B300**. Conforme já descrito no Cap. 3.2.1, este modelo possui uma agulha de 1,5mm de diâmetro (mais larga na extremidade, com 3mm) e 400mm de comprimento, sendo particularmente adequado para a inspecção de estruturas *in situ*.

Figura 4.5 - Ensaio dos provetes de madeira com o Resistograph 1410 (Laboratório)

Para cada amostra, foram realizadas medições radiais e tangenciais, sendo que, devido ao corte efectuado, por vezes apenas foi possível realizar medidas tangenciais. Deste modo, foram realizadas 2 medidas por amostra, ou seja, 6 medidas por viga, o que perfaz um total de 600 ensaios através da técnica do *Resistograph,* para a caracterização das vigas de *Pinus radiata*.

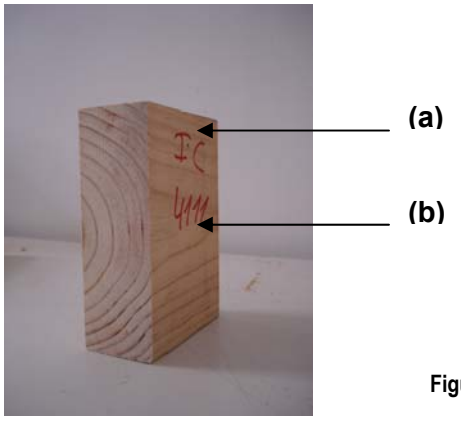


Figura 4.6 - Esquema de uma medição radial (a) e medição tangencial (b)

A intenção de se realizarem dois tipos de medição, para além de permitir obter um maior número de dados de análise por peça, o que é sempre útil num processo de cálculo assente em bases estatísticas, foi o de tentar quantificar a existência de uma eventual diferença significativa ou relação, entre as medições radiais e tangenciais.

Existem estudos realizados para outras espécies de madeira que concluem que a diferença entre as medições radiais e tangenciais existe, mas é desprezável (Capuz 2003, para *Pinus silvestris* e *Pinus nigra*), porém tentou-se verificar se o mesmo sucedia para o *Pinus radiata*. Mais, no caso de se ter verificado que existia uma diferença significativa entre as medições radiais e tangenciais, a mesma seria uma limitação deste método para a inspecção de estruturas *in situ*, pois nesta situação não é, normalmente, possível distinguir os dois tipos de medições.

Uma vez que o **teor de água** é um factor que pode influenciar os resultados do *Resistograph*, mediu-se este parâmetro em 10% das peças, extrapolando-se para a restante população. Considera-se que este procedimento não é incorrecto, pois todos os provetes estavam armazenados há cerca de três meses nas mesmas condições higrotérmicas, no Laboratorio de Maderas da la Universidad Politécnica de Valencia, o que se considera tempo suficiente para estabilizarem para o seu teor em água de equilíbrio.

Verificou-se que o teor em água variava entre o intervalo de 8% a 11%, sendo que o valor médio de ocorrência foi de aproximadamente 9%. No seguimento do que se refere no capítulo 3.3.3, conclui-se que o teor em água dos provetes era adequado para a realização do ensaio do *Resistograph*.

Em relação à **metodologia de cálculo** utilizada para a obtenção do *Gráfico Matemático*, optou-se pelo procedimento exposto em 3.4.1, no qual se seleccionam os pontos A e B como extremos do intervalo a considerar, correspondentes, respectivamente, aos pontos em que se atinge o valor máximo da curva inicial de estabilização e o último valor máximo na curva descendente de estabilização (ver figuras 3.20 e 3.21).

No nosso entendimento, esta metodologia é a mais adequada para a situação presente, uma vez que se tratam de vigas seleccionadas para ensaios laboratoriais, ou seja, de qualidade controlada e sem a presença de ataque biológico superficial.

4.3.2 Resultados do ensaio do Resistograph

O quadro 4.1 apresenta os valores médios obtidos através do ensaio do *Resistograph* ($VR_{médio}$), para cada uma das 100 vigas, numeradas de 4100 a 4200.

Quadro 4.1 – Resultados do ensaio do Resistograph para as 100 vigas de Pinus radiata.

Viga	VR médio	Viga	VR médio
4101	6,89	**4151**	9,41
4102	8,16	**4152**	9,56
4103	7,63	**4153**	9,31
4104	9,47	**4154**	9,29
4105	7,25	**4155**	8,24
4106	7,01	**4156**	8,54
4107	7,92	**4157**	8,46
4108	7,81	**4158**	7,24
4109	5,74	**4159**	9,21
4110	10,59	**4160**	7,98
4111	6,26	**4161**	8,31
4112	7,64	**4162**	7,01
4113	8,83	**4163**	7,39
4114	7,15	**4164**	8,59
4115	6,81	**4165**	9,44
4116	7,99	**4166**	9,36
4117	8,01	**4167**	8,17
4118	8,28	**4168**	8,96
4119	8,03	**4169**	8,56
4120	9,06	**4170**	10,07
4121	8,16	**4171**	8,36
4122	9,20	**4172**	7,71
4123	7,28	**4173**	7,63
4124	7,38	**4174**	7,96
4125	6,97	**4175**	7,78
4126	7,84	**4176**	8,64
4127	6,84	**4177**	8,97
4128	7,24	**4178**	8,40
4129	6,67	**4179**	8,00
4130	7,12	**4180**	7,28
4131	7,36	**4181**	6,63
4132	7,23	**4182**	8,78
4133	5,93	**4183**	6,98
4134	7,97	**4184**	7,50
4135	6,06	**4185**	7,00
4136	6,21	**4186**	6,00
4137	8,59	**4187**	6,12
4138	8,20	**4188**	6,20
4139	7,40	**4189**	8,50
4140	6,78	**4190**	7,61
4141	7,37	**4191**	8,36
4142	7,65	**4192**	6,28
4143	8,12	**4193**	6,04
4144	8,90	**4194**	8,70
4145	8,42	**4195**	7,03
4146	8,53	**4196**	6,87
4147	8,40	**4197**	5,96
4148	8,19	**4198**	9,63
4149	7,20	**4199**	7,24
4150	9,26	**4200**	7,88

No Anexo I, apresenta-se um extracto do relatório de ensaio realizado na Universidad Politécnica de Valencia (Botelho, 2005), através do qual se obtiveram os resultados anteriores, sendo que o mesmo é composto pelas seguintes fichas:

- **FICHA Nº1 – Resultados do Resistograph**
  Valores médios de *Resistograph* expostos no quadro 4.1, assim como os valores médios, por viga, das medições tangenciais e radiais – ANEXO I.2

- **FICHA Nº2 – Valores do Resistograph por viga**
  Metodologia de cálculo dos valores do *Resistograph*, por viga, num total de 100 fichas. Em anexo apenas se apresenta uma ficha, de forma a ilustrar a metodologia adoptada – ANEXO I.3

- **FICHA Nº3 – Resumo do cálculo estatístico**
  Resumo do cálculo estatístico relativo à amostragem de dados – ANEXO I.4

Seguidamente será exposta a metodologia adoptada na execução das Fichas nº1 e nº2, sendo que a elaboração da ficha nº3 será abordada no capítulo 4.3.3 :

a) FICHA Nº1 – Resultados do Resistograph

Nesta ficha apresenta-se o resumo dos valores das medições radiais (VR_{radial}), tangenciais (VR_{tang}) e valores médios ($VR_{médio}$) obtidos através da técnica do *Resistograph*, para cada uma das 100 vigas.

Estes dados são a síntese do cálculo realizado na *Ficha nº2 – Valores do Resistograph por viga* (100 fichas), e constituem a amostragem utilizada para estabelecer a correlação com os dados do CIFOR-INIA, relativos aos ensaios de determinação das propriedades mecânicas e ensaio do *Sylvatest*.

Foi realizada uma análise da variação dos valores radiais e tangenciais, tendo-se verificado que esta diferença nunca ultrapassava os 30%, sendo que apenas em 16% dos valores existia uma diferença entre 20% e 30%. Perante o verificado, considera-se razoável utilizar como variável de análise o **valor médio do Resistograph** ($VR_{médio}$). Esta constatação valida a utilização do *Resistograph* na inspecção de estruturas de madeira *in situ*, dado que na maioria dos casos não é possível distinguir medições radiais e tangenciais, pelo facto dos topos das vigas estarem ocultos.

Verificou-se igualmente que os valores tangenciais eram quase sempre superiores aos radiais (em 84% dos casos), observando-se igual relação para os 3 provetes de cada viga. Uma explicação para tal ocorrência julga-se residir no facto de muitas das peças terem sido cortadas pela medula, a qual tem um valor de resistência muito mais baixo do que o restante tronco. A Ficha nº1 é, pois,

o resumo de 600 ensaios através da técnica do *Resistograph*, realizados em 100 vigas de *Pinus radiata* (6 medições por viga).

b) FICHA Nº2 – Valores do Resistograph por viga

Na Ficha nº 2 apresentam-se os valores das medições radiais (VR_{radial}), tangenciais (VR_{tang}) e valores médios ($VR_{médio}$) obtidos através da técnica do *Resistograph*, para cada um dos provetes, ordenados por viga. Assim, cada uma destas fichas contém os valores radiais e tangenciais dos provetes IC, RC e DC, sendo calculado para cada um destes, o seu valor médio, ou seja o valor médio por provete. Por fim, o valor médio da viga foi calculado através da média dos valores médios de cada provete.

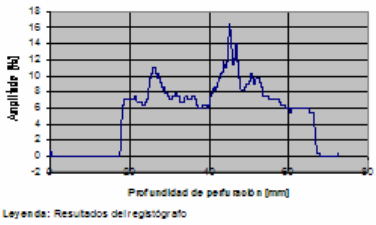
Deste modo, a ficha nº2 resume o cálculo de 6 medições por viga (medições radiais e tangenciais nos provetes IC, RC e DC), sendo que para cada medição foi realizado o tratamento de dados já referido e obtido o correspondente *Gráfico Matemático* (gráficos 3.20 e 3.21).

FICHA Nº2 - valores del registógrafo por viga

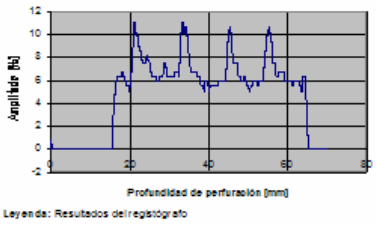
Viga 4103

Pieza	Nº medida	Tipo	Humidad	Valor Regist.	V. Médio	Observaciones
DC4103	197	tang.		7,98	7,42	
DC4103	198	radial		6,86		
RC4103	193	tang.		9,14	7,70	
RC4103	194	radial		6,27		
IC4103	198	radial		5,87	7,76	
IC4103	199	tang.		9,66		
Viga 4103					**7,63**	

GRÁFICOS



DC4103 - 197



DC4103 - 198

Figura 4.7 - Extracto da Ficha nº 2 – Valores do Resistograph por viga

4.3.3 Tratamento estatístico dos resultados

Neste sub-capítulo expõe-se a metodologia de cálculo estatístico adoptada para a obtenção de correlações entre os dados dos ensaios mecânicos e os dados fornecidos pelas técnicas não destrutivas empregues, o *Resistograph* e o *Sylvatest*, para a espécie de *Pinus radiata*.

Não é objectivo definir os conceitos e variáveis estatísticas que estão na base do processo de cálculo desenvolvido, dado que tal não se apresenta como o âmbito da presente dissertação, mas sim caracterizar de uma forma sucinta a metodologia de cálculo adoptada.

Assim, convém referir que o processo de cálculo assenta na análise de regressão entre conjuntos de dados, a qual que consiste num processo de análise estatística em que, muito genericamente, se obtém o valor de uma variável desconhecida (**variável dependente**), através dos valores de variáveis conhecidas (**variáveis independentes**).

Este tipo de relação entre variáveis pode explicar-se, de uma forma gráfica, e muito genericamente, pela equação da recta que melhor se ajusta à nuvem de pontos relativa ao conjunto de dados de cada uma das variáveis em análise, associada a um **coeficiente de determinação** (R^2) ou de **correlação** (R) obtido através do Método dos Mínimos Quadrados, permitindo assim caracterizar a relação existente entre as variáveis.

No cálculo estatístico a que este sub-capítulo diz respeito, foram consideradas como variáveis dependentes, na análise de regressão múltipla, os parâmetros mecânicos da madeira de *Pinus radiata* (módulo de rotura e módulo de elasticidade na direcção do fio), enquanto que as variáveis independentes correspondem à massa volúmica e aos parâmetros fornecidos pelas técnicas do *Resistograph* e *Sylvatest*.

4.3.3.1 Descrição estatística das variáveis

Com a finalidade de estabelecer comparações entre as distintas variáveis em análise, que, regra geral, se medem em unidades diferentes, foram calculadas algumas medidas de centralidade e dispersão, como a média aritmética, a variância, o coeficiente de variação (CV), os valores máximos e mínimos, e o desvio padrão, entre outras.

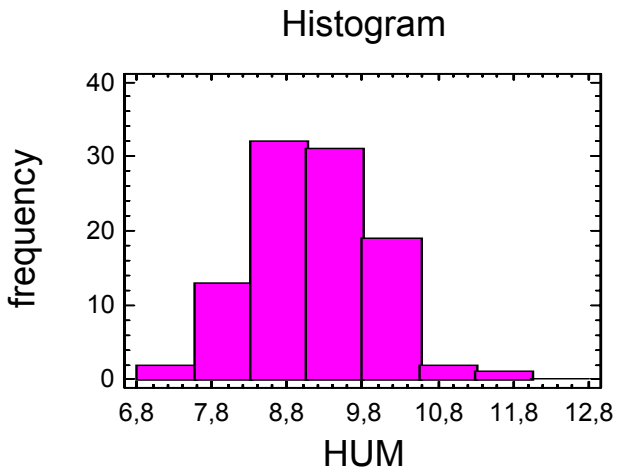
Analisemos pois estes resultados para cada uma das variáveis consideradas.

a) TEOR EM ÁGUA

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 9,20%. O CV obtido permite concluir sobre a grande homogeneidade da amostra, relativamente ao parâmetro "*teor em água*".

Quadro 4.2 –Medidas de centralidade e dispersão da variável HUMIDADE para *Pinus radiata.*

Variável	Humidade
Média	9,20
Variância	0,71
Desvio padrão	0,84
C.V. (%)	9,20 %
Mín.	7,10
Max.	11,70
n	100

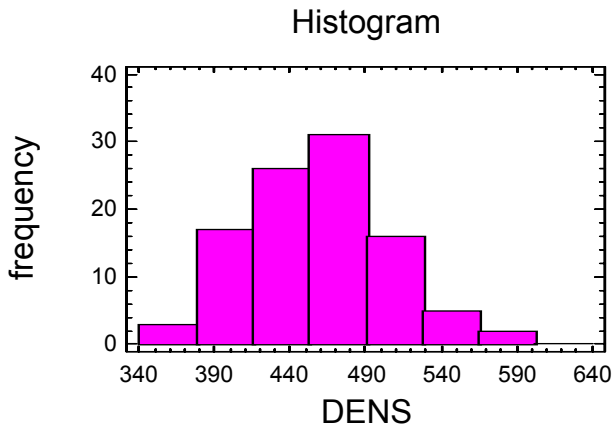


b) MASSA VOLÚMICA

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 457,23 Kg/m^3. O CV obtido permite concluir sobre a grande homogeneidade da amostra, relativamente ao parâmetro "*massa volúmica*".

Quadro 4.3 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MASSA VOLÚMICA para *Pinus radiata.*

Variável	Densidade
Média	457,23
Variância	2088,18
Desvio padrão	45,70
C.V. (%)	9,99 %
Mín.	356,93
Max.	586,80
n	100

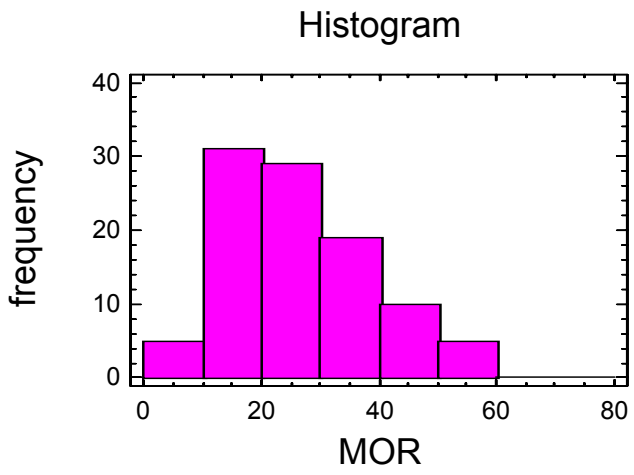


c) MOR

Foram analisados 99 elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 26,60 MPa. O valor elevado do CV pressupõem a existência de diferentes classes resistentes na amostra.

Quadro 4.4 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOR para *Pinus radiata.*

Variável	MOR
Média (MPa)	26,60
Variância	146,07
Desvio padrão	12,09
C.V. (%)	45,44 %
Mín.	5,04
Max.	59,78
n	99

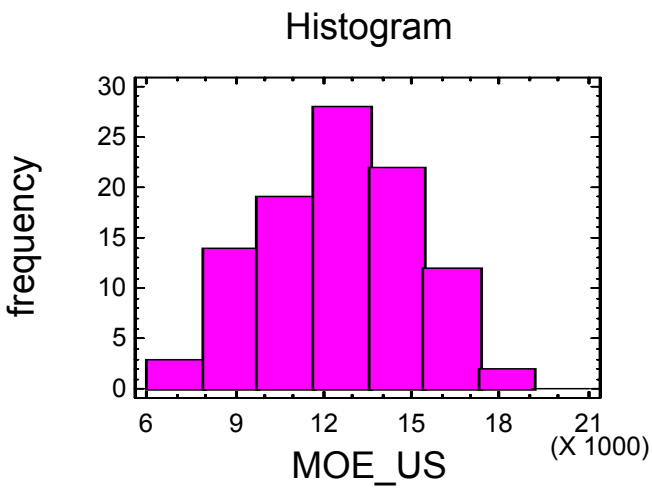


d) MOE_US

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 12,49 GPa. O valor alto do CV confirma o pressuposto da alínea e), isto é, que a amostra engloba elementos de diferentes classes resistentes.

Quadro 4.5 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOE_US para *Pinus radiata.*

Variável	MOE_US
Média (MPa)	12487,00
Variância	6994180
Desvio padrão	2644,65
C.V. (%)	21,18 %
Mín.	6877,96
Max.	18449,20
n	100

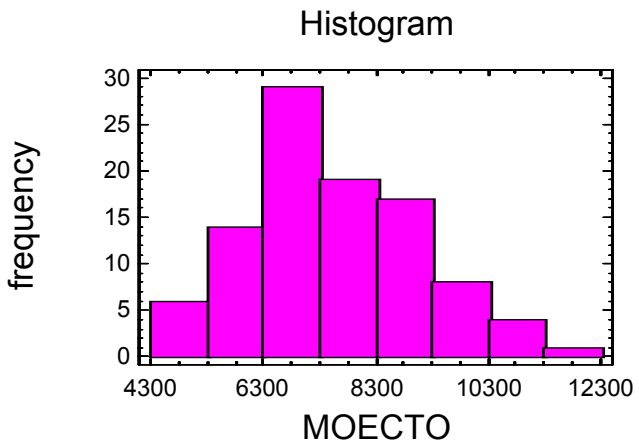


e) MOECTO

Foram analisados 98 elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 7,53 GPa.

Quadro 4.6 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOECTO para *Pinus radiata.*

Variável	MOECTO
Média (MPa)	7525,48
Variância	2380750
Desvio padrão	1542,97
C.V. (%)	20,50 %
Mín.	4723,12
Max.	11340,20
n	98

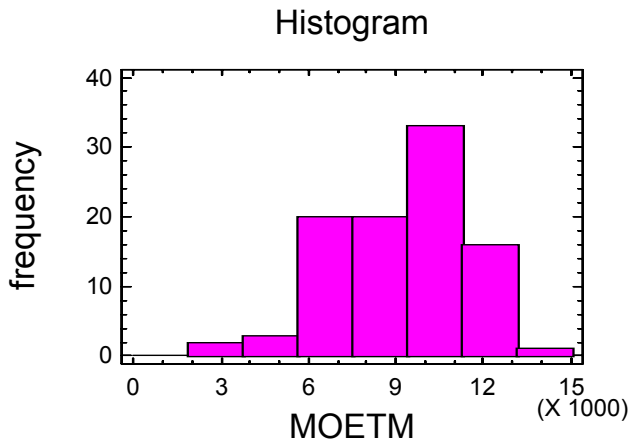


f) MOETM

Foram analisados 95 elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 9,19 GPa.

Quadro 4.7 - Medidas de centralidade e dispersão da variável MOETM para *Pinus radiata.*

Variável	MOETM
Média (MPa)	9193,15
Variância	4982950
Desvio padrão	2232,25
C.V. (%)	24,28 %
Mín.	2203,95
Max.	13600,50
n	95

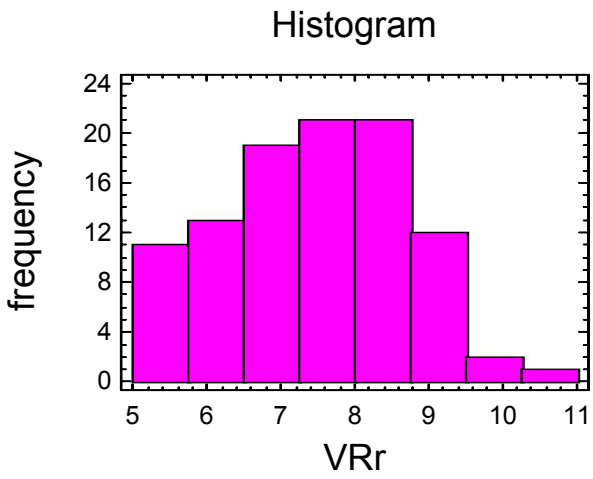


g) VRr

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 7,49.

Quadro 4.8 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VRr para *Pinus radiata.*

Variável	VRr
Média	7,49
Variância	1,50
Desvio padrão	1,22
C.V. (%)	16,32 %
Mín.	5,26
Max.	10,33
n	100

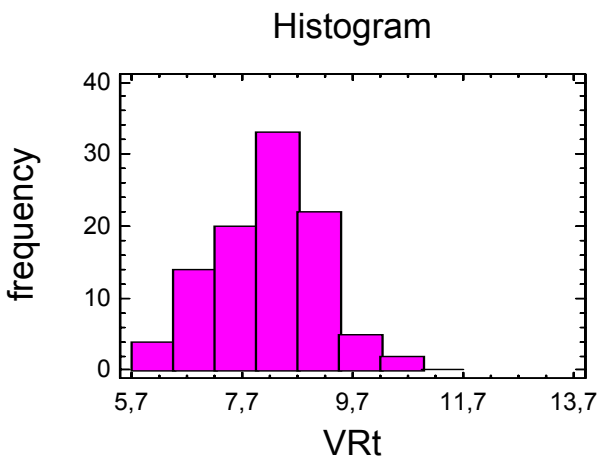


h) VRt

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 8,18. Verifica-se, conforme já exposto, que o valor tangencial médio é superior ao valor médio radial, na ordem de 9 % (valores médios).

Quadro 4.9 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VRt para *Pinus radiata.*

Variável	VRt
Média	8,18
Variância	0,94
Desvio padrão	0,97
C.V. (%)	11,85 %
Mín.	6,01
Max.	10,86
n	100

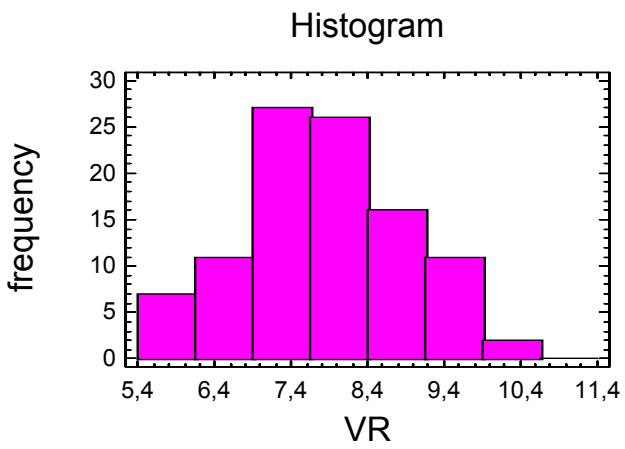


i) VR

Foi analisada a totalidade dos elementos da amostra, tendo-se obtido o valor médio de 7,84.

Quadro 4.10 - Medidas de centralidade e dispersão da variável VR para *Pinus radiata.*

Variável	VR
Média	7,84
Variância	1,06
Desvio padrão	1,03
C.V. (%)	13,16 %
Mín.	5,74
Max.	10,59
n	100



4.3.3.2 Análise de regressão entre variáveis

Após a análise descritiva de cada uma das variáveis, procedeu-se ao relacionamento entre os seus dados quantitativos, através de uma análise de regressão simples, ou seja, estabelecendo a caracterização de uma amostra bivariada de dados quantitativos (uma variável dependente e uma variável independente).

A amostra foi representada num sistema de eixos ortogonal e, seguidamente, procedeu-se ao ajuste de um recta que melhor se adapta ao conjuntos de dados, pelo método dos mínimos quadrados. Verificou-se que o modelo de regressão linear é aquele que garante um melhor ajuste.

Esta metodologia permite abordar a relação entre as diversas variáveis através de uma expressão numérica, associada a um determinado coeficiente de determinação (R^2), e assim pôr em evidência a relação existente entre determinadas propriedades mecânicas e/ou resultados de ensaios não destrutivos para o *Pinus radiata*.

Este processo de cálculo foi realizado pelo CIFOR-INIA, em Madrid, em Junho de 2005, tendo os resultados sido fornecidos ao autor, para análise e tratamento, de acordo com o âmbito desta dissertação. Para tal, foi utilizado o software de cálculo estatístico de referência comercial STATOGRAPHIC.

Os resultados do cálculo estatístico podem ser observados no Quadro 4.11, onde se indicam as variáveis utilizadas, os coeficientes de determinação, o modelo de regressão adoptado e, por fim, a equação modelo que traduz a relação existente entre as variáveis. Nos gráficos 4.1 a 4.12 representa-se o ajuste gráfico à amostra bivariada.

Quadro 4.11 - Análise de regressão entre variáveis, para *Pinus radiata.*

Var. Dependente	Var. Independente	R^2 (%)	Modelo	Equação modelo	
MOE_US	MOECTO	54,32 %	Linear	MOE_US = 3194,74 + 1,23991*MOECTO	[4.1]
MOECTO	MOETM	49,36 %	Linear	MOECTO = 2894,52 + 0,501913*MOETM	[4.2]
MOE_US	MOETM	78,12 %	Linear	MOE_US = 2430,73 + 1,09086*MOETM	[4.3]
VRr	VR	91,35 %	Linear	VRr = -1,26025 + 1,11575*VR	[4.4]
VRt	VR	87,07 %	Linear	VRt = 1,28629 + 0,879157*VR	[4.5]
MOR	DENSIDADE	14,44 %	Linear	MOR = -13,6664 + 0,0858807*DENSIDADE	[4.6]
MOR	VR	23,61 %	Linear	MOR = -9,51805 + 4,3744*VR	[4.7]
MOR	MOE_US	33,13 %	Linear	MOR = 0,651785 + 0,00190144*MOE_US	[4.8]
MOR	MOECTO	42,47 %	Linear	MOR = -8,94636 + 0,00457203*MOECTO	[4.9]
MOR	MOETM	44,46 %	Linear	MOR = -3,92018 + 0,00316916*MOETM	[4.10]
MOETM	VR	46,81 %	Linear	MOETM = -2487,10 + 1486,20*VR	[4.11]
DENSIDADE	VR	70,09 %	Linear	DENSIDADE = 166,51 + 37,076*VR	[4.12]

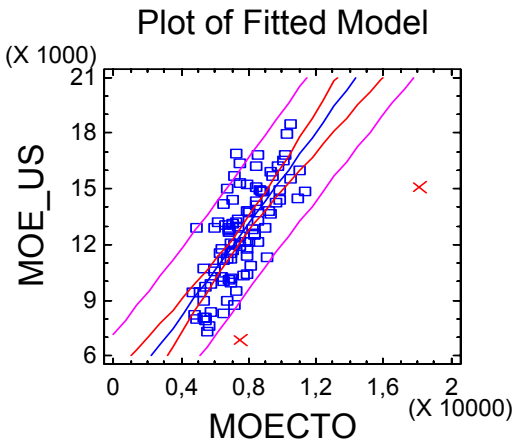


Gráfico 4.1 – MOE_US vs MOECTO

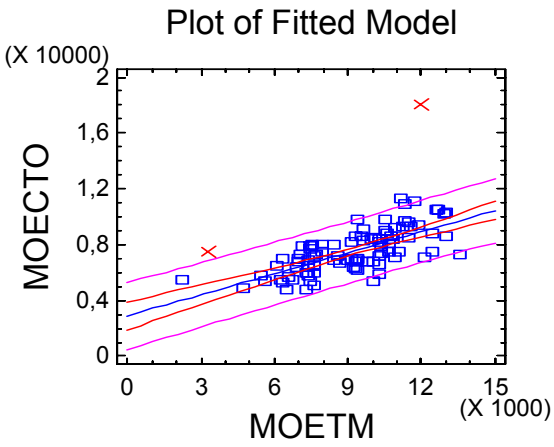


Gráfico 4.2– MOECTO vs MOETM

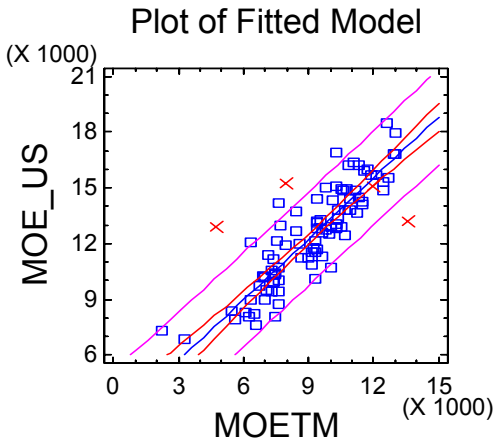


Gráfico 4.3 – MOE_US vs MOETM

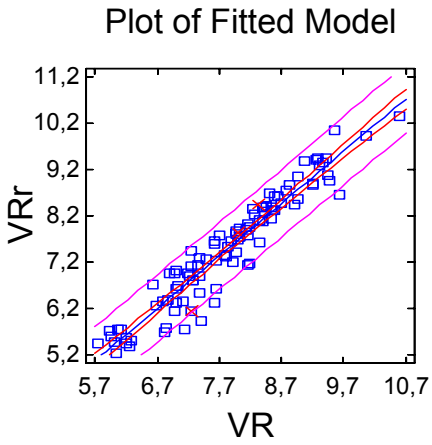


Gráfico 4.4 – VRr vs VR

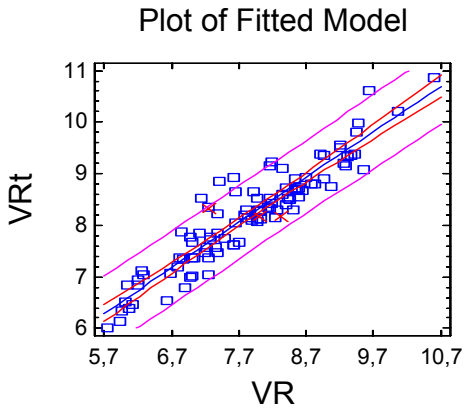


Gráfico 4.5 – VRt vs VR

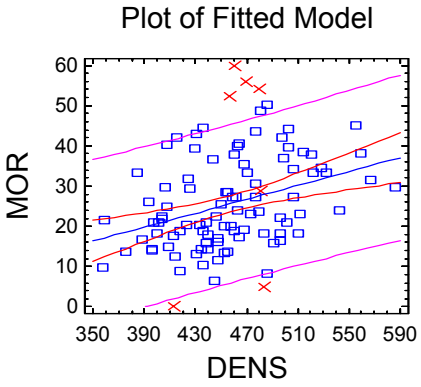


Gráfico 4.6 – MOR vs DENSIDADE

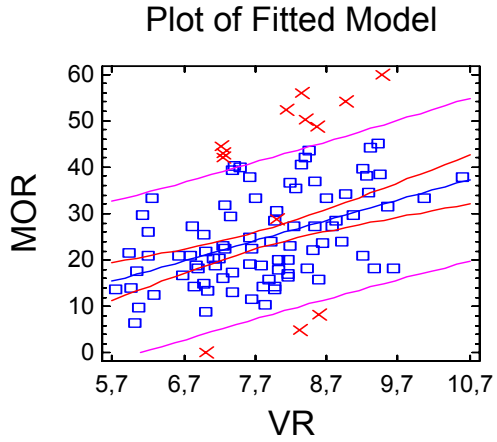


Gráfico 4.7 – MOR vs VR

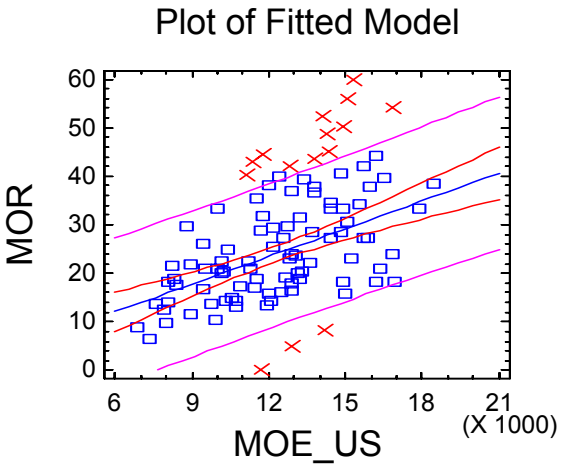


Gráfico 4.8 – MOR vs MOE_US

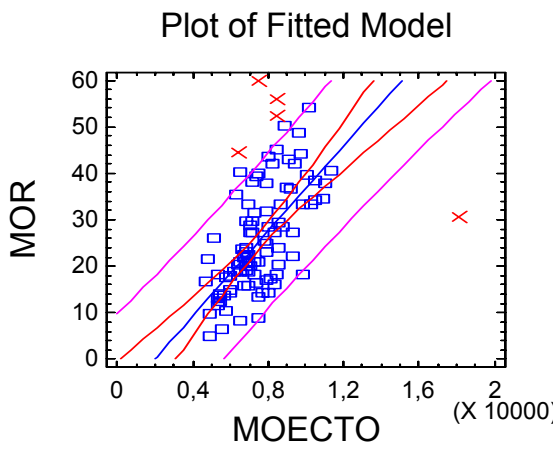


Gráfico 4.9 – MOR vs MOECTO

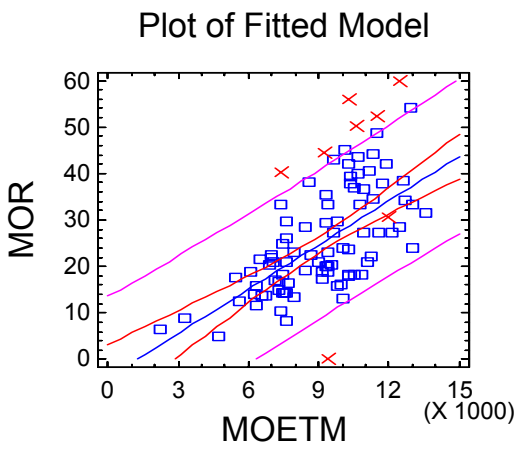


Gráfico 4.10 – MOR vs MOETM

Dado que não haviam sido calculadas pelo CIFOR-INIA, e uma vez que se considerou importante o estudo destas relações, o autor desenvolveu as correlações entre **VR e MOETM** e entre **VR e MASSA VOLÚMICA**, de forma a se averiguar até que ponto o *Resistograph* poderá ser interessante na análise do módulo de elasticidade e da massa volúmica, para elementos de madeira de *Pinus radiata*.

Para tal foi utilizado como ferramenta de cálculo o software MICROSOFT EXCEL, o qual, ainda que sendo muito menos potente que o STATOGRAPHIC no cálculo estatístico, fornece resultados razoáveis para uma análise de regressão simples.

O coeficiente de determinação obtido, relativamente à correlação entre o valor médio do *Resistograph* (VR) e o módulo de elasticidade (MOETM) da amostragem de *Pinus radiata*, foi de 46,81%, que se considera baixo (ver Quadro 4.11, expressão [11]). No gráfico 4.11 apresenta-se o ajuste da recta que melhor traduz a relação entre as variáveis, assim como a sua respectiva expressão numérica.

Por sua vez, a correlação entre o valor médio do *Resistograph* e o valor da massa volúmica é bastante superior, obtendo-se um R^2 de 70,09% (ver Quadro 4.11, expressão [12]). No gráfico 4.12 apresenta-se o ajuste da recta que melhor traduz a relação entre as variáveis, assim como a sua respectiva expressão numérica.

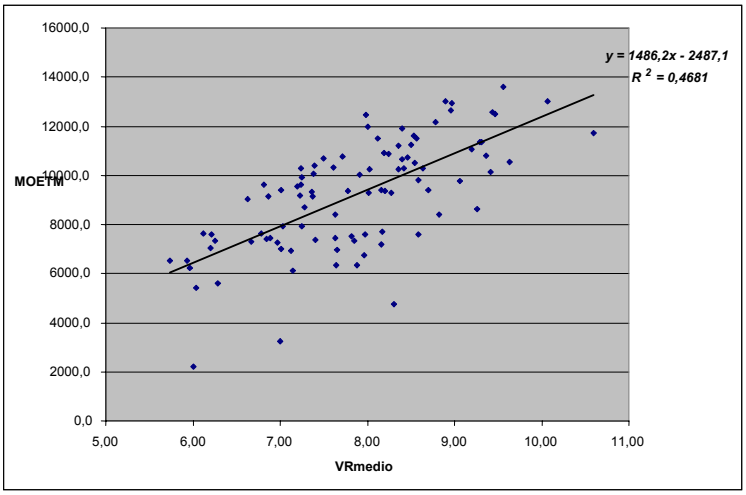


Gráfico 4.11 – Recta de ajuste à nuvem de dados: MOETM = -2487,10 + 1486,20 * $VR_{médio}$ (R^2 = 46,81%)

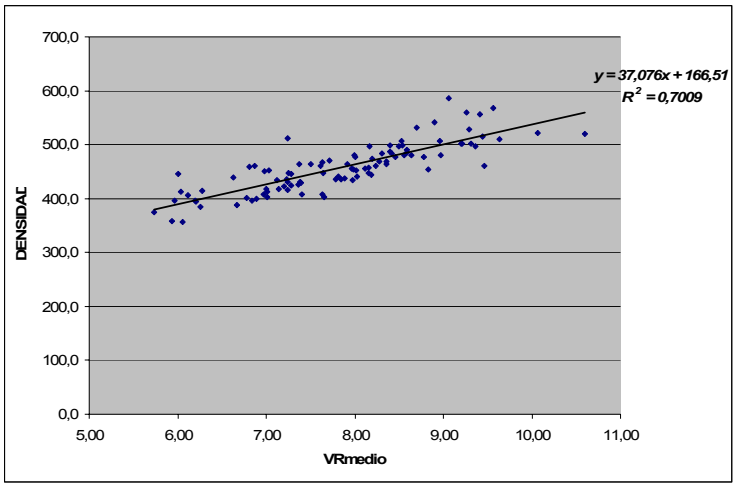


Gráfico 4.12 – Recta de ajuste à nuvem de dados: DENSIDADE = 166,51 + 37,076 * $VR_{médio}$ (R^2 = 70,09%)

A análise dos Quadros 4.11 e 4.12 permite retirar algumas conclusões importantes, as quais se passam a enumerar:

1 – Verifica-se uma grande correlação entre o $VR_{médio}$ e o VR_{radial} (R^2 = 91,35 %), e o $VR_{médio}$ e $VR_{tangencial}$ (R^2 = 87,07 %), conforme referido no ponto 4.3.2, pelo que se considera ser admissível usar um valor médio do *Resistograph* para análise, dado que nas medições *in situ* não é, regra geral, possível fazer essa distinção;

2 – Verifica-se uma boa correlação entre o MOE_US e módulo de elasticidade MOETM (R^2 = 78,12 %), confirmando-se, para o *Pinus radiata,* o que já vários autores têm referido relativamente à relação existente entre estas duas propriedades (conforme exposto em 3.2.2);

3 – A correlação obtida entre o VR e o MOETM é baixa (R^2 = 46,81 %), pelo que esta técnica, usada isoladamente, é insuficiente para a avaliação do Módulo de Elasticidade de elementos estruturais de madeira, para o *Pinus radiata*;

4 – O *Resistograph* pode ser utilizado isoladamente para a estimativa da massa volúmica de elementos de madeira de *Pinus radiata*, dado que se obteve uma correlação razoável entre estas duas variáveis (R^2 = 70,09 %);

5 - Verifica-se uma correlação bastante baixa entre o valor de MOR e o de VR (R^2 = 23,61%), concluindo-se, pelo menos para o *Pinus radiata*, que é insuficiente o uso isolado do *Resistograph* como método de avaliação do MOR, aplicando esta expressão. O mesmo se pode concluir relativamente ao MOETM, dado que a relação obtida, ainda que bastante mais alta que a anterior, é ainda insuficiente (R^2 = 46,81%);

6 – A correlação entre o MOR e o MOE_US é baixa (33,13%), pelo que se considera insuficiente o uso isolado do *Sylvatest* como método de avaliação do MOR, pela aplicação desta expressão.

Perante o exposto, conclui-se que o uso isolado das técnicas do *Resistograph* e *Sylvatest* para a obtenção dos valores de módulo de rotura e módulo de elasticidade, na direcção do fio, em elementos estruturais *in situ*, para o *Pinus radiata*, é pouco prudente, dado que se obtiveram valores de correlação baixos. A única excepção verifica-se para a relação existente entre o MOE_US e o módulo de elasticidade, tendo-se obtido uma correlação razoável (R^2 = 78,12%), reforçando o já referido, relativamente aos estudos desenvolvidos por diversos autores.

4.3.3.3 Análise de regressão com duas variáveis regressoras

Após os resultados e conclusões do capítulo 4.3.3.2, procurou-se estudar uma expressão de garantisse uma maior fiabilidade e correlação entre as propriedades mecânicas, as quais se pretendem apurar para a caracterização da capacidade resistente de peças de madeira de *Pinus radiata*, e os ensaios não destrutivos do *Resistograph* e *Sylvatest*. Assim, desenvolveram-se cálculos estatísticos de análise de regressão com duas variáveis regressoras (regressão múltipla).

Tal como a análise estatística realizada no sub-capítulo anterior, o cálculo de regressões múltiplas que seguidamente se apresenta foi realizado pelo CIFOR-INIA, em Madrid, em Junho de 2005, tendo os resultados sido fornecidos ao autor, para análise e tratamento, de acordo com o âmbito desta dissertação. Foi igualmente utilizado o software de cálculo estatístico de referência comercial STATOGRAPHIC.

Obtiveram-se as seguintes equações da análise de regressão com duas variáveis regressoras:

$$MOR = -5{,}2518 + 0{,}00228291*MOE_US + 0{,}392635*VR \qquad \mathbf{R^2 = 26{,}74\%} \qquad [4.13]$$

$$MOECTO = 1870{,}59 + 0{,}38321*MOE_US + 111{,}701*VR \qquad \mathbf{R^2 = 52{,}17\%} \qquad [4.14]$$

Como é visível, ainda assim, foram obtidos valores de R^2 bastante baixos, para as regressões com a utilização combinada das técnicas do *Resistograph* e *Sylvatest*, e o valor de tensão de rotura à flexão na direcção do fio (MOR) e valor de módulo de elasticidade na direcção do fio da face traccionada (MOECTO).

Assim, julga-se pouco prudente a aplicação directa das expressões [4.13] e [4.14] na avaliação *in situ* da capacidade resistente de estruturas de *Pinus radiata*, dado que, além das correlações obtidas não serem muito elevadas, as peças ensaiadas foram seleccionadas, não possuindo qualquer degradação biológica ou física, o que nem sempre sucede em estruturas em serviço.

Porém, dado o maior rigor na caracterização dos elementos estruturais de madeira, esta metodologia poderá ter bastante interesse na avaliação dos valores das propriedades mecânicas em Laboratório e respectiva classificação em classes de qualidade e/ou resistência.

A melhor forma de o fazer consiste na utilização dos métodos não destrutivos para classificar madeira de forma expedita e usar em seguida os valores indicados nas normas europeias aplicáveis (EN338 e EN1912), conhecida a espécie e a classe de qualidade da madeira e/ou as principais propriedades mecânicas (ρ , E_O e f_m), conhecida ou não a espécie de madeira.

Conhecida a massa volúmica média das peças a ensaiar (verificou-se que o *Resistograph* é um bom estimador desta propriedade), através da realização de ensaios laboratoriais, é possível usar o *Sylvatest* como método alternativo de classificação de madeiras aos métodos correntemente utilizados (classificação visual ou classificação por máquina segundo normas de classificação).

4.3.3.4 Ajuste de equações e intervalos de confiança

Para que este estudo pudesse constituir uma ferramenta efectiva e enquadrada com as condições reais da inspecção de elementos de madeira *in situ*, procurou-se ajustar as expressões [4.3], [4.7], [4.8] e [4.11] a intervalos de confiança mais realistas e seguros.

Assim, estudaram-se expressões que permitissem incluir 95% dos resultados reais acima dos valores estimados pelos ensaios não destrutivos, por se ter concluído que não é possível obter, por ensaios não destrutivos, avaliações quantitativas totalmente fiáveis sem se ser extremamente cauteloso na análise.

Esta operação de cálculo consistiu, graficamente, na translação da equação linear que traduz a tendência da amostragem para as expressões [4.3], [4.7], [4.8] e [4.11], de forma que a mesma contivesse 95% dos dados em análise.

Esta metodologia, que teve por base o proposto por Lladró na sua Tese de Doutoramento (Lladró, 2003), ainda que subestime, do lado da segurança, os valores reais da amostragem, não será demasiadamente conservativa para a inspecção de estruturas *in situ*, pelas razões já apontadas.

Obtiveram-se assim as seguintes expressões, para a espécie ***Pinus radiata***, utilizando agora a notação preconizada no Eurocódigo 5:

$$E_O = -4531{,}234 + 0{,}91670792 * MOE_US \quad [4.15]$$

$$f_m = -10{,}1462 + 0{,}00190144 * MOE_US \quad [4.16]$$

$$f_m = -21{,}896 + 4{,}3744 * VR \quad [4.17]$$

$$E_O = 1486{,}2 * VR - 5381{,}9537 \quad [4.18]$$

4.3.4 Resultados do cálculo estatístico

De modo a poder ter-se uma percepção do intervalo de valores que as expressões [4.15], [4.16], [4.17] e [4.18] produzem, foram aplicados os dados dos ensaios do *Resistograph* e do *Sylvatest*, tendo-se realizado a média das diferenças entre os valores dos ensaios destrutivos de E_O e f_m, obtidos por ensaios mecânicos, e os valores obtidos pelas referidas expressões.

Quadro 4.12 – Diferença entre os valores reais de E_O e f_m e os valores obtidos pelo uso de técnicas não destrutivas, de acordo com a metodologia proposta.

	[4.15] (MPa)	**[4.16]** (MPa)	**[4.17]** (MPa)	**[4.18]** (MPa)
Diferença MÉDIA Valores Destrut. - MÉDIA Valores TND	2254,72	12,99	14,16	2895,11
VALOR EM PERCENTAGEM	24,5%	48,8%	53,2%	31,5%

Pela análise do Quadro 4.12, constata-se que os ensaios não destrutivos (*Resistograph* e *Sylvatest*) conduzem a valores inferiores em cerca de 30%, no caso do E_O, e cerca de 50%, no caso do f_m, o que nos permite concluir que a aplicação das expressões [4.15] a [4.18] conduz a resultados seguros, embora francamente conservadores.

Por fim, com base nas mesmas expressões, propõem-se um intervalo de classificação para madeiras de *Pinus radiata*, segundo a EN1912, através do uso do *Resistograph*, o qual é apenas indicativo, dado que produz resultados bastante conservadores (quadro 4.13).

O facto da amostra ser bastante reduzida poderá ser uma explicação para os resultados observados, pelo que, caso a mesma metodologia de análise fosse realizada numa amostra de maiores dimensões, por certo se obteriam intervalos de classificação mais ajustados e coeficientes de determinação mais elevados.

Quadro 4.13 – Intervalo de classes resistentes pelo uso do *Resistograph*, para o Pinus radiata, de acordo com a EN1912.

Classificação	**Intervalo**
Madeira rejeitada para estruturas	$VR_{médio} < 9,1$
Classe Resistente C18	$9,1 \leq VR_{médio} < 11,9$
Classe Resistente C30	$VR_{médio} > 11,9$

4.4 Principais conclusões

Após a realização do procedimento de ensaio e metodologia de cálculo estatístico descritos, foi possível retirar algumas conclusões importantes, as quais se passam a enumerar:

1. O ensaio do *Resistograph* permitiu concluir que existe uma correlação bastante alta, na ordem dos 90%, entre os valores de $VR_{médio}$, $VR_{tangencial}$ e VR_{radial}, pelo que se considera admissível utilizar o valor médio das medições efectuadas no elemento estrutural em análise, no caso do *Pinus radiata*. Este ponto é bastante importante para a inspecção de estruturas *in situ*, dado que na maior parte dos casos não é possível aceder aos topos das vigas, e por isso torna-se difícil ou impossível distinguir entre medições radiais e tangenciais;

2. O *Resistograph* pode ser utilizado como estimador da massa volúmica de elementos estruturais de madeira de *Pinus radiata*, tendo sido obtido um R^2 da ordem dos 70,1%;

3. O *Sylvatest* é um bom estimador do módulo de elasticidade de elementos estruturais de madeira de *Pinus radiata*, tendo sido obtido um R^2 da ordem dos 78,1%;

4. O uso isolado das técnicas do *Resistograph* e *Sylvatest* para a classificação estrutural de peças de *Pinus radiata*, nomeadamente, para a obtenção dos valores de módulo de rotura e módulo de elasticidade, na direcção do fio, em elementos estruturais *in situ*, é pouco prudente, dado que se obtiveram valores de correlação demasiadamente baixos. Daqui se exclui o referido nos pontos 2 e 3 deste conjunto de conclusões;

5. Ao contrário do esperado, o cálculo estatístico de correlação com duas variáveis regressoras independentes, o $VR_{médio}$ e o MOE_US, gerou correlações francamente baixas, pelo que não se aconselha a sua utilização, pelo menos para a inspecção de elementos estruturais *in situ*. Julga-se que tal acontecimento poderá estar relacionado com o facto da dimensão da amostra ser relativamente reduzida (100 vigas de *Pinus radiata* em análise);

6. No seguimento do ponto anterior, e conforme já exposto, optou-se por tratar as expressões obtidas, efectuando uma translação da equação de ajuste, de forma a incluir 95% dos resultados obtidos. As expressões obtidas produzem valores inferiores em cerca de 30%, para o E_O, e cerca de 50%, para o f_m;

7. Os resultados obtidos pelo uso das expressões do ponto anterior são francamente conservativos, sendo que, no entanto, se julgam ajustados para a inspecção de elementos estruturais *in situ*, permitindo obter resultados bastante mais interessantes do que a classificação visual.

   Segundo Capuz (Capuz, 2003), a norma espanhola de classificação visual apenas atinge 40% de efectividade real, quando comparada com os resultados dos ensaios mecânicos de rotura (EN 408) nos mesmos elementos, sendo que no caso da classificação mecânica por deformação (EN 14081) se atinge uma efectividade de 65%.

   Para além disso, as metodologias de classificação visual, além de exigirem o envolvimento de um técnico especializado e experiente, bem como a análise exaustiva de uma grande quantidade de factores, são pouco sensíveis à existência de defeitos internos, os quais podem ter bastante influência no valor da tensão de rotura da peça. Da mesma forma, no caso de elementos estruturais em serviço, frequentemente não é possível inspeccionar todas as secções da peça, pelo que se torna difícil a sua aplicação.

   Perante o exposto, conclui-se que a classificação estrutural com o recurso às técnicas não destrutivas do *Resistograph* e do *Sylvatest*, nomeadamente pelo uso das expressões [4.15] a [4.18], para o *Pinus radiata*, é bastante interessante e pode fornecer resultados complementares ou alternativos da classificação visual, com bastante interesse prático.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA A AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PINUS NIGRA. CASO PRÁTICO DE ESTUDO – "LA LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA"

5.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se um caso prático de estudo, realizado pelo autor, através da Universidad Politécnica de Valencia, entre Março e Julho de 2005, o qual diz respeito à inspecção e classificação estrutural, com recurso a técnicas não destrutivas, de vigas de madeira de um edifício monumental situado na cidade de Valência (Espanha). Este imóvel é denominado de **"La Lonja de los Mercaderes de Valencia"** e a sua construção data do séc. XV, sendo que se encontra inscrito como Património Mundial UNESCO, desde 1996.

A metodologia de inspecção tinha como objectivo avaliar a capacidade resistente das vigas de madeira existentes, com o emprego de técnicas não destrutivas, nomeadamente, o *Resistrograph*, o *Sylvatest* e o *Georradar*. Em relação a esta última técnica, apenas se fazem algumas referências e comentários à sua utilização, pois, ainda que tenha acompanhado o processo, o autor não foi responsável pela sua execução, e os resultados finais não estavam completamente disponíveis no momento de escrita deste trabalho.

Este processo de inspecção e classificação estrutural está inserido num Projecto de Reabilitação, promovido pelo Ayuntamiento de Valencia, e desenvolveu-se entre 2004 e 2006. A autoria do projecto de intervenção e a direcção técnica da empreitada esteve a cargo do doutor arquitecto Manuel Jesus Ramírez, por intermédio do FÓRUM UNESCO – Universidad y Património, da Universidad Politécnica de Valencia, sendo que o mesmo desenvolveu a sua tese de doutoramento sobre a construção de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", a qual tem como título "*La Lonja de Valencia y su conjunto monumental. Origen y desarrollo constructivo. Evolución de sus estructuras. Sinopsis de las intervenciones más relevantes. Siglos XV al XX"* (Ramírez, 1999). Este estudo tem servido de impulso a diversas iniciativas e projectos de investigação, em que participaram professores, especialistas e alunos de diversas universidades europeias, e de que é exemplo este trabalho de investigação.

Por peritagem do Laboratório de Estruturas de Madeira do CIFOR-INIA (Instituto Nacional de Investigación Agrária, Madrid, Espanha) foi identificada a espécie das vigas de madeira como **Pinus nigra Arn**. de Cuenca (Pinho laricio, conforme designação corrente adoptada em Portugal).

Figura 5.1 - Vista da fachada principal de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia"

5.2 Objecto e base de trabalho

O objecto do trabalho consistiu em estabelecer uma classificação resistente dos elementos ensaiados com base na utilização de métodos não destrutivos (*Resistograph* e *Sylvatest*), relacionando os valores obtidos *in situ*, com as correlações entre as propriedades mecânicas e os ensaios não destrutivos conhecidos para a espécie de madeira presente.

Assim, o que se pretendia era a aplicação de expressões obtidas em laboratório, resultantes do cálculo estatístico de correlação entre as propriedades mecânicas e os valores dos ensaios não destrutivos, com os resultados obtidos *in situ*, ou seja, usando estas fórmulas como método de classificação em classes resistentes (ver figura 5.2) e "calibração" do uso dos aparelhos referidos.

Numa análise preliminar, pensou-se que a espécie presente em "La Lonja" fosse o *Pinus radiata*, e então era possível aplicar todo o processo metodológico de classificação proposto neste trabalho, sendo que se utilizariam os dados obtidos obtidos em laboratório e expressões propostas no Capítulo 4, para a classificação resistente dos elementos ensaiados *in situ*.

Após terem sido recolhidas amostras dos elementos de madeira para análise laboratorial, por peritagem do laboratório CIFOR-INIA concluiu-se, porém, que a espécie presente é *Pinus nigra Arn.*.

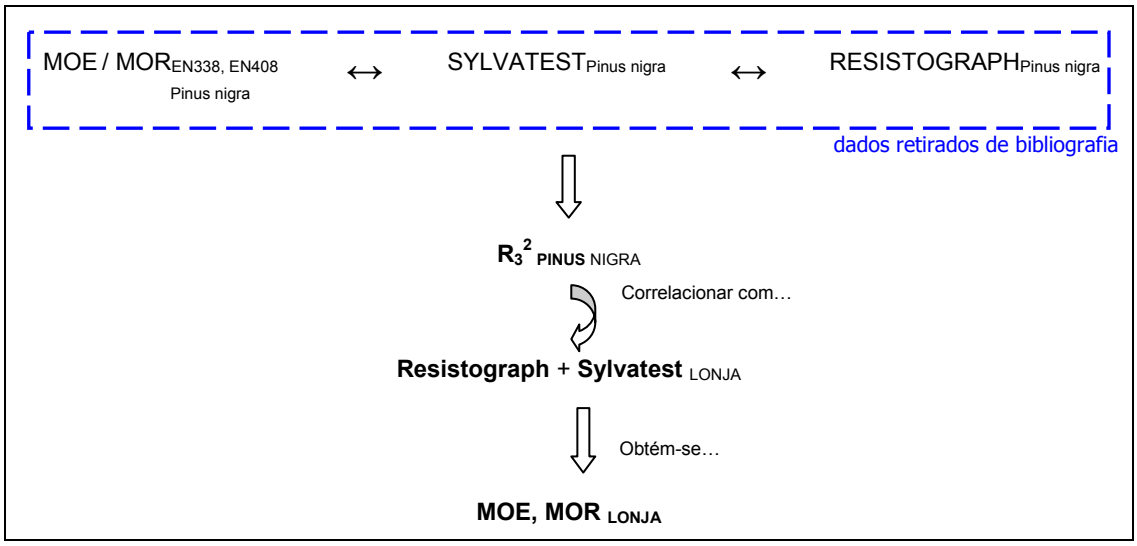


Figura 5.2 - Esquema ilustrativo da metodologia de cálculo a desenvolver

No entanto, este facto não invalida a aplicação da metodologia proposta, uma vez que são conhecidos estudos similares ao desenvolvido no Capítulo 4, os quais propõem uma correlação, para o *Pinus nigra*, entre as propriedades mecânicas e os referidos ensaios não destrutivos (Capuz, 2003):

$$MOR = 4{,}74x10^{-3} \times MOESILV + 6{,}46 \times VRmedio \qquad \mathbf{R^2 = 52{,}56\%} \qquad (n=122) \qquad [5.1]$$

$$MOETO = 0{,}68 \times MOESILV + 399{,}75 \times VRmedio \qquad \mathbf{R^2 = 61{,}73\%} \qquad (n=123) \qquad [5.2]$$

As expressões [5.1] e [5.2] são o resultado de um procedimento laboratorial aplicado a uma amostra de 127 vigas de *Pinus nigra Arn.* (de origem de Cazorla, Espanha), por métodos destrutivos, de acordo com a EN338 e EN408, e métodos não destrutivos, o *Resistograph* e o *Sylvatest*. Verifica-se que as correlações obtidas não são muito elevadas, por razões similares às apontadas nesta dissertação.

Assim, e de forma análoga à descrita no Capítulo 4, Capuz sugere uma expressão [5.3], que contém 95% dos dados da amostragem, podendo a mesma ser utilizada para a classificação estrutural de elementos de madeira de *Pinus nigra Arn.*, através do uso do *Resistograph*:

$$MOR = -62.97+8{,}86 \times VRmedio \qquad [5.3]$$

Dado que Capuz não desenvolveu uma expressão análoga à expressão [5.3], para o *Sylvatest*, adoptou-se a metodologia proposta por Francisco Arriaga (Arriaga, 2002), para a inspecção com o

uso do referido aparelho, conforme exposto no capítulo 3.4.2 desta dissertação. Assim, foi aplicado o seguinte intervalo de classificação, em função dos resultados do *Sylvatest*:

V_{baixa} = 4.100 a 4.600 m/s : Classe resistente C14 a C16.
$V_{média}$ = 4.600 a 5.100 m/s : Classe resistente C18.
V_{alta} = 5.100 a 5.400 m/s : Classe resistente C22

Ainda que não tenha sido possível aplicar a metodologia de classificação da mesma forma que a desenvolvida no capítulo 4, procurou-se utilizar a informação dos métodos do *Resistograph* e *Sylvatest*, de modo a que o cruzamento de informação de ambas as técnicas garantisse uma maior fiabilidade do processo de avaliação da capacidade resistente dos elementos estruturais em análise.

Por fim, refira-se que o trabalho de inspecção descrito diz respeito à avaliação da capacidade resistente de **13 vigas de madeira** de *Pinus nigra Arn.*, que formam o tecto do "Salón del Comercio" do referido edifício e suportam o pavimento do piso superior ("Salón del Consulado"). Não fazem parte da presente análise, a avaliação da contribuição dos restantes elementos de madeira que constituem o pavimento, bem como dos vários elementos estruturais de madeira do edifício.

5.3 Metodologia de inspecção

Conforme foi já referido, este trabalho pretende estabelecer uma metodologia de avaliação das propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira usando valores de ensaios não destrutivos, obtidos *in situ,* através dos métodos do *Resistograph* e *Sylvatest*.

Nesse sentido, foi adoptado um conjunto de procedimentos particulares, que seguidamente serão descritos, os quais se consideram indispensáveis quando se intervêm num imóvel de elevado valor histórico e artístico como é a "La Lonja de los Mercaderes".

Para além disso, a avaliação do estado de conservação e capacidade resistente de uma estrutura de madeira é um processo que não deve apenas incidir sobre a estrutura em questão, mas sim, constituir uma metodologia multidisciplinar que permita uma apreciação global do edifício, sendo assim mais provável a obtenção de conclusões correctas e que garantam uma solução de intervenção válida, no contexto da estrutura de madeira no edifício.

Assim sendo, a metodologia empregue para a inspecção dos elementos estruturais de madeira de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia" inclui as seguintes actividades:

- Enquadramento histórico;
- Caracterização construtiva do imóvel;
- Identificação da espécie e qualidade da madeira;
- Levantamento geométrico, fotográfico e de patologias;
- Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – humedímetro;
- Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – *Resistograph;*
- Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – *Sylvatest;*
- Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – Georradar;
- Metodologia de cálculo e discussão dos resultados;
- Classificação da classe de resistência da estrutura de madeira e conclusões.

5.3.1 Enquadramento histórico

A elaboração deste sub-capítulo teve como principal referência os factos publicados na tese de Doutoramento de D. Manuel Ramírez , referida no início deste capítulo.

O edifício em estudo, "La Lonja de los Mercaderes", está situado na cidade de Valência e é um dos mais importantes símbolos da arquitectura gótica civil de Espanha e da Europa.

Imagem da prosperidade económica e poderio mercantil mediterrânico da cidade no século XV, época da sua construção, "La Lonja", como vulgarmente é designada, insere-se num conjunto monumental histórico que compreende os denominados "Plaza del Mercado", "Mercat Central", "Plaza de la Reina", "Iglesia de santa Catalina", "Plaza redonda", "Plaza del collado" e "El Micalet".

Tal como aconteceu com muitos edifícios nesta etapa fértil da arquitectura valenciana, "La Lonja" veio substituir um edifício antigo de iguais funções, bastante degradado e insuficiente para satisfazer as crescentes necessidades dos mercadores valencianos, tendo sido decidido, em 1469, pelo Conselho da Cidade *".....construir un suntuoso edificio que reuniese todas las condiciones y comodidades apetecibles para el objeto a que se le destinaba"* (em Castelhano, extraído de Ramírez, 1999).

De forma a conseguir-se levar a cabo tal empreendimento, a 12 de Janeiro de 1481 (informação extraída da tese de Ramírez e retirada de documentos históricos do Ayuntamento de Valência) foram contratados para projectar e dirigir a construção da nova "Lonja" dois dos mais famosos mestres pedreiros de Valência, Pere Compte e Joan Ivarra. Bastante afamado, pela sua intervenção na Catedral de Valência e por se tratar do mestre pedreiro de maior prestígio na coroa de Aragão, Pere Compte foi o grande responsável pela realização de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", uma vez que Joan Ivarra faleceu quatro anos após o início das obras. De acordo

com o desejo do Conselho da Cidade, Pere Compte encontrou inspiração na "Lonja" de Mallorca, conferindo-lhe maior beleza, grandeza e sumptuosidade, de forma a materializar o poderio económico mediterrânico da cidade de Valência, perante outras cidades de forte influência como Mallorca e Barcelona. Posteriormente sucederam-lhe outros importantes mestres pedreiros, responsáveis pela introdução de elementos decorativos renascentistas.

Em 26 de Dezembro de 1482 foi colocada a primeira pedra e no mesmo mês, do ano de 1498, dão-se por concluídas as obras da "Lonja", cujo tempo recorde de execução foi mais um indicador da relevante posição social e política da próspera Valência do século XV (segundo Ramírez, apesar de o início oficial da obra ter sido em 1482, por falta de fundo monetários, apenas a 5 de Fevereiro de 1483 se iniciaram efectivamente os trabalhos).

Durante cinco séculos, a "Lonja de los Mercaderes de Valencia" manteve a sua actividade comercial e importância como símbolo da prosperidade da cidade, fruto da sua dedicação à agricultura e ao comércio. Por este facto, aliadas às diversas intervenções de conservação realizadas, das quais se destaca a que vem sendo levada a cabo desde 1995 pelo arquitecto Manuel Ramírez, através do FORUM-UNESCO, da Universidad Politécnica de Valencia, e na qual se insere o trabalho prático realizado, este monumento encontra-se em excelente estado de conservação.

Em 1931, a "Lonja de los Mercaderes" foi declarada como Monumento Nacional Histórico, e desde 1996 encontra-se inscrita como Património da Humanidade da UNESCO, pela sua riqueza artística, histórica e construtiva.

Desde os anos 80, a "La Lonja de los Mercaderes" manteve encerrado o "Salón del Consulado" aos visitantes, dada a nefasta acção que as térmitas provocaram na estrutura de madeira do pavimento, a qual foi alvo do processo de inspecção desenvolvido neste trabalho. Em Julho de 2006, cerca de 20 anos depois, reabre as suas portas ao público, concluído que está o processo de restauro de que foi alvo.

5.3.2 Descrição construtiva

"La Lonja de los Mercaderes" é constituída por 3 corpos edificados distintos, o "Salón Columnario", o "Torréon" e o "Consulado del Mar" (que designaremos, respectivamente, como *Salão Colunário, Torre* e *Consulado*), um espaço exterior fechado, o "Patio de los Naranjos" (que designaremos como *Pátio*), e algumas construções secundárias de apoio.

Segundo Ramírez, o projecto inicial de "La Lonja" apenas previa a construção do Salão Colunário e Torre, tendo o corpo do Consulado sido construído posteriormente, de uma forma muito mais

lenta e sem ligação estrutural com esta última. De facto, enquanto que as obras de edificação dos primeiros corpos levaram cerca de quinze anos, a construção do Consulado prolongou-se por quase cinquenta.

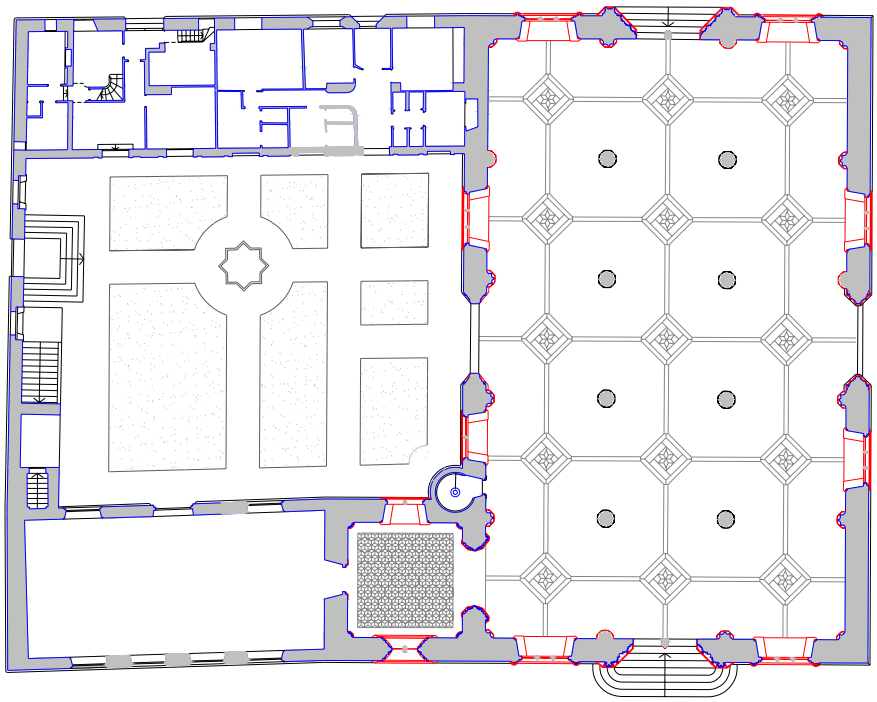


Figura 5.3 - Planta de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia"

Seguidamente faz-se uma breve descrição construtiva de cada um dos corpos edificados descritos.

O ***Salão Colunário*** ou "Sala de Contractación", corresponde ao acesso principal deste conjunto monumental, onde se realizavam as referidas trocas comerciais, sendo constituído por um magnífico e sumptuoso espaço interior de 35,6m x 21,39m, em planta, e uns espectaculares 17,40m, de pé-direito. A sala é coberta por abóbadas góticas em cruz, totalmente construídas em cantaria e ricas em adornos arquitectónicos. A suportar as abóbadas encontram-se oito grandes colunas helicoidais, na zona central, e dezasseis mais, incluídas na parede exterior, construídas em cantaria e que dão o nome a esta sala. As paredes exteriores têm uma tipologia construtiva bastante interessante, sendo que a sua espessura de 1,40m corresponde apenas a cerca de 0,40m de cantaria em ambas as faces, que servem de "cofragem" a um enchimento em argamassa ligante à base de cal. Sobre as abóbadas e paredes exteriores apoia-se a robusta estrutura de madeira da cobertura, a qual foi já alvo de inúmeras intervenções.

O excelente arranjo estrutural do edifício, conseguido à custa da expressiva secção e peso das paredes exteriores de apoio e de uma racional distribuição de esforços pelos vários elementos

verticais, minimizando assim os esforços horizontais, permite o desenho arquitectónico dos muros sem necessidade de prever os robustos contrafortes ou arcobotantes característicos da arquitectura gótica.

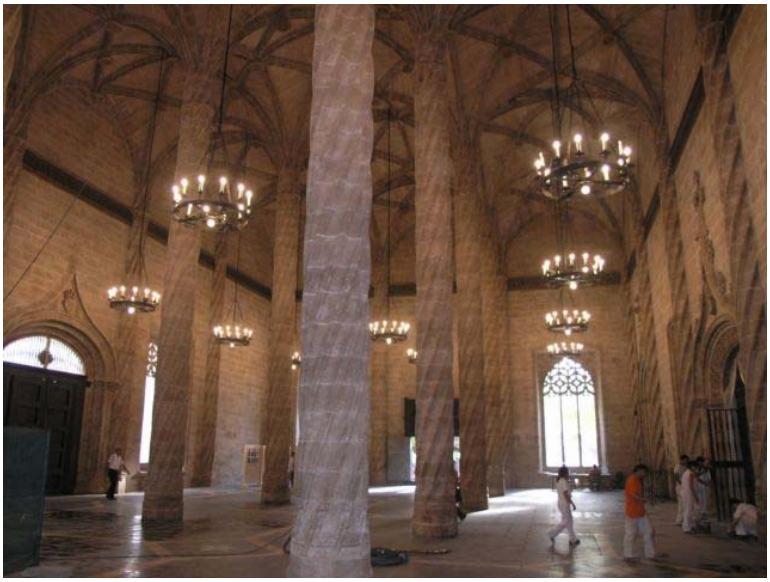


Figura 5.4 - Vista interior do Salão Colunário

A **Torre** é o corpo edificado que articula o Salão Colunário e o edifício do Consulado, sendo que estabelece comunicação com os pisos 1 e 2 deste último, e possuí ainda um terraço a um nível superior do conjunto edificado, zona onde se exibe a bandeira da cidade. Encerra em si um grande valor arquitectónico e construtivo, principalmente devido à excelência, sobriedade e economia da sua obra de cantaria, quer pela forma como são construídas as paredes de suporte, quer, e principalmente, devido à escada em caracol de acesso aos níveis superiores.

A construção deste elemento implicou um grande virtuosismo técnico, sendo considerada por diversos autores como uma verdadeira obra-prima na arte de execução de cantaria:

"....Es un alarde virtuosista, donde Pere Compte demostró sus conocimientos estereotómicos; trátase de una escalera de ojo, es decir, sin eje central, donde el pasamano de piedra, los peldaños y las dovelas de la bóveda helicoidal forman una vívida unidad. El cilindro de la escalera tiene rasgados ventanucos para captar la luz de fuera. El número de peldaños es de 110" (Almela e Vives, retirado de Ramírez, 1999)

Figuras 5.5 e 5.6 - À esquerda, fachada principal da Torre de "La Lonja". À direita, vista da escada em caracol da Torre.

O **edifício do Consulado**, no momento presente, é um corpo constituído por 4 níveis: cave, rés-do-chão ("Salón del Comercio"), piso 1 ("Salón del Consulado") e aproveitamento da cobertura. Originalmente, este corpo edificado seria apenas constituído por 3 níveis, dado que o "Salón del Consulado" foi dividida posteriormente por uma estrutura de pavimento de madeira, de forma a evitar as deformações estruturais das alvenarias (Ramírez, 1999).

Figuras 5.7 e 5.8 - À esquerda, fachada posterior do edifício do Consulado e pátio. À direita, "Salón del Comercio" e vigas de madeira do tecto, após remoção das forras de madeira de revestimento

O sistema construtivo deste corpo edificado caracteriza-se, muito resumidamente, por:

- Elementos verticais de suporte: paredes exteriores de constituição semelhante às do Salão Colunário, e espessuras na ordem de 0,55m (parede Este e Oeste) e 1,10m (parede Norte), sendo que a parede Sul corresponde à alvenaria da Torre;

- Elementos horizontais de suporte: Ao nível do tecto do rés-do-chão, o pavimento é constituído por uma estrutura de abóbadas de tijolo, sobre as quais assenta o pavimento em mosaico, sendo que nos restantes níveis os mesmos são executados em estrutura de madeira, as quais serão posteriormente caracterizadas;
- Cobertura: sistema estrutural de asnas, madres e varas de madeira sobre o qual assenta o telhado em elementos cerâmicos.

A estrutura do tecto da "Salón del Comercio" constitui o objecto da análise deste capítulo, sendo composta por *"…um extraordinário pavimento de madeira de gosto renascentista, (…) composto por 13 vigas de grande secção (sendo que 2 se encontram encostadas às paredes Norte e Sul) forradas totalmente com placas de madeira ornamentadas, sobre as quais se apoia uma substrutura de madeira que serve de plataforma de apoio para o pavimento da piso 1 do corpo do Consulado ("Salón del Consulado"). Entre cada um dos espaços que as vigas deixam livres, construí-se um conjunto de caixotões, ornamentado de molduras quadradas, hexagonais e triangulares. Perimetralmente, existe uma potente moldura em ménsula, a qual remata o encontro da estrutura de madeira do pavimento e o intradorso dos muros de suporte."* (tradução da descrição realizada na tese de Doutoramento de Ramírez, 1999) .

Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 - Em cima à esquerda, estrutura de suporte do pavimento do tecto do "Salón del Comercio". Em cima à direita, moldura e ménsula de apoio das vigas de madeira. À esquerda, vista dos caixotões dispostos no espaço entre as vigas de madeira, das quais foram já retiradas as placas de madeira de revestimento ornamental.

Segundo estudos em curso, julga-se que as vigas de madeira de suporte da estrutura do pavimento, as quais constituem o objecto da presente inspecção, terão sido cortadas

aproximadamente um século antes da data de conclusão da construção de “La Lonja”, tendo pois pelo menos 600 anos de vida, desde o seu abate.

5.3.3 Levantamento geométrico, fotográfico e de patologias

Conforme já referido, foi promovida uma exaustiva caracterização das vigas de madeira em análise, sendo que para tal se realizou um rigoroso levantamento geométrico, fotográfico e de patologias destes elementos estruturais.

No ANEXO II.1 apresenta-se um extracto do relatório de ensaio realizado na Universidad Politécnica de Valencia (Botelho, 2005), nomeadamente, o exemplo de uma ficha de caracterização geométrica realizada para cada uma das 13 vigas.

A realização destas fichas facilita ao técnico responsável pela inspecção dos elementos estruturais uma completa compreensão geométrica e de patologias dos elementos em análise, e por conseguinte, uma maior facilidade na interpretação dos resultados dos ensaios a realizar, pelo que se julga adequado este tipo de abordagem quando se analisam casos desta natureza.

As vigas do “Salón del Consulado” foram numeradas de V1 a V13, de acordo com o seguinte esquema:

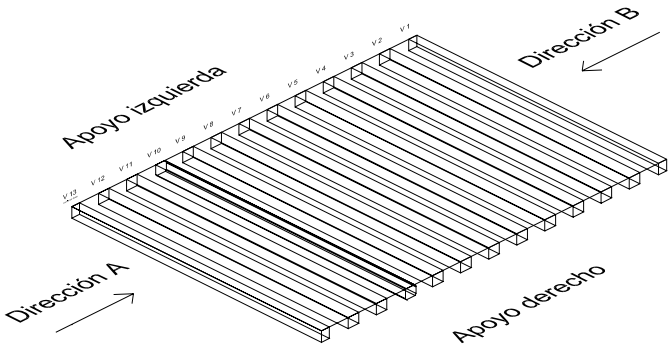


Figura 5.12 - Denominação utilizada para as vigas de madeira da “*Sala del Consulado*”

O apoio esquerdo corresponde à parede que separa o espaço interior do “Salón del Comercio” do espaço exterior do jardim (ver figura 5.3), pelo que o apoio direito corresponde à parede que separa o espaço interior da rua da “Plaza del Mercado”.

Foi realizado um rigoroso levantamento geométrico das 13 vigas do tecto da "Salón del Comercio" , sendo que as mesmas possuem um comprimento médio de **8,25m** e secções transversais conforme exposto no Quadro 5.1.

Verificou-se que alguns apoios das vigas foram anteriormente reconstruídos com resinas epoxy e barras de poliéster, nomeadamente nas vigas V3, V5, V9, V10, V11 e V12.

Da mesma forma, foi detectado o ataque de térmitas já referenciado, e que provocou o encerramento do "Salón del Consulado" há cerca de 20 anos e a reconstrução dos apoios das vigas referidas, com resinas de epoxy e barras de poliéster. Restam ainda visíveis, por inspecção visual, indícios desse ataque na estrutura secundária de suporte do pavimento do "Salón del Consulado", bem como em marcas de antigas galerias de circulação de térmitas nas alvenarias.

Figuras 5.13 e 5.14 - À esquerda, ataque de térmitas na estrutura secundária de suporte do pavimento do "Salón del Consulado". À direita, marca de antiga galeria de térmitas de acesso à estrutura de madeira.

Para uma correcta interpretação dos dados fornecidos pelos métodos não destrutivos, foi realizado, além do levantamento geométrico, um completo levantamento fotográfico e de patologias das vigas (fendas, perdas de secção por ataque de organismos biológicos e reconstrução de secção utilizando resinas epoxy), facilitando a caracterização exaustiva da sua geometria e a classificação visual dos elementos estruturais.

Este procedimento revelou-se como uma importante ferramenta para a classificação visual e interpretação dos resultados dos ensaios não destrutivos, conforme se expõe neste Capítulo.

Porém, apesar de bastante útil e pertinente, este foi um trabalho exaustivo e moroso, que julgamos ser adequado, conforme já referido, para casos em que o elevado valor patrimonial o justifique.

Quadro 5.1 - Dimensões das vigas do pavimento do "Salón del Consulado"

Viga	Base [cm]	Altura [cm]
V1	25	37
V2	33	36,5
V3	34	36,5
V4	34	36,5
V5	34,5	36
V6	34	37
V7	34	36,5
V8	34	37
V9	34	36
V10	Secção transversal variável – aprox. 34x36cm	
V11	33,5	36,5
V12	33,5	36
V13	25	37

5.3.4 Identificação da espécie e qualidade da madeira

Conforme descrito no Cap. 5.2, conclui-se que a espécie de madeira das vigas do pavimento do "Salón del Consulado" é **Pinus nigra Arn**. de Cuenca (Pinho laricio espanhol).

Com base na informação da ficha de caracterização geométrica (ANEXO II.1), foi realizada pela UPV a classificação visual, de acordo com a norma espanhola UNE 56544, obtendo-se genericamente a classe ME2 para Pinho laricio, a que corresponde a classe C18.

5.3.5 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira - humedímetro

Sendo este um parâmetro que pode influenciar os resultados dos ensaios do *Resistograph* e *Sylvatest*, foi medido o teor em água das vigas de madeira, antes da realização dos ensaios não destrutivos.

Verifica-se que o teor em água médio é de 10%, o que pressupõem a total estabilidade higrométrica das vigas de madeira com o ambiente interior, sendo que se considera que este valor não interfere nos resultados dos ensaios do *Resistograph* e *Sylvatest*.

Figura 5.15 - Medição de humidade das vigas do "Salón del Consulado" através do uso do Humedímetro

Quadro 5.2 - Resultados das medições de humidade das vigas do pavimento do "Salón del Consulado"

Viga	Teor em água [%]
V1	10 %
V2	10 %
V3	11 %
V4	11 %
V5	10 %
V6	10 %
V7	10 %
V8	9 %
V9	10 %
V10	10 %
V11	10 %
V12	11 %
V13	11 %
MÉDIA	**10 %**

5.3.6 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira – Resistograph

O ensaio do *Resistograph* foi realizado utilizando um aparelho da série **Resistograph 1410 – IML Resi B300**. Conforme já descrito no Cap. 3.2.1, este modelo possui uma agulha de 1,5mm de diâmetro (mais larga na extremidade, com 3mm) e 400mm de comprimento, sendo adequado para a inspecção de estruturas *in situ*.

As vigas foram ensaiadas junto aos apoios, a meio vão e a 1/4 de vão. Uma vez que possuíam uma secção transversal considerável (base média de 34cm), a agulha do *Resistograph* não foi capaz de perfurar a totalidade da secção, dado o facto de apenas ser possível perfurar cerca de 282mm (Cap. 3.2.1). Assim, para que houvesse cruzamento de informação e maior quantidade de

dados em análise, foram realizadas medições em ambas as faces das vigas, perfazendo um mínimo de 9 medições por viga (com a excepção das vigas V1 e V13, dado que se encontravam encostadas às paredes).

Figura 5.16: Inspecção das vigas de madeira com recurso ao *Resistograph*

No total, após exclusão dos resultados extremos e não representativos da amostragem, foram consideradas na análise 108 medições do ensaio do *Resistograph,* às 13 vigas de *Pinus nigra Arn.* em análise, tendo-se obtido um valor médio global de **9,53**. Seguidamente apresenta-se um resumo dos resultados obtidos.

Pelo facto de se tratar de vigas em serviço, não foi possível distinguir entre medições radiais e tangenciais, e portanto foi utilizado um valor médio. De acordo com as conclusões da tese de Doutoramento de Capuz (Capuz, 2003), este procedimento é admissível para o *Pinus nigra*, de forma análoga ao concluído neste trabalho, relativamente ao *Pinus radiata*.

Assim, para cada viga foi realizada uma média aritmética do conjunto de medições efectuadas, obtendo-se um **Valor de Resistograph** por viga. Nos casos em que se verificou existir um conjunto pequeno de valores bastante diferente dos restantes, para cada viga, não se considerou para o cálculo do valor médio (por exemplo, para a viga V3 obteve-se um valor médio de 9,33 e uma amplitude máxima do intervalo de 1,73, tendo sido retirado da análise um valor obtido de 12,51, bastante diferente dos restantes registos obtidos).

No ANEXO II, apresenta-se um extracto do relatório de ensaio do *Resistograph*, realizado pelo autor (Botelho, 2005), composto pelas seguintes fichas:

- ANEXO II.2 – Medições do *Resistograph*
- ANEXO II.3 – Resumo dos resultados do *Resistograph*
- ANEXO II.4 – Folha de cálculo do *Resistograph*

Quadro 5.3: Resultados obtidos do valor do Resistograph por viga.

Viga	$VR_{médio}$
V1	9,23
V2	12,14
V3	9,33
V4	9,23
V5	8,79
V6	10,75
V7	8,75
V8	8,98
V9	8,08
V10	8,76
V11	8,10
V12	12,22
V13	9,48

Seguidamente expõe-se a metodologia adoptada e algumas decisões assumidas, na elaboração de cada uma das fichas anteriores:

a) ANEXO II.2 – Medições do Resistograph

No **ANEXO II.2** apresenta-se uma tabela com a lista de todas as medições realizadas com o *Resistograph*, bem como os valores de humidade e ficheiros informáticos correspondentes, para uma mais fácil análise do leitor. Nesta ficha são utilizadas algumas designações que seguidamente se explicam:

- As medições com a designação de *"NULO"* correspondem àquelas em que a agulha não perfurou a totalidade dos 282mm, por erro de execução do ensaio. Este facto não invalida os resultados obtidos, apenas encurta o intervalo de análise, e por isso nestes casos consideraram-se os valores para análise, mas repetiu-se o ensaio;
- A medição em que existe a observação de *"Regist. Preso"*, representa um caso em que o *Resistograph* ficou preso na viga de madeira, porque a agulha perfurou uma secção com resinas epoxy. Dada a possibilidade da agulha se ter danificado e tal poder influenciar os resultados, a mesma foi trocada após esta medição.

Os resultados obtidos pelo *Resistograph* foram tratados estatisticamente com o uso do programa de cálculo MICROSOFT EXCEL, de forma obter-se um valor médio de Resistograph ($VR_{médio}$). A **metodologia de cálculo** utilizada para a obtenção do *Gráfico Matemático* é análoga à exposta no capítulo 3.5.1, sendo que se eliminaram do intervalo de análise cerca de 15% dos valores obtidos, que correspondem aos 2cm iniciais e finais da perfuração (na realidade foram eliminados cerca de

55mm do intervalo de perfuração, mas os primeiros 15mm, aproximadamente, correspondem à distância entre a zona saída da agulha e a face de madeira da viga – figura 5.17).

Julga-se adequado este procedimento, por um lado, porque os valores iniciais correspondem a zonas de menor resistência e/ou com degradação superficial, podendo influenciar de forma errada os resultados e a conclusão sobre a resistência global da viga na sua secção útil, e por outro lado, porque parece adequada para a inspecção de elementos *in situ* a metodologia proposta por Capuz (Capuz, 2003), em que se defende a ideia de que o valor médio da resistência deverá ocorrer em valores intermédios da perfuração, e assim eliminam-se valores presumivelmente incorrectos devido ao processo de corte da amostra, pela diminuição do intervalo de análise.

Figura 5.17: Pormenor da saída da agulha do Resistograph

b) ANEXO II.3 – Resumo dos resultados do Resistograph

No **ANEXO II.3** apresentam-se os resultados finais, por viga, obtidos através da inspecção com o *Resistograph*, resumidos numa tabela. Conforme já referido, um dos valores foi excluído da análise, na viga V3, dado a grande diferença para as restantes medições da mesma viga. Esta ocorrência pode dever-se a um qualquer erro na medição (movimento do *Resistograph* durante a perfuração, posicionamento do aparelho incorrecto, entre outros) ou pela intersecção de elementos de maior massa volúmica, como por exemplo nós.

c) ANEXO II.4 – Folha de cálculo do Resistograph

No **ANEXO II.4** apresenta-se um exemplo de uma ficha tipo realizada para cada medição. No relatório realizado pelo autor relativo a este trabalho prático (Botelho, 2005), são apresentadas 121 fichas, correspondentes a 121 medições realizadas.

Esta ficha estabelece o cálculo do $VR_{médio}$ do *Resistograph* e traça o respectivo Gráfico Matemático, onde é possível observar o perfil de variação longitudinal da resistência à perfuração da peça de madeira.

O $VR_{médio}$ foi calculado pela seguinte fórmula:

$$VR_{MEDIO} = \frac{\sum_{i=1}^{n} VR_i x 0{,}04}{C} \qquad [5.4]$$

em que C corresponde ao intervalo compreendido entre o valor inicial e final considerados na análise.

Por fim, refira-se que o uso do *Resistograph* foi bastante útil na análise qualitativa dos elementos ensaiados, dado que pelo estudo do perfil de variação da resistência à perfuração, que corresponde ao seu output de dados, foi possível identificar os anéis de crescimento, as zonas de degradação biológica e as fendas e vazios existentes nas peças (figura 5.18). Confirma-se pois a grande utilidade do uso do *Resistograph* na detecção de patologias, em elementos estruturais *in situ*.

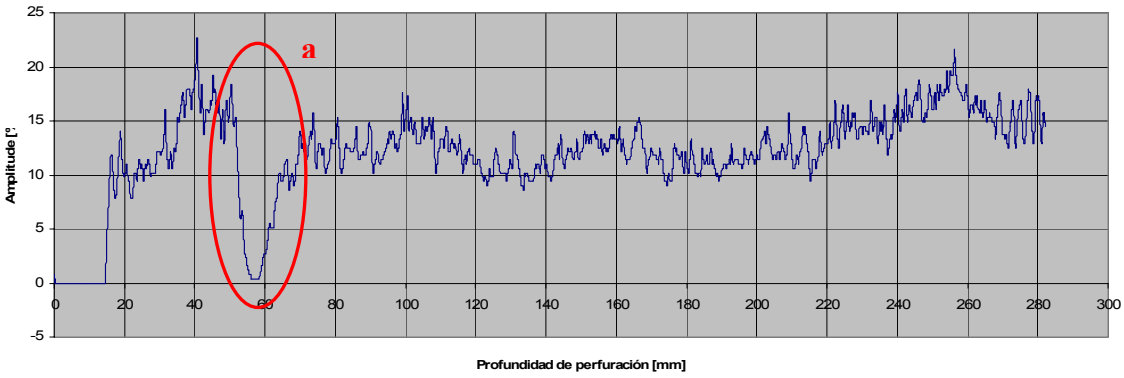


Figura 5.18: Exemplo do output do *Resistograph*. Perfil de variação da resistência à perfuração para a viga V2, onde é visível , em **a)**, a existência de um vazio / fenda com cerca de 1,3 cm de largura.

5.3.7 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira - Sylvatest

O ensaio pela técnica de ultra-sons foi realizado através do aparelho *Sylvatest*, conforme já descrito no capítulo 3.4.2.

Uma vez que os apoios das vigas se encontravam encastrados na parede e não era possível realizar qualquer abertura nesta, pelo exterior, não foram realizadas medições directas, mas apenas medições indirectas, paralelas e cruzadas, de acordo com o esquema ilustrativo (figura 5.19).

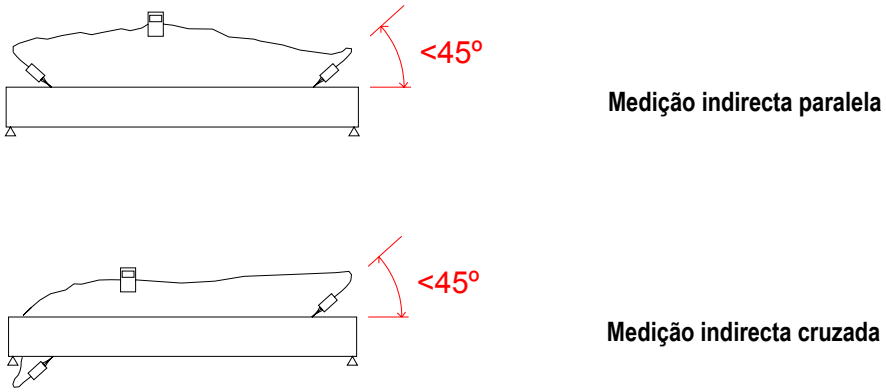
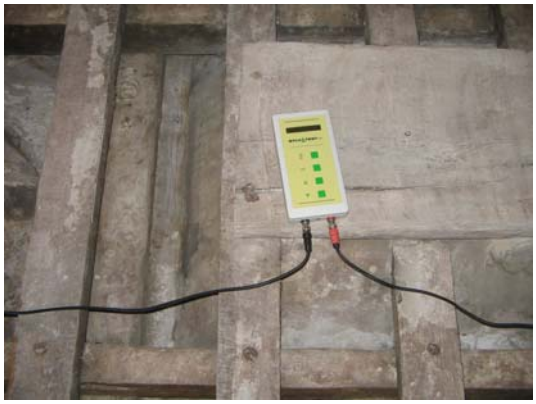


Figura 5.19: Esquema dos tipos de medição efectuadas.



Figuras 5.20 e 5.21: Á esquerda, colocação da sonda na parte superior da viga. Á direita, Sylvatest Duo – Unidade central de medição

Dado que o estrato superficial das vigas de madeira se encontrava, em alguns casos, com alguma degradação biológica, de acordo com as indicações do fabricante, foi realizada uma perfuração de cerca de 0,5cm, com uma broca destinada para o efeito, de forma a que a sonda ficasse em contacto com madeira sã e não houvesse perda de sinal na transmissão das ondas.

Seguidamente expõem-se algumas considerações tomadas na execução desta metodologia de ensaio:

- Foram sempre realizadas o mínimo de 2 medições por viga, de forma a prevenir-se eventuais erros de medição;

- As vigas V1 e V13 apenas tinham a face superior e lateral acessíveis, pelo que apenas se efectuaram medições paralelas pela face superior;

- Nas vigas em que existiam fendas de maior expressão, junto aos apoios, foram realizadas medições colocando as sondas em cada lado da fenda, obtendo-se assim um maior conjunto de dados e homogeneizando-se possíveis reflexões das ondas nos vazios existentes. São exemplos deste procedimento as medições realizadas nas vigas V3, V5 e V7.

  No esquema da figura 5.22, exemplifica-se o procedimento adoptado para o ensaio da viga V7, a qual possuía uma fenda longitudinal de profundidade considerável, na face superior, sendo que se efectuaram 12 medições: 8 medições paralelas pela face superior (1-5, 1-6, 2-5, 2-6, 3-8, 4-8, 3-7 e 4-7) e 4 medições cruzadas (ponto 1 zona superior direita - inferior esquerdo, ponto 2 zona superior direita - inferior esquerdo, ponto 8 zona superior esquerda - inferior direito e ponto 7 zona superior esquerda - inferior direito);

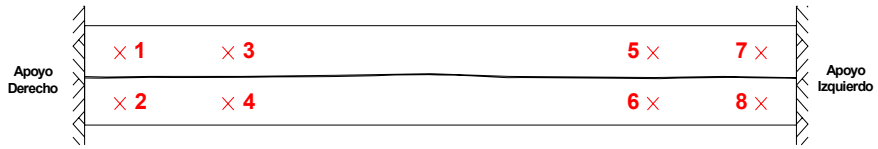


Figura 5.22: Esquema ilustrativo dos pontos de colocação das sondas do *Sylvatest* na viga V7

- Nos apoios em que foram realizadas reconstruções com resinas epoxy, as medições não foram realizadas imediatamente junto ao apoio, mas sim na zona sã da madeira. Desta forma, o comprimento de análise é menor, porém a informação obtida é perfeitamente comparável com as restantes medições, dado que fornece um valor de velocidade (comprimento percorrido em determinado espaço de tempo);

Os valores obtidos de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas ($V_{SYLVATEST}$), por viga, são o resultado do cálculo da média aritmética dos ensaios realizados no respectivo elemento estrutural, retirando-se as medições extremas.

No Anexo II.5 apresenta-se um extracto do relatório realizado pelo autor (Botelho, 2005), relativo a este trabalho prático, nomeadamente 2 fichas exemplo do cálculo realizado por viga, relativamente ao ensaio do *Sylvatest*, sendo que no total foram realizadas 13 fichas (uma por viga).

No seguimento do exposto no capítulo 3.4.2, o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio do Sylvatest (MOE_US ou $E_{dinamico}$) foi realizado pela aplicação da expressão [3.1], em que $E_{dinâmico} = v^2 \times \rho$.

Uma vez que não foi possível avaliar em laboratório o valor da massa volúmica dos elementos ensaiados, dado que estes se encontram em serviço, optou-se por estimar este parâmetro através da bibliografia existente. Assim, tendo em conta que se conhece a espécie de madeira (*Pinus nigra Arn.*), adoptou-se o valor médio de **520 Kg/cm3** para o cálculo do MOE_US (Carvalho, 1997).

Outra hipótese de estimar a massa volúmica seria pela utilização do *Resistograph*. Porém, dado que a correlação conhecida permite a ocorrência de alguns desvios, pelo menos nos ensaios *in situ*, não se considera que o seu uso garanta uma precisão muito maior em relação à metodologia adoptada.

A maior dificuldade de estimação da massa volúmica através da bibliografia associa-se à incerteza na identificação da espécie, o que não sucede nesta situação, dado que foram retiradas amostras para identificação laboratorial.

Quadro 5.4: Resultados obtidos do valor do Sylvatest por viga.

Viga	$V_{SYLVATEST}$ [m/s]
V1	4461
V2	4964
V3	4229
V4	4574
V5	4977
V6	4884
V7	4848
V8	4743
V9	5048
V10	4768
V11	4764
V12	Não realizado (1)
V13	5054

(1) Não foi realizado devida a grande percentagem da viga estar recoberta com resinas epoxy, não sendo possível proceder a uma medida longitudinal de comprimento suficiente para poder caracterizar as propriedades da viga

5.3.8 Ensaio não destrutivo das vigas de madeira - Georradar

Neste processo de inspecção, foi igualmente realizado o ensaio do Georradar, processo que o autor apenas acompanhou e tomou conhecimento dos resultados, não tendo por isso participado directamente.

O ensaio consistiu na inspecção das 13 vigas de Pinus nigra em questão, sendo que se realizou a análise pela passagem das antenas, nas suas faces laterais e inferiores. Como é lógico, nas vigas V1 e V13 apenas foi possível inspeccionar uma das faces das vigas, pelo facto das mesmas estarem encostadas à parede.

Os resultados apresentados deste ensaio não foram tratados, dado que estão associados a uma técnica em desenvolvimento, sendo que não se enquadra no âmbito desta dissertação.

No ANEXO II.6 apresentam-se um extracto dos resultados da inspecção realizada pela técnica do Georradar, na viga V7, pela sua face inferior, os quais foram apresentados no trabalho prático realizado pelo autor na Universidad Politécnica de Valencia (Botelho, 2005).

5.3.9 Atribuição de classes de resistência e discussão dos resultados

Neste sub-capítulo apresenta-se a metodologia de cálculo adoptada para a avaliação da capacidade resistente das vigas de madeira de *Pinus nigra Arn.* em estudo, com o recurso às técnicas de inspecção não destrutivas empregues, o *Resistograph* e o *Sylvatest*.

A metodologia de avaliação aplicada vem no seguimento do exposto no início do presente capítulo, sendo que se pretendia aplicar as correlações obtidas em laboratório, entre as propriedades mecânicas e os parâmetros retirados dos ensaios do *Resistograph* e *Sylvatest*, na determinação destas propriedades *in situ*.

Conforme foi igualmente referido no início deste capítulo, não foi possível utilizar a metodologia de cálculo apresentada no capítulo 4, dado que não foram desenvolvidas expressões com 95% de segurança para os dados extraídos do método do *Sylvatest*.

Assim sendo, atribuíram-se classes de resistência recorrendo em separado às duas técnicas de inspecção, e fez-se no final o cruzamento dos resultados, concluindo-se sobre a classe de resistência mais adequada para os elementos estruturais em análise.

a) Resistograph

Conforme referido, o cálculo do valor do MOR pelo método do *Resistograph*, foi efectuado pela aplicação da expressão [5.3] (intervalo de confiança de 95%). Apresenta-se no Quadro 5.5 os respectivos resultados.

Pelos resultados apresentados verifica-se que a expressão [5.3] é bastante instável, fornecendo resultados dispares para pequenos desvios do valor de $VR_{médio}$, sendo que se confirma a conclusão de Capuz de que a sua aplicação, para o *Pinus nigra Arn.,* pode ser utilizada com boa fiabilidade e serve apenas para fins científicos. No entanto, Capuz apresenta como protocolo de reabilitação a realização de ensaios de 50 em 50cm, ao longo do desenvolvimento da peça, o que por certo forneceria resultados mais homogéneos, e então a expressão [5.3] poderia ter maior aplicabilidade.

Quadro 5.5: Cálculo do MOR através da expressão [5.3]

Viga	VR	MOR [5.3]
V1	9,23	18,81
V2	12,14	44,59
V3	9,33	19,69
V4	9,23	18,81
V5	8,79	14,91
V6	10,75	32,28
V7	8,75	14,56
V8	8,98	16,59
V9	8,08	8,62
V10	8,76	14,64
V11	8,10	8,80
V12	12,22	45,30
V13	9,48	21,02
Valor médio	**9,53**	

Note-se que, por exemplo, para a viga V12, se obteve uma amplitude do intervalo de variação do $VR_{médio}$ de 5,75, o que, substituindo os respectivos valores máximos e mínimos na expressão [5.3], corresponde a uma variação de cerca de 60 MPa.

Perante o exposto, e tendo em conta que as vigas são da mesma espécie, idade, proveniência e secção, optou-se por aplicar a expressão [5.3] ao valor médio da amostragem, obtendo-se:

$$VR_{médio} = 9{,}53 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{MOR = 21{,}47\ MPa\ \ (f_{m\ médio})}$$

Considera-se que este valor é representativo da amostra, dado que é o resultado de 108 medições de *Resistograph*, efectuadas uniformemente sobre as 13 vigas de *Pinus nigra Arn.* em estudo.

Considerando a massa volúmica média de 520 Kg/m^3 (retirado da bibliografia) e recorrendo ao previsto no ponto 6.2.2 da EN338, que refere que "*uma população de peças em madeira pode ser alocada a uma dada classe de resistência se os respectivos valores característicos de f_m e ρ forem*

maiores ou iguais aos valores da classe respectiva indicados na Tabela 1 da EN338, e o valor médio de E_O exceda 95% do correspondente valor indicado na referida tabela", pode ser atribuída a classe de resistência dos elementos em análise em função do valor do módulo de elasticidade na direcção do fio. Assim, temos que (ver Quadro 2.4):

E_o = 9.000 MPa	Classe resistente C18
E_o = 10.000 MPa	Classe resistente C22

b) Sylvatest

A classificação resistente das 13 vigas de *Pinus nigra Arn.* através do ensaio do *Sylvatest*, foi realizada recorrendo ao intervalo de classificação proposto por Arriaga, conforme exposto no ponto 5.2 desta dissertação. Assim sendo, seguidamente apresenta-se a classificação obtida por esta metodologia, para cada uma das vigas:

Quadro 5.6: Resultados obtidos do valor do Sylvatest por viga.

Viga	Vsylvatest	Classe resistente
V1	4461	C14 a C16
V2	4964	C18
V3	4229	C14 a C16
V4	4574	C14 a C16
V5	4977	C18
V6	4884	C14 a C16
V7	4848	C14 a C16
V8	4743	C14 a C16
V9	5048	C18
V10	4768	C14 a C16
V11	4764	C14 a C16
V12	Não realizado (1)	
V13	5054	C18
Vmédio	**4776**	**C16**

Pela análise dos resultados do quadro 5.6, verifica-se que as velocidades obtidas fornecem intervalos de classificação resistente bastante baixos, entre C14 e C18, quando comparados com os fornecidos pelo ensaio do *Resistograph*. Considerando o $V_{Sylvatest}$ médio da amostragem, obtém-se uma classificação resistente de **C16**.

Verifica-se que o intervalo proposto por Arriaga fornece resultados bastante conservadores, o que é compreensível, dado que com este intervalo de classificação o autor pretende apenas fornecer uma ferramenta para que, de forma aproximada e directa, se possa avaliar *in situ* a capacidade

resistente dos elementos estruturais, de forma independente do conhecimento da sua espécie, o que nem sempre é fácil de apurar.

Note-se que o valor da massa volúmica pode variar bastante entre cada espécie, ou até dentro da mesma espécie, o que tem grande influência sobre o valor do MOE_US, de acordo com a expressão [3.1]. Por exemplo, para um valor de $V_{Sylvatest}$ de 4600 m/s, obtém-se uma diferença na grandeza de MOE_US de cerca de 13% entre o *Pinus nigra Arn*. e o castanho bravo ou *Castanea sativa Mil.* (massas volúmicas de 520 e 600 Kg/m^3, respectivamente), e uma diferença bastante acentuada entre o *Pinus nigra Arn*. e o carvalho português ou *Quercus faginea Lam.*, de cerca de 42% (massas volúmicas de 520 e 890 Kg/m^3, respectivamente).

Desta forma, o uso da expressão [3.1] exige alguma precisão na identificação da espécie de madeira, uma vez que a mesma pode conduzir a diferenças bastante acentuadas no valor de MOE_US. Assim, o intervalo proposto por Arriaga, apesar de conservativo, é bastante útil para ultrapassar estas situações e para a classificação *in situ* de elementos estruturais de madeira, quando não são conhecidas expressões de correlação, entre as propriedades mecânicas e os ensaios não destrutivos, que forneçam uma melhor aproximação numérica.

c) Resumo

Perante o exposto, de acordo com a classificação da norma EN338, obtiveram-se os seguintes resultados relativos às metodologias propostas para o uso do *Resistograph* e do *Sylvatest*:

Resistograph:	Classe resistente C18	(E_o = 9.000 MPa)
	Classe resistente C22	(E_o = 10.000 MPa)
Sylvatest:	Classe resistente C16	

Por fim, e dadas as considerações referidas que nos levam a classificar a metodologia proposta por Arriaga para o uso do *Sylvatest* como bastante conservadora, conclui-se que as 13 vigas de madeira *Pinus nigra Arn.*, do tecto da Sala do Comércio de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", são da classe resistente C18 (EN 338).

5.4 Principais conclusões

1. A avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais de madeira, em edifícios de valor arquitectónico e artístico, deve obedecer a uma metodologia de inspecção criteriosa, a qual, no caso em análise, se considera constituída pelos seguintes procedimentos: Enquadramento histórico, caracterização construtiva, identificação da espécie e da qualidade da madeira, levantamento geométrico, fotográfico e de patologias, medição do teor em água da madeira e ensaios com recurso a técnicas não destrutivas (*Resistograph*, *Sylvatest* e, eventualmente, *Georradar*);

2. Os ensaios não destrutivos de avaliação *in situ*, nomeadamente o *Resistograph* e o *Sylvatest*, não permitem obter resultados quantitativos muito rigorosos, peça a peça, para o *Pinus nigra Arn*., uma vez que as correlações conhecidas entre propriedades mecânicas e os respectivos ensaios são muito baixas;

3. Para a avaliação da capacidade resistente, com recurso ao *Resistograph*, das 13 vigas de madeira de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", foram usadas expressões simplificadas, desenvolvidas por Capuz para o *Pinus nigra Arn.,* com 95% de segurança. Através desta metodologia, as vigas foram classificadas como da classe resistente C18 (para E_o = 9.000 MPa) ou C22 (para E_o = 10.000 MPa);

4. Sugere-se como protocolo de inspecção para o uso do *Resistograph,* a execução de um mínimo de 30n ensaios, por cada n peças, ou mais de 30 ensaios para cada peça isolada, de forma a obter-se um resultado final mais fiável e homogéneo. A metodologia proposta é bastante exaustiva e envolve alguns recursos, nomeadamente de disponibilidade de tempo para tratamento de dados e cálculo estatístico, pelo que se julga aplicável, principalmente, em edifícios de elevado valor arquitectónico e artístico;

5. Por fim, relativamente ao ensaio do *Resistograph*, refira-se que o mesmo fornece uma informação qualitativa de grande interesse e validade para a inspecção *in situ*, nomeadamente, na detecção de patologias e defeitos localizados;

6. O *Sylvatest* é um bom estimador do módulo de elasticidade de elementos estruturais de madeira. No entanto, para o *Pinus nigra Arn.* apenas se conhece uma expressão de cálculo deduzida com uma correlação relativamente baixa (R^2 = 58% - Capuz, 2003). Desta forma, e dado que o mesmo autor não desenvolveu expressões para 95% de segurança que relacionassem o valor do módulo de elasticidade dinâmico (MOE_US) e as propriedades mecânicas, foi adoptado o intervalo de classificação proposto por Arriaga. A metodologia adoptada, ainda que um pouco conservadora, revela-se bastante vantajosa

quando não se tem conhecimentos precisos sobre a espécie em causa e/ou quando não se conhecem expressões de correlação estatística entre as propriedades mecânicas e os parâmetros retirados deste ensaio, com um coeficiente de determinação aceitável. Recorrendo a esta metodologia, as vigas foram classificadas como da classe resistente C16;

7. O uso da expressão [3.1] é bastante sensível à variação do valor da massa volúmica, pelo que quando se pretende a sua utilização (nas situações em que se conhecem correlações estatísticas aceitáveis entre o MOE_US e os parâmetros mecânicos), deve-se ter algum cuidado na definição deste parâmetro. Este pode ser estimado recorrendo à bibliografia, quando conhecida a espécie, ou utilizando o *Resistograph*, sendo que tal depende de se conhecerem expressões para a espécie em questão com um coeficiente de determinação suficientemente alto;

8. Os métodos do *Resistograph* e *Sylvatest* devem ser complementados com outras técnicas não destrutivas (classificação visual, georradar, raios-X, entre outras), para a avaliação directa, *in situ*, do f_m, uma vez que a sua análise possui algumas limitações para esta situação. Uma das mais importantes, associa-se ao facto do seu resultado global ser pouco sensível à existência de determinados defeitos localizados, como por exemplo, nós expressivos ou agrupados em zonas de rotura e/ou de tensões elevadas, os quais podem ter uma grande influência neste parâmetro, mas no entanto, pouca expressão no valor global da peça;

9. Por fim, como resultado da inspecção efectuada, concluiu-se que as 13 vigas de madeira *Pinus nigra Arn.*, do tecto da Sala do Comércio de "La Lonja de los Mercaderes de Valencia", são da classe resistente C18.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÕES FINAIS

Apresentam-se neste capítulo os principais resultados da investigação realizada, bem como a indicação de algumas sugestões de linhas de investigação possíveis de empreender num futuro próximo e que resultaram da reflexão efectuada sobre os estudos a que esta dissertação diz respeito.

É possível concluir, genericamente, que os objectivos traçados no início da dissertação, nomeadamente de propor novas metodologias de utilização dos equipamentos de diagnóstico não destrutivo de madeiras para avaliar a capacidade resistente de peças estruturais existentes, foram atingidos, resultando um trabalho inovador e com indicações de alguns procedimentos concretos nesse sentido.

6.1 Principais resultados obtidos

Neste ponto apresentam-se as principais conclusões a retirar da investigação efectuada, de um ponto de vista genérico, sendo que nos capítulos 4 e 5 se expõe algumas considerações de foro mais específico, em relação às metodologias de ensaio não destrutivas empreendidas, respectivamente, em laboratório e *in situ*.

a) Ensaios não destrutivos em laboratório

A aplicação de métodos de ensaio não destrutivos para avaliar os valores das propriedades mecânicas de elementos estruturais em madeira, em laboratório, pode conduzir a resultados bastante interessantes.

A melhor forma de o fazer consiste na utilização desses métodos para classificar madeira de forma expedita e usar em seguida os valores indicados nas normas europeias aplicáveis (EN338 e EN1912), conhecida a espécie e a classe de qualidade da madeira e/ou as principais propriedades mecânicas (ρ , E_O e f_m), conhecida ou não a espécie de madeira.

Desde que conhecida a massa volúmica média das peças a ensaiar, através da realização de ensaios laboratoriais, é possível usar o *Sylvatest* como método alternativo de classificação de madeiras aos métodos correntemente utilizados (classificação visual ou classificação por

máquina segundo normas de classificação). Verifica-se que o *Resistograph* pode ser utilizado com algum sucesso na determinação da massa volúmica.

b) Ensaios não destrutivos em inspecções praticadas sobre estruturas existentes

A aplicação de métodos de ensaio não destrutivos para avaliar *in situ* os valores das propriedades mecânicas de elementos estruturais em madeira não permite obter resultados quantitativos muito rigorosos, peça a peça.

É possível obter valores numéricos relativamente seguros das principais propriedades mecânicas (E_o e f_m) da madeira em questão, desde que se utilizem expressões conservadoras como as indicadas nesta dissertação e se realizem um número relativamente extenso de ensaios.

A aplicação do *Sylvatest* sobre estruturas montadas não permite obter resultados quantitativos fiáveis já que é necessário conhecer a massa volúmica das peças para avaliar o seu módulo de elasticidade dinâmico, o que não é possível apurar com rigor no local. Esse facto constitui uma limitação numérica importante para a inspecção *in situ*, já que os valores da massa volúmica podem variar muito, mesmo dentro de uma só espécie de madeira. No entanto, quer pelos resultados de correlação obtidos, quer pelas referências de diversos autores (Capuz, Sandoz, Arriaga e Machado), o *Sylvatest* apresenta-se como um bom estimador do módulo de elasticidade médio e de defeitos localizados.

Assim sendo, julga-se de todo o interesse a utilização dos seus valores para complementar a informação retirada do *Resistograph,* aplicando a metodologia proposta no Capítulo 5 para estimar o valor do E_o, e assim definir a respectiva classe de resistência.

Verifica-se que a avaliação do f_m de forma directa por intermédio de ensaios não destrutivos é pouco prudente para estruturas *in situ,* pois os métodos não destrutivos abordados não fornecem informação quantitativa sensível à presença de defeitos localizados, os quais têm grande influência no valor dessa propriedade.

O *Resistograph* permite estimar *in situ* a massa volúmica com alguma fiabilidade e fornece informação qualitativa de grande valor para a detecção de patologias.

Como por vezes é difícil definir qual a espécie presente, dada a impossibilidade de acesso visual adequado e a necessidade de alguma experiência e conhecimento do técnico que realiza a inspecção, poderão ser aplicados intervalos de classificação por *Sylvatest* propostos em bibliografia (Arriaga e Sandoz).

Pelo exposto, e como conclusão final, infere-se que os principais resultados obtidos nesta dissertação são os seguintes:

- Definição de um modo expedito de atribuir classes de resistência, conhecida a espécie e/ou as principais propriedades mecânicas de uma dada população de peças estruturais em madeira;

- Definição de expressões numéricas e intervalos de classificação que permitem estimar os valores de E_o e f_m de peças de *Pinus radiata*, em função dos valores médios obtidos de ensaios não destrutivos realizados com o uso do *Resistograph* ($VR_{médio}$) e/ou *Sylvatest* (MOE_US).

6.2 Desenvolvimentos futuros

Na sequência do trabalho experimental e de pesquisa bibliográfica desenvolvidos no âmbito desta dissertação, surgiram algumas linhas de investigação cujo interesse e oportunidade resultaram evidentes e que são fundamentalmente as seguintes:

- Estudos específicos sobre outros equipamentos que realizam ensaios não destrutivos sobre peças de madeira, tais como o Georradar e outros, que possam eventualmente fornecer informação quantitativa mais rigorosa na avaliação das propriedades mecânicas de elementos de madeira;

- Extensão do trabalho desenvolvido a outras espécies de madeira, sobretudo de folhosas correntemente usadas e/ou disponíveis a preços acessíveis em Portugal, tais como o carvalho português (*Quercus faginea Lam.*, nativo de Portugal) ou o eucalipto comum (*Eucalyptus globulus Labill.*);

- Definição de uma metodologia mista envolvendo conjuntamente a classificação visual realizada *in situ* e a avaliação por ensaios não destrutivos com equipamentos correntes, no sentido de "classificar" peças estruturais existentes e aplicadas, em classes de resistência, de modo a que a segurança das estruturas antigas e/ou a sua capacidade para receber novas cargas possa ser efectuada de forma eficiente pelos projectistas de estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABASOLO, D., **Patología y técnicas de intervención. Tomo 3 - Elementos estructurales. Cap. III – Recuperación de Estructuras de Madera, Recuperación de Estructuras Leñosas**. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, UPM, Editorial Munilla-Lería, Madrid, 1998, p. 297-326.

ÁLVAREZ, H.; GUTIÉRREZ, A., **Anatomía, propiedades físicas y mecánicas de la madera. Apuntes**. Madrid, 1992.

ANTHONY, R., **Investigation of historic timber structures using portable X-ray technology**. Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures, Florence, 2005, p. 289-293.

ANTHONY, R.; PANDEY, A.; ARNETTE, C., **Inspection and assessment of timber piles**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, 1998. Vol. 1. p. 432-439.

ANTHONY, R.; RENFORTH, L.; NELSON, R., **Non destructive strength evaluation of Pinus sylvestris poles in the UK**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, 1998. Vol. 1. p. 642-648.

APPLETON, J., **Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de intervenção**. Edições Orion, Amadora, 2003, ISBN 972-8620-03-9.

ARGÜELLES, R.; ARRIAGA, F., **Estructuras de madera. Diseño y Cálculo.** AITIM, 1996.

ARRIAGA, F.; PERAZA, J.; ARRIAGA, C.; GONZÁLEZ, M.; PERAZA, S.; RODRÍGUEZ, M., **Casas de madera**. AITIM, Madrid, 1995, ISBN 84-87381-08-1.

ARRIAGA, F.; PEZAZA, F; ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I; GARCIA, F., **Intervención en estructuras de madera**. AITIM, Madrid, 2002, ISBN 84-87381-24-3.

BARNABEI, M., **Ricerche Dendrocronologiche in Trentino: La Chiesa dei SS. Ippolito e Cassiano a Castello Tesino (TN)**. Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures, Florence, 2005, Vol. I: p. 24-28.

BENOIT, Y., **Le guide des essences de bois**. CTBA, Paris, 1997, ISBN 2-212-011821-X.

BERTOLINI, C.; BRUNETTI, M.; CAVALLARO, P.; MACCHIONI, N., **A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, 1998. Vol. 1. p. 456-463.

BONAMINI, G.; CECCOTTI, A.; MONTINI, E., **Indagini non distruttive per la verifica strutturale di travi di legno antico**. Dipartimento di Ingegneria Civile, Universita di Firenze, Legno, materiale per l'ingegneria civile, raccolta monografica, sezione strutture nº16/90, p. 118.

BORDEREAU, C.; CLÉMENT, J.; JEQUEL, M.; VIEAU, F., **Termites – Biologie, lutte, réglementation**. CTBA, Paris, 2002, ISBN 2-85684-054-X.

BOTELHO, J., **Ensayo No-Destructivo de 300 Piezas 30x15x5cm de Pinus radiata – Método del Resistógrafo**. Universidad Politécnica de Valencia, Valência, Julho 2005.

BOTELHO, J.; CAPUZ, R.; DÍEZ, R.; FARIA, J., **Avaliação da capacidade resistente de estruturas de madeira com recurso a ensaios in-situ**. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de edifícios – PATORREB2006, Porto, 2006, ISBN 972-752-085-5.

BOTELHO, J., **Informe de Inspección: "La Lonja de los Mercaderes de Valencia"**. Universidad Politécnica de Valencia, Valência, Julho 2005.

BRANCO, J.; CRUZ, P.; DIAS, S., **Old timber beams – diagnosis and reinforcement**. Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures. Vol. 1, Florença, 2005, p. 417-422.

BUCUR, V., **Acoustics of wood**. 1st edition, Nova York:CRC Press Inc., 1995, 284p., ISBN 0-8493-4801-3.

BUCUR, V., **Ultrasonic, hardness and x-ray densitometric analysis of wood**. Ultrasonics, 1985, p 269-275.

BUCUR, V.; ARCHER, R., **Elastic constants for wood by an ultrasonic method**. Wood Science and Technology – 18, 1984, p 255-265.

CABANES, E., **Estudio y analisis de las alteraciones y manifestaciones patológicas de la casa consistorial de Alcublas (siglo XVII).** Trabajo de final de carrera, Universidad Politécnica de Valencia, Valência, 2005.

CAPUZ, R., **Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propriedades físicas y mecánicas de las maderas**. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Setembro 2003.

CARVALHO, A., **Madeiras Portuguesas – Vol. I**. Instituto Florestal, Lisboa, 1996, ISBN 972-8097-23-9, 415 p.

CARVALHO, A., **Madeiras Portuguesas – Vol. II**. Direcção Geral das Florestas, Lisboa, 1997, ISBN 972-8097-26-3, 415 p.

CECCOTTI, A.; TOGNI, M., **NDT on ancient timber beams: assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods**. Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, 1996.

COSTA, F.P., **Enciclopédia prática da construção civil.** Portugália Editora, Lisboa.

CRUZ, H.; MACHADO, J.; NUNES, L., **Degradação e reabilitação de estruturas de madeira. Selecção de técnicas não destrutivas a aplicar in situ**. Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Lisboa, 2000.

CRUZ, H.; MACHADO, J.; NUNES, L., **Problemas de conservação da madeira em edifícios**. 2º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE, LNEC, Lisboa 1994, p. 301-312.

CTBA, **Insectes et champignons du bois**. CTBA, Paris, 1996, ISBN 2-85684-036-1.

DIN 4074.1, **Clasificación estructural de la madera aserrada de conífera**. 1989.

DULBECCO, P.; LURO, D., **L'essentiel sur le bois**. CTBA, Paris, 1998, ISBN 2-85684-040-X.

EN 1912, **Structural Timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species**. CEN, Bruxelas, 1998.

EN 338, **Structural Timber**. CEN, Bruxelas, 2003.

EN 408, **Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties** CEN, Bruxelas, 2003.
EN 975-1:1995/A 1:1999, **Sawn timber. Appearance grading of hardwoods. Part 1: Oak and beech**. Instituto Português da Qualidade, 1995.

EN 975-2:2004, **Sawn timber. Appearance grading of hardwoods. Part 2: Poplars**. Instituto Português da Qualidade, 2004.

EN 1611-1, **Sawn timber. Appearance grading of softwoods. Part 1: European spruces, firs, pines and Douglas firs**. Instituto Português da Qualidade, 1999.

ENV 1995.1, **Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios**. IPQ, Lisboa. Junho de 1998.

Especificações E31-1954 – Terminologia de madeiras – série B – secção 1. LNEC, Lisboa, 1955, CDU 001.4:691.11.

ESSERLBORN, C., **Tratado General de Construcción. Construcción de edificios – Tomo I**. Editor Gustavo Pili, Barcelona, 1928.

FARIA, J. A., **Reabilitação de estruturas de madeira em edifícios históricos**. Património Estudos – nº 3, Ciências e técnicas aplicadas ao Património, IPPAR, Lisboa, 2002, ISSN 1645-2453.

FEENEY, F.; CHIVERS, R.; EVERSTEN, J.; KEATING, J., **The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood**. Ultrasonics – 36, 1998, p 449-453.

FEIO, A.O.; MACHADO, J.S.; LOURENÇO, P.B., **Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds**. Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures. Vol. 1, Florença, 2005.

FREITAS, V.; PINTO, P., **Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações internas**. Laboratório de Física das Construções – FEUP, Porto, 1998, ISBN 972-752-029-4.

FULLER, J.; ROSS, R.; DRAMM, J., **Honeycomb and surface check detection using ultrasonic non-destructive evaluation**. Res. Note FPL-RN-0261, Madison, WI: US Dep. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 6 p.

GARCÍA F.; RAMÍREZ, M.; BALLESTER, C.; BENLLOCH, J., **Study of the archaeological structures of the subsurface in churches of the Society of Jesus, city of Valencia (Spain), derived from the GPR technique.** Proceedings of 10th international Conference on Ground-Penetrating Radar, Delft, The Netherlands, June 2004, Delft, p. 467-470.

GARCÍA, F., **Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por geo-radar en glaciología e ingeniería civil**. Tese de Doutoramento, Universidad Politécnica de Cataluña, Espanha, 1997, p. 219.

GARCÍA, F.; RODRÍGUEZ, I.; TORT, I.; MONTALVÁ, J.L.; RAMÍREZ, M.; CAPUZ, R.; MARTÍNEZ, R.; BENLLOCH, J., **GPR technique as a tool for archaeological prospection: exact detection of the Dukes of Calabria tombs (16th century) at San Miguel de los Reyes hieronymite monastery (Valencia, Spain)**. 6th International Conference on Archaeological Prospection, Roma, septiembre 2005.

GECORPA, **Arquitectura e Engenharia Civil: Qualificação para Reabilitação e a Conservação**. Lisboa, Setembro 2000.

GECORPA, **Estruturas de madeira – Reabilitação e inovação**. Lisboa, Setembro 2000.

GUIMARÃES, R.; CABRAL, J., **Estatística**. Editora McGraw-Hill, Alfragide, Maio 1997, ISBN 972-8298-45-5.

HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.; DÍEZ, R., **Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos**. 10º Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos, Cartagena, Junio 2003, p. 187-195.

HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; DÍEZ, M.R., **Evaluación de la clasificación resistente de madera estructural mediante ultrasonidos**. 10º Congreso de Nacional de Ensayos No Destructivos, Cartagena, 2003, p. 187-195.

HERMOSO, E.; MIER, R.; DÍEZ, M.R.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I., **Evaluación por ultrasonidos de las propriedades de la madera en rollo de pequeño diámetro para uso estructural**. CIMAD 2004, Guimarães, 2004.

KABIR, M., **Prediction of ultrasonic properties from grain angle**. Journal of the Institute of Wood Science – vol. 15, nº 5, 2001, p.235-246.

KARSULOVIC, J.; LEÓN, L.; GAETE, L., **Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber**. Wood and Fiber Science – vol. 32, nº 3, 2000, p. 278-286.

LIOTTA, G., **Los insectos y sus daños en la madera. Problemas de restauración.** Editorial NEREA – Junta de Andalucia – Conserjería de Cultura – IAPH, Guipúzcoa, 2000.

MACHADO, J. S., **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) por meio de ultra-sons**. Tese de doutoramento. LNEC, 2003, ISBN 972-49-1941-2.

MACHADO, J.; Cruz, H., **Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas nº 42, LNEC, 1997. p15-18.

MACHADO, J.; CRUZ, H.; NUNES, L., **Degradação e reabilitação de estruturas de madeira. Selecção de técnicas não destrutivas a aplicar in-situ**. Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas – REPAR, LNEC, Lisboa, 2000.

MACHADO, J.S.; SARDINHA, R.; CRUZ, H., **Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, 1998. Vol. 2. p. 304-311.

MACHADO, S.; CRUZ, H., **Proposta para o estabelecimento de classes de qualidade para a Madeira de pinheiro bravo para estruturas e respectivos valores característicos de resistência mecânica**. LNEC, Lisboa, 1993, ISBN 972-49-1569-7.

MAKEPEACE, J., **The encyclopedia of wood**. Nova York, 1993, ISBN 0-8160-2159-7.

MATEUS, T., **Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira**. LNEC, Lisboa, 1961.

MCDONALD, K., **Lumber defect detection by ultrasonic**. Madison: USDA Forest Ser., Forest Prod. Lab., 1978, 20p. Research paper FPL 311.

MERINO, F.; **Patología y técnicas de intervención. Tomo 3 - Elementos estructurales**. **Cap. III – Recuperación de Estructuras de Madera, Patología de la Madera**. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, UPM, Editorial Munilla-Lería, Madrid, 1998, p. 255-276

MESTRADO EM REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO - 2003-2005 - 1ª EDIÇÃO. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Novembro 2004.

NF B52-001, **Régles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement visuel pour l'emploi en structure des principales esseces résineuses et feullues**. 1998

NP 614, **Madeiras. Ensaio do teor em água**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 616, **Madeiras. Ensaio da massa volúmica**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 618, **Madeiras. Ensaio de compressão axial**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 619, **Madeiras. Ensaio de flexão estática**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 620, **Madeiras. Ensaio de flexão dinâmica**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 621, **Madeiras. Ensaio de tracção transversal**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 622, **Madeiras. Ensaio de fendimento**. Instituto Português da Qualidade, 1973.

NP 623, **Madeiras. Ensaio de corte**. Instituto Português da Qualidade, 1973..

NP 4305, **Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual**. Instituto Português da Qualidade, 1995.

NP 14081-1:2005, **Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements**.

NP 14081-2:2005, **Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing**.

NP 14081-3:2005, **Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control**.

NP 14081-4:2005, **Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 4: Machine Grading -Grading machine settings for machine controlled systems**.

NS-INSTA 142, **Nordic visual strengh grading rules for timber**. Internordic Standardization, 1996.

PÉREZ GRACIA, V.; CANAS, J.A.; PUJADES, L. G.; CLAPÉS, J.; ORIOL, J.; GARCÍA, F.; OSORIO, R., **GPR survey to confirm the location of ancient structures under Valencian Cathedral (Spain)**. Journal of Applied Geophysics, 43, 167-174, 1998.

PÉREZ, L., **Seminário "La conservación de la madera en los edificios antiguos"**, III MASTER DE CONSERVACIÓN DEL PATRIMÓNIO ARQUITECTONICO, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998, ISBN 84-7721-570-7

ROMAGNOLI, M.; NOCETTI, M.; SARLATTO, M., **Datazione Dendrocronologica di Strutture Lignee nei Tetti in Italia Centro-Meridionale. Limiti e Prospettive**. Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures, Florence, 2005, Vol. I: p. 19-23.

SANDOZ, J. L., **Grading of construction timber by ultrasound**. Wood Science and Technology - 23, 1989.

SANDOZ, J. L., **Triage et fiabilité des bois de construction, validité de la mèthode ultrason**. Thesis EPFL N815, Lausanne, 1990.

SANDOZ, J.L.; BENOIT, Y.; DEMAY, L., **Wood testing using acousto-ultrasonic**, Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, 2000, p. 97-104.

SARDINHA, A. M., **Ciência e tecnologia dos materiais – Capítulo III.** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1988.

TAMPONE, G., **Il Restauro Delle Strutture di Legno**. Hoepli, Milano, 2000, ISBN 88-203-2273-0.

TAMPONE, G.; MANNUCCI, M.; MACCHIONI, N., **Strutture di legno – Cultura, Conservazione, restauro.** de lettere editore, Milão, 2002.

TEIXEIRA, G.; BELÉM, M., **Técnicas tradicionais de construção – Diálogos de edificação**. CRAT, Porto, 1998, ISBN 972-9411-38-8.

TOGNI, M., **Elasticità e resistenza di travi lignee antiche di grande sezione: stima con metodologie non distruttive applicabili in opera**. Tese de doutoramento. Florença: Universitá Degli Studi Di Firenzi, 1995.

TSAI, P.; CHEN, C.; HSU, M.; YEH, Y., **Estimation of modulus of wooden components by using non-destructive testing strategy**. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, 2004.

UNE 56.544, **Clasificación visual de la Madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas**. AENOR, Madrid, 2003.

UNE-EN 1310, **Madera aserrada y madera en rollo – Método de medida de las singularidades**. AENOR, Madrid, 1997.

UNE-EN 518, **Madera estructural - Clasificación – Requisitos de las normas de clasificación visual residente**. AENOR, Madrid, 1996.

ANEXO I

ANEXO I

ANEXO I.1

NUM	ESPECIE	CARA	CANTO	HUM	PESO	VOL	DENS
4101	RADIATA	150	50	7,7	300,1	750	400,133333
4102	RADIATA	150	50	8,6	335,3	750	447,066667
4103	RADIATA	150	50	8,9	305,3	750	407,066667
4104	RADIATA	150	50	8,6	345,2	750	460,266667
4105	RADIATA	150	50	9	335,5	750	447,333333
4106	RADIATA	150	50	7,7	302,6	750	403,466667
4107	RADIATA	150	50	9	347,6	750	463,466667
4108	RADIATA	150	50	7,5	330	750	440
4109	RADIATA	150	50	7,6	281,3	750	375,066667
4110	RADIATA	150	50	8,6	390,5	750	520,666667
4111	RADIATA	150	50	8,9	288	750	384
4112	RADIATA	150	50	8,9	335,7	750	447,6
4113	RADIATA	150	50	8,8	341,1	750	454,8
4114	RADIATA	150	50	9,1	313,4	750	417,866667
4115	RADIATA	150	50	9,3	344,5	750	459,333333
4116	RADIATA	150	50	9,2	360,5	750	480,666667
4117	RADIATA	150	50	8,9	339,7	750	452,933333
4118	RADIATA	150	50	9	351,1	750	468,133333
4119	RADIATA	150	50	8,8	330,2	750	440,266667
4120	RADIATA	150	50	9,4	440,1	750	586,8
4121	RADIATA	150	50	9,3	343,3	750	457,733333
4122	RADIATA	150	50	8,9	375,9	750	501,2
4123	RADIATA	150	50	9,5	334,5	750	446
4124	RADIATA	150	50	8,9	323,1	750	430,8
4125	RADIATA	150	50	9,1	306,1	750	408,133333
4126	RADIATA	150	50	9	326,9	750	435,866667
4127	RADIATA	150	50	9,1	296,6	750	395,466667
4128	RADIATA	150	50	9	383,6	750	511,466667
4129	RADIATA	150	50	7,7	291,5	750	388,666667
4130	RADIATA	150	50	9,1	325,2	750	433,6
4131	RADIATA	150	50	7,6	319,3	750	425,733333
4132	RADIATA	150	50	9,2	326,5	750	435,333333
4133	RADIATA	150	50	8	268,6	750	358,133333
4134	RADIATA	150	50	8	325,6	750	434,133333
4135	RADIATA	150	50	7,8	267,7	750	356,933333
4136	RADIATA	150	50	9,1	295,4	750	393,866667
4137	RADIATA	150	50	8,9	368,3	750	491,066667
4138	RADIATA	150	50	8,2	354,8	750	473,066667
4139	RADIATA	150	50	9,4	305,9	750	407,866667
4140	RADIATA	150	50	8,7	301,2	750	401,6
4141	RADIATA	150	50	7,1	347,9	750	463,866667
4142	RADIATA	150	50	7,8	302,4	750	403,2
4143	RADIATA	150	50	8,9	342,1	750	456,133333
4144	RADIATA	150	50	9	406,7	750	542,266667
4145	RADIATA	150	50	8,4	362,2	750	482,933333
4146	RADIATA	150	50	9,7	379,8	750	506,4
4147	RADIATA	150	50	9,1	365	750	486,666667
4148	RADIATA	150	50	9,2	332,7	750	443,6
4149	RADIATA	150	50	10,1	317,2	750	422,933333
4150	RADIATA	150	50	10,5	419,3	750	559,066667

NUM	ESPECIE	CARA	CANTO	HUM	PESO	VOL	DENS
4151	RADIATA	150	50	8,2	417,1	750	556,133333
4152	RADIATA	150	50	10,4	425,4	750	567,2
4153	RADIATA	150	50	10,4	377	750	502,666667
4154	RADIATA	150	50	10,7	396,2	750	528,266667
4155	RADIATA	150	50	10,5	345,8	750	461,066667
4156	RADIATA	150	50	9,5	374,5	750	499,333333
4157	RADIATA	150	50	8,8	357,5	750	476,666667
4158	RADIATA	150	50	9,5	311,5	750	415,333333
4159	RADIATA	150	50	10,6	376,7	750	502,266667
4160	RADIATA	150	50	10,3	340,6	750	454,133333
4161	RADIATA	150	50	10,4	363	750	484
4162	RADIATA	150	50	9,8	309,7	750	412,933333
4163	RADIATA	150	50	9,8	322,1	750	429,466667
4164	RADIATA	150	50	9,7	364,6	750	486,133333
4165	RADIATA	150	50	9,4	385,9	750	514,533333
4166	RADIATA	150	50	10,5	372,3	750	496,4
4167	RADIATA	150	50	10,3	372,4	750	496,533333
4168	RADIATA	150	50	10,4	380,1	750	506,8
4169	RADIATA	150	50	10,1	360,4	750	480,533333
4170	RADIATA	150	50	10,2	391,3	750	521,733333
4171	RADIATA	150	50	10,2	352	750	469,333333
4172	RADIATA	150	50	10,3	352,5	750	470
4173	RADIATA	150	50	11,7	350,6	750	467,466667
4174	RADIATA	150	50	9,6	341,5	750	455,333333
4175	RADIATA	150	50	10,3	327,1	750	436,133333
4176	RADIATA	150	50	10,1	360,1	750	480,133333
4177	RADIATA	150	50	10,2	360,1	750	480,133333
4178	RADIATA	150	50	9,1	373,5	750	498
4179	RADIATA	150	50	9,1	358,3	750	477,733333
4180	RADIATA	150	50	8,7	318,6	750	424,8
4181	RADIATA	150	50	9,9	328,9	750	438,533333
4182	RADIATA	150	50	9,2	358,1	750	477,466667
4183	RADIATA	150	50	9,7	337,8	750	450,4
4184	RADIATA	150	50	10	347,4	750	463,2
4185	RADIATA	150	50	9,2	313,1	750	417,466667
4186	RADIATA	150	50	8,7	333,8	750	445,066667
4187	RADIATA	150	50	7,8	304,2	750	405,6
4188	RADIATA	150	50	9	297,6	750	396,8
4189	RADIATA	150	50	9,1	372,6	750	496,8
4190	RADIATA	150	50	9,1	345,3	750	460,4
4191	RADIATA	150	50	8,8	348,1	750	464,133333
4192	RADIATA	150	50	9	310,3	750	413,733333
4193	RADIATA	150	50	8,8	309,1	750	412,133333
4194	RADIATA	150	50	8,9	399,2	750	532,266667
4195	RADIATA	150	50	9	339,1	750	452,133333
4196	RADIATA	150	50	8,9	345,4	750	460,533333
4197	RADIATA	150	50	8,9	296,7	750	395,6
4198	RADIATA	150	50	9,7	382,8	750	510,4
4199	RADIATA	150	50	9,1	322,6	750	430,133333
4200	RADIATA	150	50	8,2	328,7	750	438,266667

NUM	CALV	FUNO	PFUNO	FROT	PROT	MOETM	CALR
4101	3	3,51	0	3,95	25	7440,69767	1
4102	3	3,63	0	3,81	10	7176,97674	1
4103	2	3,96	0	3,96	0	7459,53488	1
4104	3	5,8	65	6,63	35	12489,0698	1
4105	3	4,99	30	5,27	10	9927,2093	1
4106	3	3,71	15	3,71	15	6988,60465	1
4107	3	5,22	0	5,33	10	10040,2326	1
4108	3	4	45	4	45	7534,88372	1
4109	3	2,81	70	3,47	50	6536,51163	2
4110	3	6,22	0	6,22	0	11716,7442	1
4111	3	3,58	55	3,9	45	7346,51163	1
4112	3	2,85	45	3,37	25	6348,13953	2
4113	3	4,47	0	4,47	0	8420,23256	1
4114	3	3,25	15	3,25	10	6122,09302	2
4115	3	4,93	0	5,11	35	9625,81395	1
4116	3	3,16	15		0	0	1
4117	3	3,91	45	4,94	30	9305,5814	1
4118	3	4,94	0	4,94	0	9305,5814	1
4119	3	5,3	15	5,45	25	10266,2791	1
4120	3	4,88	10	5,19	75	9776,51163	1
4121	3	4,55	0	5	15	9418,60465	1
4122	3	5,61	60	5,87	25	11057,4419	1
4123	3	4,38	20	4,61	30	8683,95349	1
4124	3	3,99	35	5,35	70	10077,907	1
4125	3	3,86	0	3,86	0	7271,16279	1
4126	3	3,9	0	3,9	0	7346,51163	1
4127	3	3,94	0	3,94	0	7421,86047	1
4128	2	4,2	0	4,2	0	7911,62791	1
4129	3	3,56	45	3,88	45	7308,83721	1
4130	3	3,68	0	3,68	0	6932,09302	1
4131	3	4,95	10	4,95	10	9324,4186	1
4132	3	4,41	15	4,88	60	9192,55814	1
4133	3	3,32	45	3,46	55	6517,67442	2
4134	3	4,03	35	4,03	35	7591,39535	1
4135	3	2,88	35		0	0	
4136	3	3,52	15	4,03	45	7591,39535	1
4137	3	4,02	45	5,21	55	9814,18605	1
4138	3	4,25	0	4,98	45	9380,93023	1
4139	3	3,92	65	3,92	65	7384,18605	1
4140	3	4,06	15	4,06	15	7647,90698	1
4141	3	4,85	0	4,85	0	9136,04651	1
4142	3	3,7	55	3,7	55	6969,76744	1
4143	2	6,21	0	6,11	45	11509,5349	1
4144	3	6,9	0	6,9	0	12997,6744	1
4145	3	5,47	25	5,47	25	10303,9535	1
4146	3	6,16	45	6,16	45	11603,7209	1
4147	3	5,65	0	5,65	0	10643,0233	1
4148	3	5,8	45	5,8	45	10925,5814	1
4149	3	5,08	0	5,07	50	9550,46512	1
4150	2	4,58	0	4,58	0	8627,44186	1

NUM	CALV	FUNO	PFUNO	FROT	PROT	MOETM	CALR
4151	2	5,34	15	5,39	0	10153,2558	1
4152	2	5,05	0	7,22	30	13600,4651	1
4153	3	5,76	15	6,02	30	11340	1
4154	3	6,03	25	6,03	25	11358,8372	1
4155	3	5,78	0	5,78	0	10887,907	1
4156	3	5,79	10	5,57	60	10492,3256	1
4157	2	5,69	0	5,69	0	10718,3721	1
4158	3	5,21	30	5,47	45	10303,9535	1
4159	3	6,57	65		35	0	1
4160	2	5,94	45	6,61	30	12451,3953	1
4161	3	2,52	25	2,52	25	4746,97674	3
4162	3	4,82	20	4,99	40	9399,76744	1
4163	2	5,45	30	5,51	5	10379,3023	1
4164	3	4,03	25	4,03	25	7591,39535	1
4165	3	6,68	45	6,68	45	12583,2558	1
4166	3	5,74	45	5,74	45	10812,5581	1
4167	3	4,1	15	4,1	15	7723,25581	1
4168	3	6,66	75	6,72	65	12658,6047	1
4169	3	5,92	0	6,1	80	11490,6977	1
4170	2	6,91	0	6,91	0	13016,5116	1
4171	3	5,45	15	5,45	15	10266,2791	1
4172	3	5,72	0	5,72	0	10774,8837	1
4173	3	4,47	35	4,47	35	8420,23256	1
4174	3	3,58	0	3,58	0	6743,72093	1
4175	3	3,83	35	4,98	35	9380,93023	1
4176	3	5,47	0	5,47	0	10303,9535	1
4177	3	6,87	65	6,87	65	12941,1628	1
4178	1	6,33	10	6,33	10	11923,9535	1
4179	3	6,49	0	6,36	35	11980,4651	1
4180	3	4,65	65		0	0	
4181	3	4,79	55	4,79	55	9023,02326	1
4182	3	6,09	0	6,46	20	12168,8372	1
4183	3	4,38	10		10	0	1
4184	2	4,98	45	5,68	45	10699,5349	1
4185	3	1,73	0	1,73	0	3258,83721	3
4186	3	2,99	15	1,17	70	2203,95349	3
4187	3	3,72	45	4,05	0	7629,06977	1
4188	3	3,73	35	3,73	35	7026,27907	1
4189	3	5,71	25	5,97	15	11245,814	1
4190	3	5,48	0	5,48	0	10322,7907	1
4191	3	5,94	0	5,94	0	11189,3023	1
4192	3	2,95	25	2,97	15	5594,65116	2
4193	3	2,81	15	2,87	15	5406,27907	2
4194	2	4,99	0	4,99	5	9399,76744	1
4195	2	4,14	0	4,21	10	7930,46512	1
4196	3	4,54	0	4,85	30	9136,04651	1
4197	2	3,3	0	3,3	0	6216,27907	2
4198	3	5,6	0	5,6	0	10548,8372	1
4199	2	5,1	20	5,1	20	9606,97674	1
4200	2	3,36	35	3,36	35	6329,30233	2

NUM	CROT	MOR	PCTO	MOECTO	VEL_US	MOE_US
4101	7,537	18,0888	4,1858	5375,31655	4483	8041,59524
4102	7,065	16,956	2,8526	7887,54119	5051	11405,8335
4103	10,38	24,912	2,8611	7864,10821	5051	10385,3294
4104	24,91	59,784	2,9955	7511,2669	5769	15318,3011
4105	6,73	16,152	2,695	8348,79406	5293	12532,4231
4106	9,11	21,864	3,3214	6774,25182	4712	8958,14781
4107	10,007	24,0168	3,3077	6802,30976	5274	12891,3606
4108	6,015	14,436	2,8192	7980,98751	5249	12122,8804
4109	5,697	13,6728	3,9586	5683,82762	4506	7615,3671
4110	15,75	37,8	2,0336	11064,1227	5538	15968,5572
4111	13,94	33,456	3,2501	6922,86391	5098	9980,00794
4112	4,8	11,52	4,2508	5293,12129	4478	8975,49184
4113	11,87	28,488	2,8166	7988,35475	5490	13707,7175
4114	7,82	18,768	3,4542	6513,80928	4465	8330,68389
4115	11,418	27,4032	2,7009	8330,55648	5237	12597,7536
4116	12,029	28,8696	3,2111	7006,94466	4938	11720,501
4117	8,29	19,896	3,3109	6795,7353	4727	10120,582
4118	14,748	35,3952	3,5812	6282,81023	4966	11544,7092
4119	7,459	17,9016	3,7963	5926,82349	5409	12881,0056
4120	12,35	29,64	3,3013	6815,49693	4658	12731,7785
4121	8,329	19,9896	3,2104	7008,47246	5351	13106,3705
4122	8,719	20,9256	2,9913	7521,81326	5710	16341,1749
4123	9,35	22,44	3,3551	6706,20846	5017	11225,9489
4124	5,488	13,1712	4,184	5377,62906	4994	10744,1675
4125	6,25	15	3,7913	5934,63983	5092	10582,2704
4126	4,29	10,296	3,8885	5786,29292	4763	9888,14486
4127	5,98	14,352	2,933	7671,32629	5110	10326,4651
4128	9,61	23,064	2,8302	7949,9682	5463	15264,3999
4129	6,93	16,632	4,7638	4723,1202	4927	9435,0112
4130	8,488	20,3712	3,5237	6385,3336	4862	10249,8895
4131	12,276	29,4624	2,6211	8584,18221	5338	12130,9495
4132	18,59	44,616	3,5242	6384,42767	5200	11771,4133
4133	8,94	21,456	4,708	4779,09941	4784	8196,4744
4134	5,93	14,232	3,7625	5980,06645	4972	10732,1164
4135	4,14	9,936	4,57	4923,41357	4727	7975,50722
4136	10,9	26,16	4,4034	5109,68797	4884	9395,0812
4137	6,63	15,912	3,337	6742,58316	5531	15022,6923
4138	9,66	23,184	3,2884	6842,2333	5200	12791,7227
4139	16,74	40,176	3,4664	6490,88391	5230	11156,3361
4140	8,71	20,904	3,462	6499,13345	4994	10015,9185
4141	7,27	17,448	2,7628	8143,91197	4836	10848,4015
4142	9,33	22,392	3,228	6970,26022	5028	10193,2121
4143	21,78	52,272	2,6513	8486,4029	5566	14131,1731
4144	9,97	23,928	2,6154	8602,89057	5573	16841,8965
4145	7,58	18,192	3,1223	7206,22618	5916	16902,2108
4146	11,34	27,216	2,427	9270,70457	5601	15886,3762
4147	20,87	50,088	2,5492	8826,29845	5531	14888,0877
4148	15,23	36,552	2,4392	9224,33585	5573	13777,4747
4149	8,43	20,232	2,6293	8557,41072	5601	13267,9266
4150	15,93	38,232	3,1496	7143,76429	4628	11974,3045

NUM	CROT	MOR	PCTO	MOECTO	VEL_US	MOE_US
4151	18,73	44,952	2,6528	8481,60434	5074	14317,9174
4152	13,1	31,44	3,0982	7262,28132	4825	13204,7705
4153	18,36	44,064	2,3106	9737,73046	5680	16217,2331
4154	14,42	34,608	2,0614	10914,9122	5230	14449,6253
4155	11,43	27,432	3,1967	7038,50846	5587	14391,9973
4156	15,4	36,96	2,4998	9000,72006	5086	12916,4531
4157	18,13	43,512	2,7967	8045,19612	5383	13812,2218
4158	17,52	42,048	2,7322	8235,12188	5559	12834,8304
4159	16,58	39,792	2,2291	10093,7598	5732	16502,3852
4160	11,93	28,632	2,5644	8773,98222	5717	14842,9343
4161	2,1	5,04	4,5959	4895,66788	5163	12901,7794
4162		0			5318	11678,2188
4163	16,41	39,384	3,0554	7364,01126	5580	13372,0459
4164	3,47	8,328	3,4684	6487,14104	5403	14191,4031
4165	15,97	38,328	2,1386	10520,9015	5988	18449,1813
4166	7,64	18,336	2,6656	8440,87635	5717	16224,3818
4167	6,87	16,488	3,0683	7333,05088	5104	12935,0985
4168	14,25	34,2	2,1497	10466,5767	5538	15543,2742
4169	20,27	48,648	2,3423	9605,94288	5449	14267,804
4170	13,94	33,456	2,1911	10268,8148	5861	17922,2292
4171	23,35	56,04	2,6808	8393,01701	5673	15104,5213
4172	13,84	33,216	2,6142	8606,83957	5630	14897,543
4173	7,97	19,128	3,2868	6845,56407	5200	12640,2987
4174	5,65	13,56	4,1462	5426,65573	4619	9714,60998
4175	7,91	18,984	3,6596	6148,21292	5504	13212,2302
4176	9,87	23,688	3,4137	6591,08885	5212	13042,7951
4177	22,57	54,168	2,2034	10211,4913	5924	16849,6917
4178	17,55	42,12	2,3957	9391,82702	5615	15701,0561
4179	12,69	30,456	1,2438	18089,725	5615	15062,084
4180	13,26	31,824	2,8338	7939,86873	5255	11730,8626
4181	8,7	20,88	3,2576	6906,92534	5069	11268,0092
4182	11,4	27,36	3,1589	7122,7326	5732	15687,5608
4183	10,58	25,392	2,8804	7811,41508	5194	12150,7273
4184	16,62	39,888	3,0212	7447,37191	5181	12433,5669
4185	3,69	8,856	3,0212	7447,37191	4059	6877,96413
4186	2,71	6,504	4,0788	5516,32833	4063	7347,14674
4187	12,41	29,784	3,1228	7205,07237	4653	8781,40589
4188	8,73	20,952	3,0993	7259,7038	4895	9507,73472
4189	9,19	22,056	2,4318	9252,40563	5243	13656,5595
4190	15,83	37,992	2,8623	7860,81124	5470	13775,5824
4191	16,95	40,68	1,9841	11340,1542	5659	14863,5363
4192	5,16	12,384	4,1543	5416,07491	4368	7893,79369
4193	7,34	17,616	3,8734	5808,85011	4515	8401,43073
4194	13,83	33,192	2,2994	9785,16135	5200	14392,4907
4195	5,59	13,416	3,0039	7490,26266	5133	11912,6685
4196	7,88	18,912	3,228	6970,26022	5011	11564,0477
4197	5,79	13,896	4,135	5441,35429	4520	8082,26624
4198	7,59	18,216	2,2923	9815,46918	5403	14899,8056
4199	17,88	42,912	2,4714	9104,15149	5133	11333,0193
4200	6,58	15,792	3,227	6972,4202	5243	12047,5339

ANEXO I

ANEXO I.2

FICHA Nº1 - RESULTADOS DEL RESISTOGRAPH

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Objecto: Piezas de madera de INIA (Madrid)

Viga	VRr médio	VRt médio	VR médio
4101	6,95	6,79	**6,89**
4102	7,16	9,16	**8,16**
4103	6,33	8,92	**7,63**
4104	8,94	9,99	**9,47**
4105	6,16	8,35	**7,25**
4106	6,64	7,38	**7,01**
4107	7,19	8,64	**7,92**
4108	7,33	8,30	**7,81**
4109	5,47	6,01	**5,74**
4110	10,33	10,86	**10,59**
4111	5,39	7,12	**6,26**
4112	7,24	8,04	**7,64**
4113	8,85	8,80	**8,83**
4114	5,76	8,53	**7,15**
4115	5,70	7,36	**6,81**
4116	7,69	8,30	**7,99**
4117	7,76	8,27	**8,01**
4118	8,25	8,31	**8,28**
4119	7,93	8,12	**8,03**
4120	9,37	8,75	**9,06**
4121	7,79	8,52	**8,16**
4122	8,89	9,51	**9,20**
4123	6,83	7,73	**7,28**
4124	6,53	8,23	**7,38**
4125	6,15	7,78	**6,97**
4126	7,55	8,14	**7,84**
4127	5,80	7,88	**6,84**
4128	6,15	8,33	**7,24**
4129	6,26	7,08	**6,67**
4130	6,37	7,86	**7,12**
4131	7,15	7,57	**7,36**
4132	6,89	7,56	**7,23**
4133	5,71	6,14	**5,93**
4134	7,43	8,52	**7,97**
4135	5,75	6,38	**6,06**
4136	5,58	6,83	**6,21**
4137	8,32	8,72	**8,59**
4138	7,18	9,23	**8,20**
4139	5,94	8,86	**7,40**
4140	6,37	7,19	**6,78**
4141	6,89	7,86	**7,37**
4142	6,64	8,66	**7,65**
4143	7,89	8,34	**8,12**
4144	8,44	9,37	**8,90**
4145	8,30	8,54	**8,42**
4146	8,15	8,90	**8,53**
4147	8,07	8,73	**8,40**
4148	7,97	8,42	**8,19**
4149	6,95	7,46	**7,20**
4150	9,41	9,20	**9,26**
4151	9,44	9,38	**9,41**
4152	10,05	9,07	**9,56**
4153	9,29	9,33	**9,31**
4154	9,44	9,14	**9,29**

FICHA Nº1 - RESULTADOS DEL RESISTOGRAPH

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Objecto: Piezas de madera de INIA (Madrid)

Viga	VRr médio	VRt médio	VR médio
4155	8,34	8,14	**8,24**
4156	8,38	8,70	**8,54**
4157	8,43	8,50	**8,46**
4158	7,45	7,03	**7,24**
4159	8,87	9,55	**9,21**
4160	7,88	8,08	**7,98**
4161	8,44	8,18	**8,31**
4162	7,01	7,01	**7,01**
4163	7,30	7,47	**7,39**
4164	8,62	8,55	**8,59**
4165	9,08	9,80	**9,44**
4166	9,36	9,36	**9,36**
4167	8,02	8,32	**8,17**
4168	8,58	9,35	**8,96**
4169	8,33	8,68	**8,56**
4170	9,93	10,20	**10,07**
4171	7,63	9,09	**8,36**
4172	7,76	7,66	**7,71**
4173	7,65	7,62	**7,63**
4174	7,80	8,13	**7,96**
4175	7,36	8,21	**7,78**
4176	8,62	8,67	**8,64**
4177	9,05	8,89	**8,97**
4178	8,39	8,41	**8,40**
4179	7,84	8,16	**8,00**
4180	6,80	7,77	**7,28**
4181	6,73	6,54	**6,63**
4182	8,74	8,80	**8,78**
4183	6,96	7,00	**6,98**
4184	7,26	7,74	**7,50**
4185	6,32	7,67	**7,00**
4186	5,47	6,52	**6,00**
4187	5,77	6,47	**6,12**
4188	5,45	6,94	**6,20**
4189	8,70	8,31	**8,50**
4190	7,60	7,61	**7,61**
4191	8,12	8,60	**8,36**
4192	5,52	7,05	**6,28**
4193	5,26	6,83	**6,04**
4194	8,47	8,93	**8,70**
4195	6,70	7,37	**7,03**
4196	6,40	7,34	**6,87**
4197	5,60	6,33	**5,96**
4198	8,67	10,60	**9,63**
4199	7,13	7,36	**7,24**
4200	7,67	8,10	**7,88**

VR médio - Valor medio del registografo
VRt médio - Valor medio de tomas tangenciales
VRr médio - Valor medio de tomas radiales

ANEXO I

ANEXO I.3

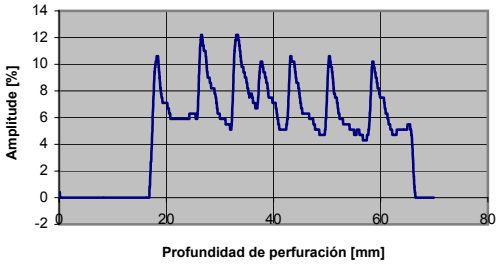
FICHA Nº2 - valores del Resistograph por viga

Viga 4131

Pieza	Nº medida	Tipo	Humidad	Valor Resist.	V. Médio	Observaciones
DC4131	141	radial		6,99	7,21	
DC4131	142	tang.		7,43		
RC4131	137	tang.		7,74	7,48	
RC4131	138	radial		7,22		
IC4131	142	radial		7,24	7,39	
IC4131	143	tang.		7,54		

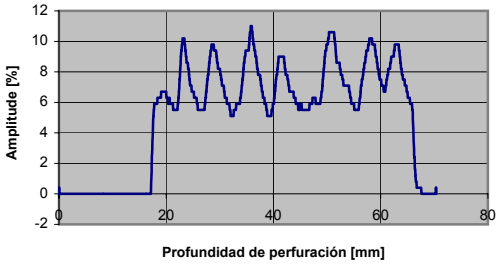
Viga 4131 **7,36**

GRÁFICOS



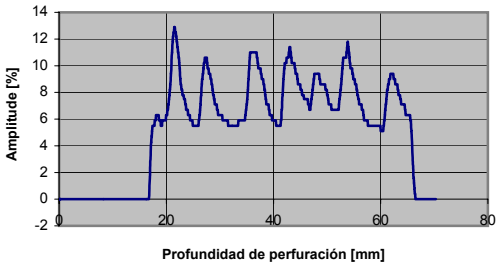
Leyenda: Resultados del resistógrafo

DC4131 - 141



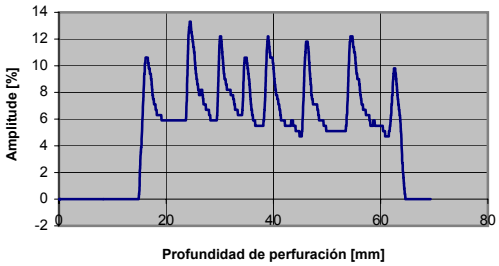
Leyenda: Resultados del resistógrafo

DC4131 - 142



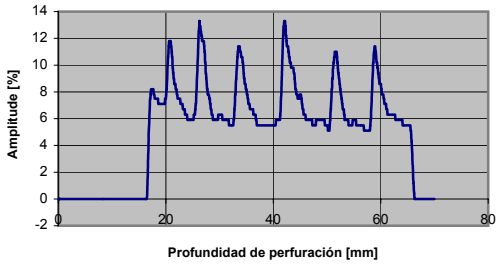
Leyenda: Resultados del resistógrafo

RC4131 - 137



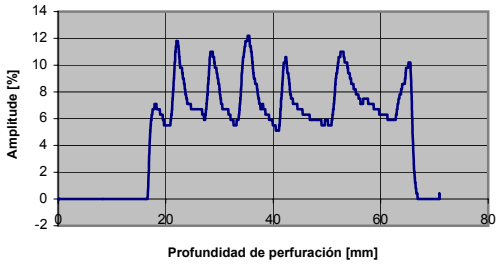
Leyenda: Resultados del resistógrafo

RC4131 - 138



Leyenda: Resultados del resistógrafo

IC4131 - 142



Leyenda: Resultados del resistógrafo

IC4131 - 143

ANEXO I

ANEXO I.4

FICHA Nº 3 - RESUMEN DEL CÁLCULO ESTADISTICO - PIEZAS DE INIA

Muestra: 100 piezas 300x15x5cm de *pinus radiata* **Origen:** Laboratório CIFOR-INIA (Madrid)

Medidas de centralidad y dispersión

Variable	Media	Variancia	Desv. tipica	C.V.	n
HUMEDAD	9,20	0,71	0,84	9,20%	100
DENSIDAD	457,23	2088,18	45,70	9,99%	100
MOR	26,60	146,07	12,09	45,44%	99
MOE_US	12487,00	6994180	2644,65	21,18%	100
MOECTO	7525,48	2380750	1542,97	20,50%	98
MOETM	9193,15	4982950	2232,25	24,28%	95
VRr	7,49	1,50	1,22	16,32%	100
VRt	8,18	0,94	0,97	11,85%	100
VR	7,84	1,06	1,03	13,16%	100

Análisis de regresión

Var. dependente	Var. independente	R2 [%]	Modelo	Equación modelo
MOE_US	MOECTO	54,32%	linear	MOE_US = 3194,74 + 1,23991 * MOECTO
MOECTO	MOETM	49,36%	linear	MOECTO = 2894,52 + 0,501913 * MOETM
MOE_US	MOETM	78,12%	linear	MOE_US = 2430,73 + 1,09086 * MOETM
VRr	VR	91,35%	linear	VRr = -1,26025 + 1,11575 * VR
VRt	VR	87,07%	linear	VRt = 1,28629 + 0,879157 * VR
MOR	DENSIDAD	14,44%	linear	MOR = -13,6664 + 0,0858807 * DENSIDAD
MOR	VR	23,61%	linear	MOR = -9,51805 + 4,3744 * VR
MOR	MOE_US	33,13%	linear	MOR = 0,651785 + 0,00190144 * MOE_US
MOR	MOECTO	42,47%	linear	MOR = -8,94636 + 0,00457203 * MOECTO
MOR	MOETM	44,46%	linear	MOR = -3,92018 + 0,00316916 * MOETM

Análisis de regresión com varias variables regresoras

Var. dependente	Var. independente	R2 [%]	Modelo	Equación modelo
MOR	MOE_US VR	26,74%	linear	MOR = -5,2518 + 0,00228291 * MOE_US + 0,392635 * VR
MOR	DENSIDAD VR	18,42%	linear	MOR = -11,5839 + -0,0130662 * DENSIDAD + 5,59754 * VR
MOECTO	MOE_US VR	52,17%	linear	MOECTO = 1870,59 + 0,38321 * MOE_US + 111,701 * VR

MOR - Módulo de rotura según EN408
MOECTO - Módulo de elasticidad evaluado en canto traccionado
MOETM - Módulo de elasticidad obtenido en clasificadora normalizada
MOE_US - Módulo de elasticidad obtenido por ensayo de ultrasonidos
VR - Valor medio del Resistograph
VRr - Valor Radial del Resistograph
VRt - Valor Tangencial del Resistograph

ANEXO II

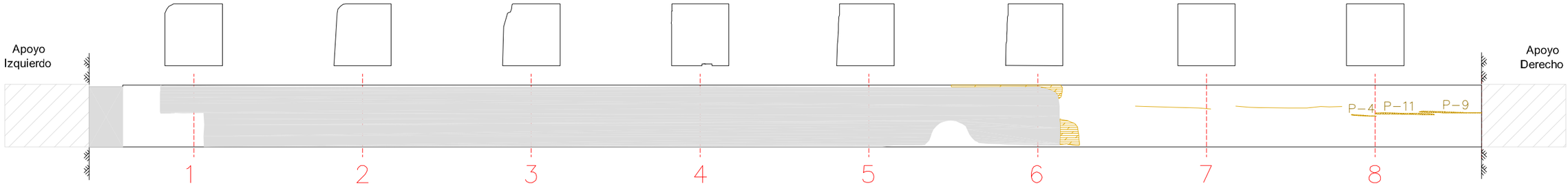
ANEXO II

ANEXO II.1

Descripción geométrica – Viga V3

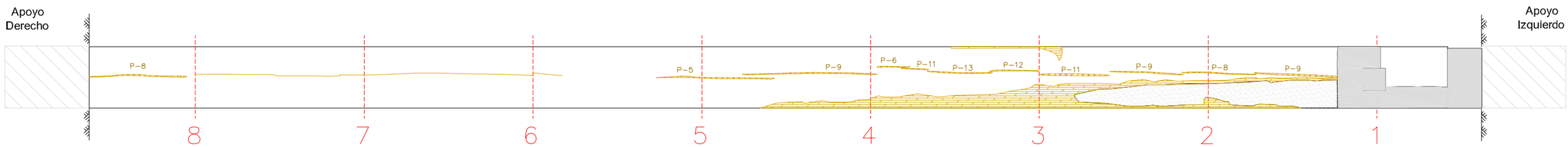
(escala $\frac{1}{25}$)

Cara A



LEYENDA: Perdida de sección por ataque biológico | Relleno con resinas epoxy | Reconstrucción de sección con resinas epoxy y fibras de vidrio | P.X – Fenda de profundidad aproximada de X cm

Cara B



ANEXO II

ANEXO II.2

TOMAS DE DATOS DEL RESISTOGRAPH

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Proyecto: "LA LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA"

Viga	Dia	nº	Direcção	h [cm]	d izq [m]	d der [m]	Obs	HUM [%]	fichero xls
		3		7,0		0,59			LONJA11-13003.xls
		4		14,5		1,95			LONJA11-13004.xls
V 13	17-Fev	5	b	23,5	3,99			11%	LONJA11-13005.xls
		6		16,0	1,62				LONJA11-13006.xls
		7		9,5	0,49				LONJA11-13007.xls
		8		8,0		0,50			LONJA11-13008.xls
		9		14,0		1,50			LONJA11-13009.xls
		10					NULO		LONJA11-13010.xls
	17-Fev	11	a	25,0		3,20			LONJA11-13011.xls
V 12		12		10,5	1,75			11%	LONJA11-13012.xls
		13					NULO		LONJA11-13013.xls
		14		12,0	1,08				LONJA11-13014.xls
		62		13,5		2,00			LONJA_1Mar062.xls
		63	b	26,0		3,65			LONJA_1Mar063.xls
		64		25,0	2,57				LONJA_1Mar064.xls
		15		9,0	0,94				LONJA11-13015.xls
		16		26,0	1,57				LONJA11-13016.xls
	17-Fev	17	a	13,5	3,27				LONJA11-13017.xls
		18		13,0		2,04			LONJA11-13018.xls
V 11		19		11,0		0,59	NULO	10%	LONJA11-13019.xls
	18-Fev	1		9,0		0,62			LONJA_22Feb001.xls
		59		17,5	2,40				LONJA_1Mar059.xls
		60	b	26,0	4,17				LONJA_1Mar060.xls
		61		13,0		1,91			LONJA_1Mar061.xls
		2					NULO		LONJA_22Feb002.xls
		3					NULO		LONJA_22Feb003.xls
		4		8,5		0,38			LONJA_22Feb004.xls
		5					NULO		LONJA_22Feb005.xls
	18-Fev	6	a	17,0		1,92			LONJA_22Feb006.xls
		7		17,0		3,42			LONJA_22Feb007.xls
V 10		8		18,0	2,41			10%	LONJA_22Feb008.xls
		9					NULO		LONJA_22Feb009.xls
		10		9,0	0.87				LONJA_22Feb010.xls
		56		25,0		3,88			LONJA_1Mar056.xls
		57	b	15,0		2,30			LONJA_1Mar057.xls
		58		17,0	2,17				LONJA_1Mar058.xls
		11		9,0	1,10				LONJA_22Feb011.xls
		12		15,5	2,20				LONJA_22Feb012.xls
	18-Fev	13	a				NULO		LONJA_22Feb013.xls
		14		28,5	3,36				LONJA_22Feb014.xls
		15		14,0		1,90			LONJA_22Feb015.xls
V 9		16		6,0		0,76		10%	LONJA_22Feb016.xls
	21-Fev	17		16,0		1,98			LONJA_22Feb017.xls
	21-Fev	18		15,0	2,16				LONJA_22Feb018.xls
	25-Fev	39	b	18,5		1,99	Repetida		LONJA_1Mar039.xls
	25-Fev	40					NULO		LONJA_1Mar040.xls
	25-Fev	41		26,5		3,78			LONJA_1Mar041.xls
	21-Fev	19		15,0	1,98				LONJA_22Feb019.xls
		20					NULO		LONJA_22Feb020.xls
		21	a	8,0	0,79				LONJA_22Feb021.xls
		22		23,0	3,29				LONJA_22Feb022.xls
V 8	22-Fev	23		17,0		1,99		9%	LONJA_22Feb023.xls
		24		8,0		0,79			LONJA_22Feb024.xls
		25		11,0	2,00				LONJA_22Feb025.xls
		29	b	21,0	3,21				LONJA_22Feb029.xls
		30		14,0		2,13			LONJA_22Feb030.xls
		26		8,0		0,65			LONJA_22Feb026.xls
		27		14,5		2,16			LONJA_22Feb027.xls
		28	a	23,0		3,15			LONJA_22Feb028.xls
		31		13,0	2,07				LONJA_22Feb031.xls
V 7	22-Fev	32		7,5	1,05			10%	LONJA_22Feb032.xls
		37		15,0		2,15			LONJA_22Feb037.xls
		38	b	25,0		3.56			LONJA_22Feb038.xls
		39		13,5	2,10				LONJA_22Feb039.xls
		33		6,5	1,10				LONJA_22Feb033.xls

TOMAS DE DATOS DEL RESISTOGRAPH

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Proyecto: "LA LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA"

Viga	Dia	nº	Direcção	h [cm]	d izq [m]	d der [m]	Obs	HUM [%]	fichero xls
		34					NULO		LONJA_22Feb034.xls
		35		14,0	2,16				LONJA_22Feb035.xls
	22-Fev	36	a	22,0	3,07				LONJA_22Feb036.xls
		40					NULO		LONJA_22Feb040.xls
V 6		41		17,0		2,19		10%	LONJA_22Feb041.xls
		42		7,0		0,63			LONJA_22Feb042.xls
		1		8,0	0,64				LONJA_1Mar001.xls
	23-Fev	2	b	15,5	2,26				LONJA_1Mar002.xls
		3		23,0	3,39				LONJA_1Mar003.xls
		4		13,0		1,80			LONJA_1Mar004.xls
		5		6,5		0,57			LONJA_1Mar005.xls
		6					NULO		LONJA_1Mar006.xls
		7		15,0		2,03			LONJA_1Mar007.xls
		8	a	25,0	3,85				LONJA_1Mar008.xls
		9		20,0	2,20				LONJA_1Mar009.xls
		10		8,0	1,17				LONJA_1Mar010.xls
V 5	24-Fev	11					NULO	10%	LONJA_1Mar011.xls
		12		19,0	2,08				LONJA_1Mar012.xls
		15					NULO		LONJA_1Mar015.xls
		16	b				NULO		LONJA_1Mar016.xls
		17					NULO		LONJA_1Mar017.xls
		18		21,0	3,78				LONJA_1Mar018.xls
		20		13,0		1,75			LONJA_1Mar020.xls
		13		6,0	0,70				LONJA_1Mar013.xls
		14		14,0	2,09				LONJA_1Mar014.xls
		19		25,0	3,73				LONJA_1Mar019.xls
		21	a	13,5		2,02			LONJA_1Mar021.xls
		22		6,5		0,84			LONJA_1Mar022.xls
V 4	24-Fev	23		17,0		2,12		11%	LONJA_1Mar023.xls
		24					NULO		LONJA_1Mar024.xls
		30		18,5	4,15				LONJA_1Mar030.xls
		31	b	15,5	2,05				LONJA_1Mar031.xls
		32		28,5	4,12				LONJA_1Mar032.xls
	22-Abr	67		15,0		1,88			LONJA_22Abr067.xls
		25		6,0		0,63			LONJA_1Mar025.xls
		26	a				NULO		LONJA_1Mar026.xls
	24-Fev	27					NULO		LONJA_1Mar027.xls
V 3		28		16,0		2,05		11%	LONJA_1Mar028.xls
		29		16,5		2,13	Regist. Preso		LONJA_1Mar029.xls
		65	b	22,5	2,08				LONJA_22Abr065.xls
	22-Abr	66		26,0	4,00				LONJA_22Abr066.xls
		68		16,0	2,01				LONJA_22Abr068.xls
		42		7,0		0,65			LONJA_1Mar042.xls
		43		15,0		2,10			LONJA_1Mar043.xls
		44		26,5		4,01			LONJA_1Mar044.xls
		45	a				NULO		LONJA_1Mar045.xls
V 2	25-Fev	46		19,0	1,82			10%	LONJA_1Mar046.xls
		47		10,5	0,74				LONJA_1Mar047.xls
		48		18,0	2,05				LONJA_1Mar048.xls
		52	b	21,0		4,10			LONJA_1Mar052.xls
		53		13,0		2,15			LONJA_1Mar053.xls
		49		9,0	0,52				LONJA_1Mar049.xls
		50		15,0	1,70				LONJA_1Mar050.xls
V 1	25-Fev	51	a	26,0		4,05		10%	LONJA_1Mar051.xls
		54		14,0		2,16			LONJA_1Mar054.xls
		55		8,0		0,84			LONJA_1Mar055.xls

NOTA: Las medidas nº33 a 38, realizadas en día 25-Feb, no son consideradas pues dicen respecto al cambio de la aguja del resistógrafo.

ANEXO II

ANEXO II.3

RESULTADOS DEL RESISTOGRAPH1410

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Proyecto: "LA LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA"

	Dirección A									Dirección B								
	A1	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**A9**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**MEDIA**	**DIF.**
V1	10,84	9,55	8,03	7,26	10,46												9,23	3,58
V2	13,54	12,56	13,40	NULO	9,92	11,26				10,15	12,77	13,53					12,14	3,62
V3	9,73	9,70	12,51	9,34						8,97	9,03	8,42	10,15				9,33	4,09
V4	8,47	8,53	9,60	9,04	9,29	9,20				NULO	8,57	9,03	11,03	9,56			9,23	2,56
V5	7,48	8,73	7,81	9,53	8,15	8,63				NULO	8,16	8,77	NULO	10,74	9,27	9,36	8,79	3,26
V6	11,21	11,22	11,74	10,00	NULO	11,32	14,29			10,21	9,06	8,56	9,92				10,75	5,73
V7	9,08	8,23	7,98	9,01	10,44					9,67	8,22	7,41					8,75	3,03
V8	9,72	NULO	9,53	8,71	8,33	8,63				9,76	8,29	8,89					8,98	1,47
V9	11,54	7,43	7,28	7,72	7,73	7,94				7,20	7,45	7,95	7,86	8,80			8,08	4,34
V10	7,63	NULO	8,55	7,57	7,41	8,02	7,74	NULO	13,16	9,03	8,13	10,40					8,76	5,75
V11	7,85	6,76	6,60	7,91	8,24	8,92				7,79	9,77	9,06					8,10	3,17
V12	13,84	11,36	12,35	13,05	9,86	9,42	9,93			15,96	13,10	13,34					12,22	6,54
V13										11,07	9,76	8,79	8,46	9,33			9,48	2,61

LEYENDA:

12,51 Valor no considerado en el cálculo del valor de la viga a que pertenece, por ser muy diferente de la restante muestra de datos

NULO Valores no consideradas en el cálculo – (mediciones incorrectas por mala ejecución del ensayo)

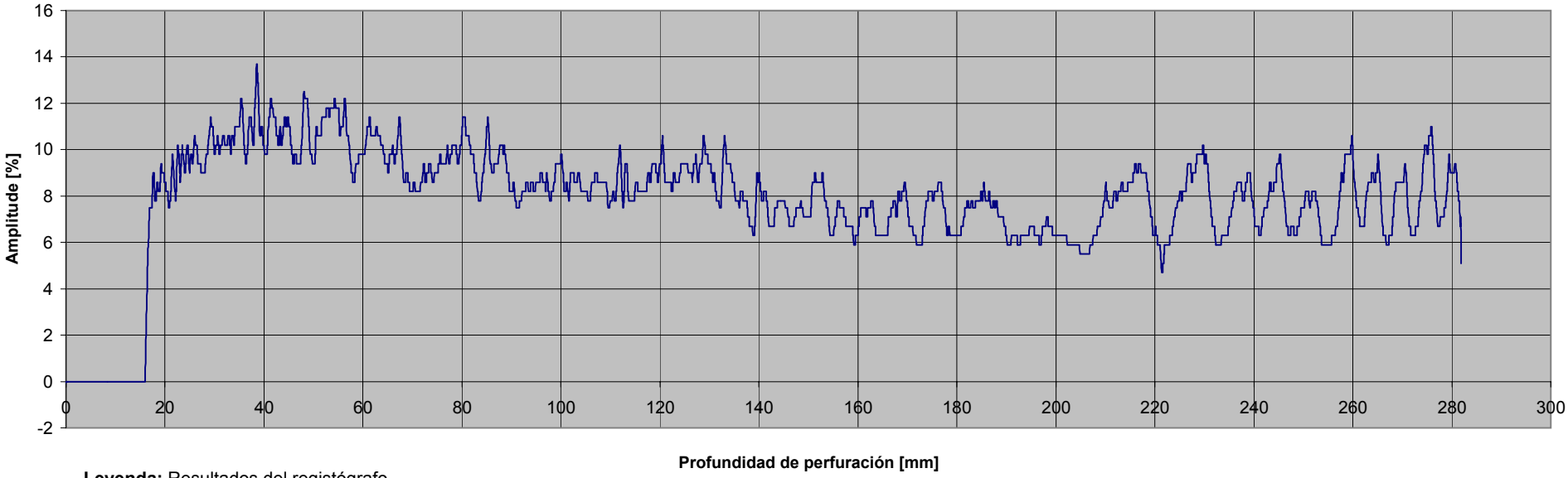
ANEXO II

ANEXO II.4

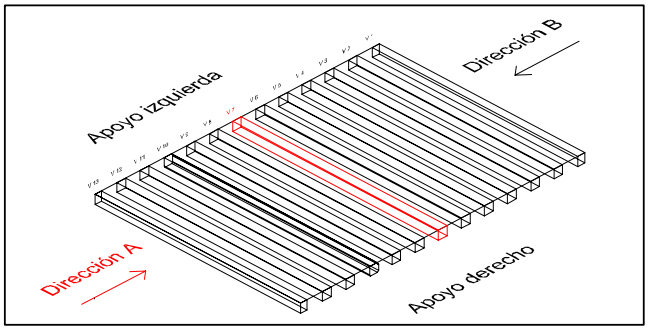
Proyecto	**: "LA LONJA DE LOS MERCADORES DE VALENCIA"**						
Viga	:	V7	**h [cm]**	:	14,5	**Vel. [cm/min]**	: 20
Direcção	:	a	**d izq [m]**	:		**Hum. rel. [%]**	: 10%
Medida nº	:	27	**d der [m]**	:	2,16	**Data**	: 22-Fev

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA



Leyenda: Resultados del registógrafo



Observaciones:

C =	226,56	mm
Valor Registógrafo =	**8,23**	
Valor medio V7 =	**8,75**	

ANEXO II

ANEXO II.5

Proyecto : "LA LONJA DE LOS MERCADORES DE VALENCIA"

Viga	V7	**Longitud [m]**	8,25	valor médio
		b [cm]	34	
		h [cm]	36,5	

Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

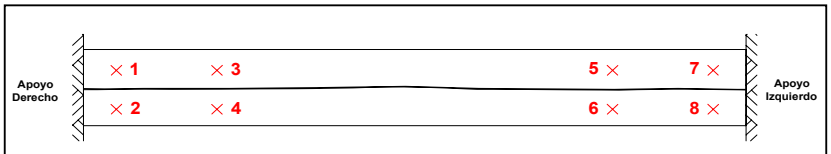
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Medida	Data	Lenght [mm]	Dist. Izq. [m]	Dist. Der. [m]	Temp.	Measure.T [ms]	Velocidad [m/s]	Measure.P [mV]	Tipo de medida	Obs.
31	04-Mar	614	0,4	1,735	13	1295	4741	8	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **4 - 8**
32	04-Mar	614	0,4	1,735	13	1252	4904	3	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **3 - 8**
33	04-Mar	614	0,4	1,735	13	1297	4734	1	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **3 - 7**
34	04-Mar	614	0,4	1,735	13	1281	4793	3	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **4 - 7**
35	04-Mar	647,5	1,26	0,3	14	1379	4695	2	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **2 - 6**
36	04-Mar	647,5	1,26	0,3	14	1351	4793	1	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **1 - 6**
37	04-Mar	647,5	1,26	0,3	14	1342	4825	1	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **1 - 5**
38	04-Mar	647,5	1,26	0,3	14	1360	4761	1	PARALELA sup	Hienda en toda la longitud de la cara superior: **2 - 5**
49	08-Mar	515,5	2,79	0,34	16	1063	4849	3	CRUZADA sup der	Palpador en la cara superior sobre punto **1**
50	08-Mar	515,5	2,79	0,34	17	1034	4985	6	CRUZADA sup der	Palpador en la cara superior sobre punto **2**
51	08-Mar	522	0,37		17	1057	4939	0	CRUZADA sup izq	Palpador en la cara superior sobre punto **8**
52	08-Mar	522	0,37		19	1013	5153	1	CRUZADA sup izq	Palpador en la cara superior sobre punto **7**

VALOR MEDIO	**4848**	**m/s**
DESV. TÍPICA	**129,7**	

LEYENDA:

PARALELA sup - Medición paralela por la cara superior de la viga
CRUZADA sup izq - Medición cruzada con el palpador por cara superior en el lado izquierdo
CRUZADA sup der - Medición cruzada con el palpador por cara superior en el lado derecho



Puntos de colocación de los palpadores en la cara superior de V7

Proyecto : "LA LONJA DE LOS MERCADORES DE VALENCIA"

Viga	V8	**Longitud [m]**	8,25	valor médio
		b [cm]	34	
		h [cm]	37	

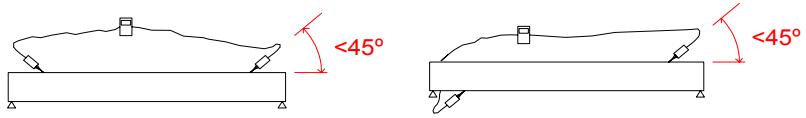
Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Medida	Data	Lenght [mm]	Dist. Izq. [m]	Dist. Der. [m]	Temp.	Measure.T [ms]	Velocidad [m/s]	Measure.P [mV]	Tipo de medida	Obs.
17	02-Mar	621,5	0,317	1,72	15	1262	4925	1	PARALELA sup	
18	02-Mar	621,5	0,317	1,72	15	1257	4944	3	PARALELA sup	
19	02-Mar	671	1,2	0,3	15	1340	5007	1	PARALELA sup	
20	02-Mar	671	1,2	0,3	15	1339	5011	1	PARALELA sup	
46	08-Mar	434	1,24	2,7	17	1349	3217	0	CRUZADA sup izq	
47	08-Mar	525	0,33	2,7	19	1048	5010	4	CRUZADA sup izq	
48	08-Mar	554	2,7	0,27	18	1089	5087	1	CRUZADA sup der	
					VALOR MEDIO		**4743**	**m/s**		
					DESV. TÍPICA		**674,9**			

LEYENDA:

PARALELA sup - Medición paralela por la cara superior de la viga
CRUZADA sup izq - Medición cruzada con el palpador por cara superior en el lado izquierdo
CRUZADA sup der - Medición cruzada con el palpador por cara superior en el lado derecho

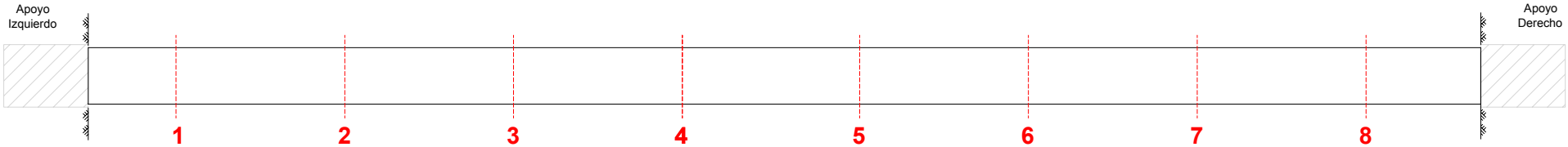


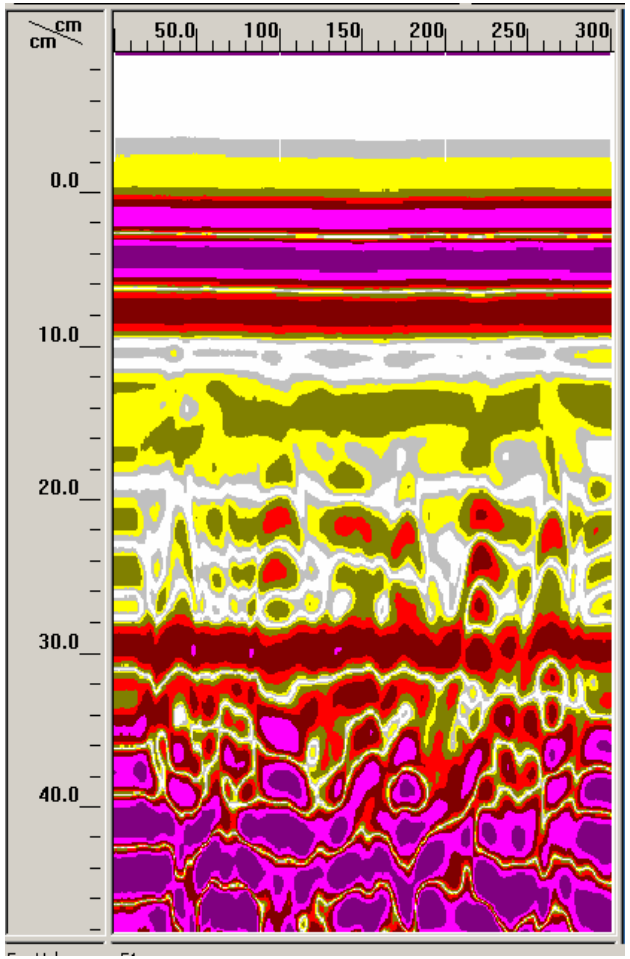
Medición PARALELA sup **Medición CRUZADA sup der**

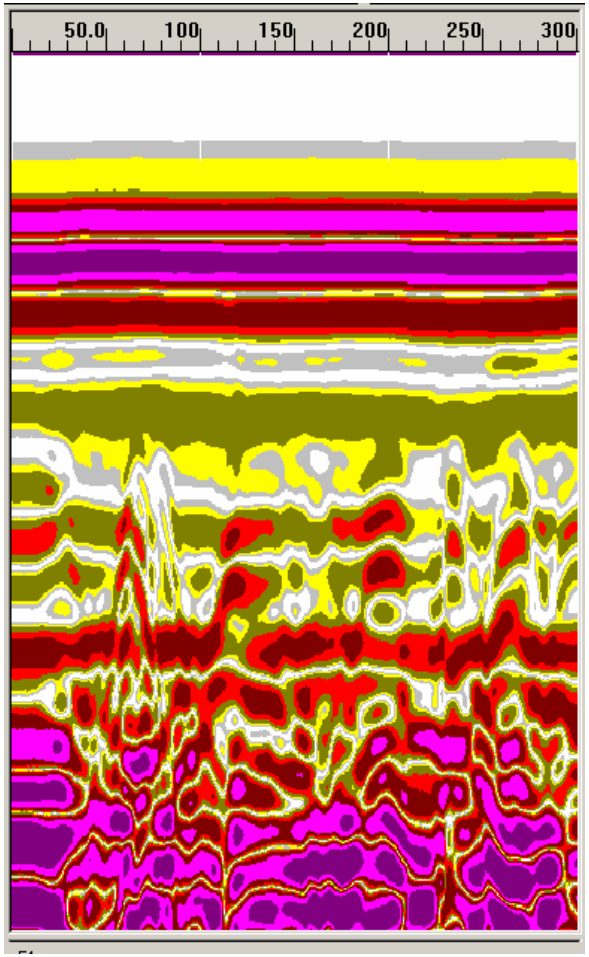
ANEXO II

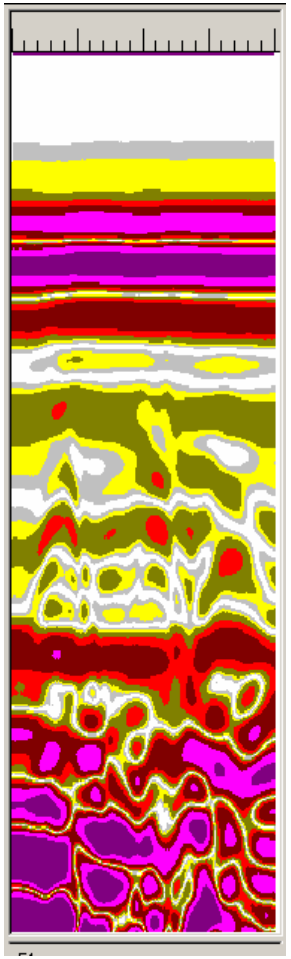
ANEXO II.6

ANÁLISE GEORRADAR - VIGA 7 CARA INFERIOR
(Sin escala)









SECCIÓN 1 SECCIÓN 4 SECCIÓN 7 SECCIÓN 1