



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas de postes de madeira com recurso a técnicas não destrutivas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas.

Autor

**Pedro Miguel Reis Marto**

Orientador

**Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias**

**Carlos Eduardo de Jesus Martins**

**Coimbra, Julho, 2013**

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer à empresa Pedrosa e Irmãos, LDA por toda a sua disponibilidade que me ofereceram para a realização deste estudo.

Ao Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias, pelo seu apoio, orientação e conselhos prestados que contribuíram positivamente para o desenrolar deste trabalho.

Ao Carlos Martins pelo seu apoio, orientação e pela sua enorme paciência que teve para comigo durante a realização deste trabalho.

Ao Eng. Néilson Pedrosa, Eng. Frazão, Joel, Sr. Paulo, Sra Fátima e Pedro Gil pela valiosa ajuda na realização dos ensaios experimentais.

Ao Doutor Saporiti Machado pela disponibilidade oferecida ao emprestar um equipamento para a realização de alguns ensaios experimentais.

Quero também agradecer aos meus pais e irmão por todo apoio e estabilidade não só durante esta dissertação, mas também durante todo o percurso académico.

Aos meus companheiros de casa (Hugo Couto, André Reis, Tiago Silva, Mário Oliveira e João Lopes) que tanto me apoiaram, em todas as vertentes, para conseguir vencer todos os enormes obstáculos que surgiram ao longo destes meses.

Por fim agradeço a todos os meus amigos que contribuíram para a conclusão deste trabalho tanto a nível de estudo como a nível de paródia.

## RESUMO

Neste estudo, pretende-se fazer uma avaliação das propriedades mecânicas de madeira circular da espécie Pinheiro bravo através do recurso a técnicas de ensaio não destrutivas, tendo em vista a sua posterior aplicação em postes de suporte de linhas aéreas.

O trabalho foi iniciado por uma selecção e caracterização visual de uma amostra de postes, cumprindo com os pressupostos estabelecidos na Norma EN 14229 (CEN, 2010). Após essa caracterização, os postes foram sujeitos a ensaios não destrutivos baseados em quatro técnicas: vibração longitudinal, vibração transversal, ultra-sons e flexão simplificada. Por fim, para aferir a validade dos ensaios não destrutivos, foram realizados ensaios, segundo a mesma norma, com o objectivo de determinar o módulo de elasticidade estático.

O conjunto de resultados obtidos foi analisado por forma a perceber quais as propriedades da madeira, e/ou técnicas não destrutivas cujos valores melhor se correlacionam com o módulo de elasticidade estático. Tal foi atingido através de um estudo estatístico, que recorreu a regressões lineares simples.

Para o módulo de elasticidade estático dos ensaios de flexão simplificada e dos ensaios de flexão de acordo com a norma resultaram valores médios de 6.8GPa e 10.6GPa, respectivamente. Quanto aos ensaios dinâmicos os resultados foram um pouco superiores apresentando valores de 14.7GPa para a vibração transversal, 14.8GPa para a vibração longitudinal e 13.2GPa para os ultra-sons.

No que diz respeito às correlações avaliadas entre o módulo de elasticidade estático e outras propriedades, os melhores valores foram obtidos com a inclinação das fibras, a ovalidade na linha terra, a massa volúmica e o adelgaçamento; o ensaio de flexão simplificado e o ensaio de vibração longitudinal.

## **ABSTRACT**

The main goal of this study is to assess the mechanical properties of Maritime pine round wood through the use of non-destructive techniques, aiming its use on as wood poles for overhead lines.

The work was started by a selection and a visual characterization of a sample of the utility poles in accordance with the requirements from the standard EN 14229 (CEN, 2010). After the visual characterization, the utility poles were submitted to non-destructive tests based in four techniques: longitudinal vibration, transverse vibration, ultrasounds and simplified bending. In the end, the non-destructive techniques were validated through the standard test defined in EN 14229 to determine the static modulus of elasticity.

The set of the results obtained was analyzed aiming the identification of the geometric/physical wood properties, and/or non-destructive techniques that had a better correlation with the static modulus of elasticity. That was undertaken through the use of simple linear regressions.

The static modulus of elasticity obtained with the simplified bending and with the conventional bending tests, performed in accordance with EN 14229, the results were 6.8GPa and 10.6GPa, respectively. For the dynamic tests, the results were higher than those obtained with the last, with values of 14.7GPa for the longitudinal vibration, 14.8GPa for the transverse vibration and 13.2GPa for the ultrasounds.

Regarding to the evaluated coefficients of correlation between the static modulus of elasticity and other properties, the best values were obtained with the slope of grain, ovality at ground-line, the density and the pole taper; the simplified bending test and the longitudinal vibration test.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	vi
SIMBOLOGIA .....	vi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
1.1. Introdução .....	3
1.2. Estudos realizados sobre as características mecânicas de postes e toros de madeira circular.....	3
3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA .....	15
3.1. Introdução .....	15
3.2. Classificação visual.....	16
3.3. Classificação não destrutiva.....	21
3.3.1. Análise por vibração.....	22
3.3.2. Análise por ultra-sons.....	26
3.3.3. Análise por via de carga estática .....	28
4 Ensaio de flexão de acordo com a EN 14229 .....	29
4.1. Introdução .....	29
4.2. Esquema de ensaio .....	29
4.3. Determinação do módulo de elasticidade .....	31
4.4. Teor de água.....	33
4.5. Massa Volúmica.....	35

---

5	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	36
5.1.	Introdução .....	36
5.2.	Análise quantitativa das técnicas não destrutivas .....	36
5.3.	Análise qualitativa das técnicas não destrutivas .....	39
5.4.	Comparação do módulo de elasticidade estático entre madeira circular de pinho bravo e outras espécies .....	40
6	CONCLUSÕES .....	43
6.1.	Trabalho Futuro.....	44
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
	ANEXO A – CORRELAÇÕES .....	A-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aparelho <i>Timber Grander MTG</i> (Morgado, 2012) .....	5
Figura 2.2 – Aparelho <i>Pundit Plus</i> (Morgado, 2012) .....	6
Figura 2.3 - Esquema de ensaio de flexão em consola (Torrán E. A. <i>et al.</i> , 2009) .....	8
Figura 2.4 – Aparelho <i>sylvatest duo</i> (Prieto E. H. <i>et al.</i> , 2007) .....	10
Figura 2.5 – Ensaio de flexão estática utilizando o <i>Metiguard model 312</i> (Wang X. <i>et al.</i> , 2001) .....	12
Figura 3.1 – Pilhas representativas dos postes antes da caracterização visual ( <a href="http://pedrosairmaos.com">http://pedrosairmaos.com</a> ).....	16
Figura 3.2 – Ilustração dos critérios de medição de curvatura de postes e respectivos limites máximos .....	17
Figura 3.3 – Distribuição de frequências do diâmetro nominal na linha terra .....	18
Figura 3.4 – Distribuição de frequências do diâmetro nominal na aplicação da carga .....	18
Figura 3.5 – Distribuição de frequências do diâmetro médio de nós isolados e conjunto de nós .....	19
Figura 3.6 – Distribuição de frequências da máxima razão entre o diâmetro do nó e o perímetro .....	20
Figura 3.7 – Distribuição de frequências da máxima razão entre o somatório de diâmetros de nós e o perímetro.....	20
Figura 3.8 – Acelerómetro piezoeléctrico ( <a href="http://www.bksv.com">http://www.bksv.com</a> ) .....	23
Figura 3.9 – <i>NIUSB-4431 da National Instruments</i> ( <a href="http://sine.ni.com">http://sine.ni.com</a> ) .....	23
Figura 3.10 – Esquema de apoio na base do poste .....	24
Figura 3.11 – Esquema de ensaio de vibração transversal .....	24
Figura 3.12 – Posicionamento do acelerómetro no ensaio de vibração longitudinal .....	25
Figura 3.13 – Esquema de ensaio de ultra-sons.....	27
Figura 4.1 – Zona de encastramento .....	29
Figura 4.2 – Zona de aplicação da carga.....	29
Figura 4.3 - Esquema de ensaio proposto pela EN 14229 (CEN, 2010).....	30
Figura 4.4 – Motor com um cabo de aço ligado a uma célula de carga.....	31
Figura 4.5 – Determinação do declive da recta força vs deslocamento .....	32
Figura 4.6 – Distribuição de frequências do módulo de elasticidade estático .....	33
Figura 4.7 - Equipamento de medição do teor de água.....	34

---

Figura 5.1 – Comparação de módulos de elasticidade de postes circulares para aplicação em postes de linhas aéreas .....	41
Figura 5.2 – Comparação de módulos de elasticidade obtidos em postes com os obtidos em toros para a espécie Pinheiro bravo .....	42
Figura A.1 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a taxa de crescimento ...	A-1
Figura A.2 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a inclinação das fibras ..	A-1
Figura A.3 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a massa volúmica .....	A-1
Figura A.4 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro mínimo do nó.... .....	A-1
Figura A.5 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro máximo do nó .....	A-2
Figura A.6 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro médio do nó .....	A-2
Figura A.7 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a relação entre o diâmetro máximo e o perímetro .....	A-2
Figura A.8 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a relação entre a soma dos diâmetros máximos e o perímetro.....	A-2
Figura A.9 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro nominal na linha terra .....	A-3
Figura A.10 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro nominal no local de aplicação da carga.....	A-3
Figura A.11 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a ovalidade na linha terra .....	A-3
Figura A.12 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a ovalidade no local de aplicação da carga.....	A-3
Figura A.13 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o adelgaçamento.....	A-4
Figura A.14 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração transversal .....	A-4
Figura A.15 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração longitudinal .....	A-4
Figura A.16 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 0m e 4m .....	A-4
Figura A.17 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 4m e 8m .....	A-5
Figura A.18 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 2m .....	A-5
Figura A.19 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 2.5m .....	A-5

---

Figura A.20 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 3m .....	A-5
Figura A.21 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade estático obtido com flexão simplificada.....	A-6

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência à flexão ( $f_m$ ) e outras propriedades.....	13
Tabela 2.2 - Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico obtido por diversas técnicas não destrutivas e outras propriedades mecânicas .....	14
Tabela 3.1 – Características visuais obtidas, segundo a norma EN 14229 (CEN, 2010) .....	21
Tabela 3.2 – Valores da frequência, da massa, do vão ( $l_v$ ) e do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dyn_T}$ ) do ensaio de vibração transversal .....	24
Tabela 3.3 - Valores da frequência, do comprimento total do poste ( $l$ ), da massa volúmica ( $\rho$ ) e do módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração longitudinal .....	26
Tabela 3.4 – Valores do $E_{dyn_{us}}$ e da velocidade da onda ( $C$ ) utilizando o ensaio de ultra-sons .....	27
Tabela 3.5 – Apresentação dos valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade .....	28
Tabela 4.1 - Valores registados do teor de água a várias profundidades .....	34
Tabela 5.1 – Coeficientes de correlação entre características visuais e o módulo de elasticidade estático .....	37
Tabela 5.2 – Correlação entre ensaios dinâmicos e o módulo de elasticidade estático .....	38
Tabela 5.3 – Comparação qualitativamente das 5 técnicas não destrutivas .....	40

## SIMBOLOGIA

### *LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS*

C – velocidade de propagação da onda

D – Declive da recta força *vs* deslocamento no ensaio para o cálculo do módulo de elasticidade estático

E – Módulo de elasticidade estático paralelo às fibras

EA – Rigidez axial de um elemento

EI – Rigidez de flexão de um elemento

$E_{dyn\_L}$  – Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ensaio de vibração longitudinal

$E_{dyn\_T}$  – Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ensaio de vibração transversal

$E_{dyn\_us}$  – Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ensaio de ultra-sons

I – Módulo de inércia à flexão

$I_q$  – Módulo de inércia da secção transversal no ponto de aplicação da carga

LT – Linha terra

L – Comprimento total de um elemento

Q – Carga aplicada

PSF – Ponto de saturação das fibras

R – Coeficiente de correlação entre propriedades

### *LETRAS LATINAS MINÚSCULAS*

$d_g$  – Diâmetro nominal na linha terra

$d_{máx}$  – Diâmetro máximo da secção

$d_{med,LT}$  – Diâmetro médio na linha-terra

$d_{med,q}$  – Diâmetro médio no local de aplicação da carga

$d_{min}$  – Diâmetro mínimo da secção

$d_q$  – Diâmetro nominal no ponto de aplicação da carga

f – Frequência própria de vibração

$f_m$  – Resistência à flexão paralelo às fibras

l – Comprimento total do poste (medido da base até ao topo)

$l_{LT-q}$  – Distância entre a linha-terra e o local de aplicação da carga do poste

$l_g$  – Distância entre a base e a linha terra

$l_q$  – Distância do topo do poste ao ponto de aplicação da carga  
 $l_{tv}$  – Distância entre os apoios no ensaio de vibração transversal  
 $l_{us}$  – Distância entre os transdutores no ensaio de ultra-sons  
 $m$  – Massa do elemento  
 $\bar{m}$  – Massa de um elemento por unidade de comprimento  
 $n$  – Modos de vibração de um elemento  
 $s_a-s_0$  – Movimento do ponto de aplicação da carga paralelo ao eixo longitudinal do poste durante o ensaio  
 $t_a-t_0$  – Deslocamento de flexão no ponto de aplicação da carga  
 $u(x,t)$  – Função do deslocamento longitudinal  
 $v(x,t)$  – Função do deslocamento transversal

### *LETRAS GREGAS*

$\rho$  – Massa volúmica  
 $\Delta t$  – tempo que a onda acústica demora a percorrer entre as duas sondas (ensaio de ultra-sons)

### *OUTRAS DESIGNAÇÕES*

Critério 1 (nós) – razão máxima entre o diâmetro do nó ou conjunto de nós e o perímetro da secção onde ocorre.

Critério 2 (nós) – razão máxima entre o somatório de todos os diâmetros dos nós ou conjunto de nós ocorridos em 300mm sobre o perímetro da secção média desse mesmo troço.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de madeira existem desde os primeiros tempos de vida do homem. No entanto, devido à grande evolução gerada pela revolução industrial a utilização de materiais como o betão e o aço teve um crescimento significativo, provocando o declínio do uso de madeira como material estrutural. Contudo, na década de 90 do século XX verificou-se o ressurgir do uso de madeira como material estrutural em construção nova e/ou reabilitação. Este renovado interesse na utilização de madeira verificou-se também devido ao impacto provocado pela construção de grandes infra-estruturas como é o caso do MEO Arena (Pavilhão da Utopia à data) como refere Negrão (2011) e do Velódromo Nacional de Sangalhos.

A madeira possui diversas vantagens enquanto elemento estrutural: 1) apresenta boas propriedades mecânicas tendo em conta a sua baixa massa volúmica, 2) possui excelentes propriedades como isolante térmico e acústico e, 3) tem um custo relativamente baixo em relação a outros materiais. Contudo, apresenta como principal desvantagem o facto de as suas propriedades mecânicas apresentarem um coeficiente de variação tipicamente superior ao apresentado por outros materiais, e de estar muitas vezes associada a problemas de durabilidade, devido a problemas de concepção e dimensionamento. Isto deve-se, em grande medida, ao facto de a madeira ser um material de crescimento natural sujeito a um conjunto de acções muito variável.

Também a madeira circular constituiu um material muito usado em Portugal, nomeadamente da espécie Pinheiro bravo. Uma das grandes aplicações deste material é a utilização enquanto postes para suporte de linhas aéreas devido à grande extensão de linhas aéreas que cobrem todo o território nacional.

Visto que a madeira apresenta propriedades físicas e mecânicas muito variáveis é imprescindível o uso de algumas técnicas para melhorar o conhecimento dessas propriedades, permitindo assim um uso mais racional deste material. Essas técnicas tanto podem ser destrutivas como não destrutivas, dependendo do tipo de análise pretendida.

Neste estudo o principal objectivo consistiu na realização de uma avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas de postes de madeira de Pinheiro bravo. Primeiramente foi realizada

---

uma selecção de postes tendo em conta os requisitos presentes na norma europeia EN 14229 (CEN, 2010), sendo a região Centro de Portugal a proveniência dos postes seleccionados. Seguidamente foi conduzida a caracterização visual da amostra tendo em conta a norma referida anteriormente. Após a caracterização visual foi realizado um conjunto de ensaios designados de não destrutivos com o objectivo de aferir o módulo de elasticidade dinâmico. As técnicas consideradas neste estudo foram: vibração transversal, vibração longitudinal e os ultra-sons. Por fim, sucedendo aos ensaios dinâmicos foram conduzidos dois ensaios estáticos, um deles consistiu na flexão simplificada do poste em consola e o outro seguindo os pressupostos da norma EN 14229 (CEN, 2010).

Do conjunto de resultados obtidos foi realizado o tratamento estatístico dos mesmos recorrendo a análises de regressão linear simples de modo a aferir quais as características/técnicas mais eficazes na predição das propriedades mecânicas dos postes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Introdução

No presente capítulo procura-se dar uma visão acerca da utilização dos postes de madeira e dos estudos já realizados acerca deste material enquanto elemento de suporte a linhas aéreas. Para tal é elaborada uma summa de vários estudos realizados onde são descritos os métodos de classificação mecânica com o objectivo de determinar as principais propriedades mecânicas. Dada a evolução tecnológica, têm surgido metodologias designadas de não destrutivas que já se encontram validadas no mercado para avaliar as propriedades mecânicas da madeira.

### 1.2. Estudos realizados sobre as características mecânicas de postes e toros de madeira circular

Em Portugal existem alguns estudos realizados para a obtenção das propriedades mecânicas de secções circulares da madeira da espécie de Pinho bravo português (*Pinus pinaster*, AIT.) através de ensaios destrutivos e não destrutivos. O estudo de Martins (2010) contemplou a classificação mecânica de uma amostra de 64 postes, sendo até ao momento o único estudo com divulgação pública realizado em Portugal em postes de madeira.

Cada elemento da amostra referida foi alvo de classificação visual e posteriormente a um ensaio destrutivo de flexão, segundo os requisitos estipulados na EN 14229 (CEN, 2010). As propriedades mecânicas determinadas foram o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Foram também determinadas as massas volúmicas e os teores de água para cada elemento. A amostra foi composta por postes oriundos da zona centro e norte de Portugal continental com cerca de 8m e com um diâmetro nominal entre 180mm e 220mm. Após o corte dos postes nas florestas estes, já na serração, sofreram um descasque e foram colocados em pilha até serem ensaiados com um teor de água ainda acima de 24%.

Para o ensaio de flexão os postes foram colocados em consola nos primeiros 1,5m do poste, medidos a partir da base e a 0,150m do topo foi aplicada uma carga. Os resultados médios obtidos através do ensaio de flexão foram 50.21MPa para a resistência à flexão, 10.9GPa para

o módulo de elasticidade, 65.38% para o teor em água e  $573.42 \text{ kg/m}^3$  para a massa volúmica (valor considerando 12% de teor de água).

A análise dos ensaios de flexão executados permitiu determinar que em 81% dos casos a rotura dos postes ocorreu em secções onde estavam presentes nós e nos restantes casos onde não existiam nós pelo menos visíveis a olho nu. Também a distância a que ocorreu a rotura em relação à base foi medida, sendo que 62% das roturas ocorreram nos primeiros 2m.

Tendo como base a mesma amostra de Martins (2010), Martins e Dias (2012) apresentaram uma análise detalhada dos resultados a nível de coeficientes de correlação através de análise de regressão linear simples e múltipla. Desse estudo, resultou que a propriedade geométrica com melhor coeficiente de correlação estabelecido com a resistência à flexão foi o adelgaçamento (-0.64). Relativamente às propriedades anatómicas a massa volúmica apresentou o maior valor de coeficiente de correlação (0.66). No entanto, o módulo de elasticidade é a propriedade mecânica que estabelece a melhor correlação com a resistência à flexão (0.83).

Do estabelecimento de análise de regressão linear múltipla, os autores apresentaram vários coeficientes de correlação obtidos de entre duas ou mais propriedades com a resistência à flexão. O maior valor de coeficiente de correlação foi obtido, considerando o módulo de elasticidade e o diâmetro nominal na secção de aplicação da carga com um valor de 0.9. Para além desta, existem correlações muito próximas com valores de 0.89 (módulo de elasticidade e adelgaçamento) e 0.86 (módulo de elasticidade e massa volúmica).

Tal como foi referido anteriormente, em Portugal não existe mais nenhum estudo público sobre a classificação mecânica de postes. No entanto, encontram-se na bibliografia outros estudos cujo objectivo foi a classificação mecânica de toros de Pinho bravo enquanto elemento estrutural. Dado que a utilização de ensaios não destrutivos já se encontra cimentada em elementos de secção circular de pequeno diâmetro, e sendo objectivo deste estudo a utilização de algumas metodologias não destrutivas, apresentam-se aqui alguns estudos em toros nos quais foram utilizadas algumas dessas metodologias.

Morgado (2012) realizou um estudo envolvendo 70 toros recolhidos da zona centro do país (distrito de Castelo Branco) e 50 toros da zona Norte (distrito de Braga). Na selecção dos toros uma das condicionantes foi que o comprimento destes fosse cerca de 25 vezes superior ao seu diâmetro e que não possuíssem fendas de resinagem ou de degradação biológica. Depois de ser feita a recolha, os postes foram submetidos a um período de secagem numa sala

climatizada, programada para  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa, até atingirem um teor de água aproximadamente de 12%.

Nesse estudo utilizaram-se 2 métodos não destrutivos, vibração longitudinal e ultra-sons e um método destrutivo ensaio de flexão. Os valores do módulo de elasticidade obtido pelos três métodos foram correlacionados para avaliar o potencial dos valores obtidos pelos métodos não destrutivos.

Os ensaios destrutivos de flexão foram conduzidos pelo teste denominado de *4 point bending test*, como é indicado na Norma EN 14251 (CEN, 2003). Os resultados médios, para a amostra da zona centro, foram de 14.6GPa para o módulo de elasticidade estático e 67.7MPa para a resistência à flexão. Para as amostras da zona norte os valores foram 13.1GPa, 71,0MPa, para o módulo de elasticidade e resistência à flexão, respectivamente.

Para a obtenção das propriedades mecânicas empregando a técnica não destrutiva de vibração longitudinal foi utilizado o equipamento *Timber Grander MTG* (Figura 2.1). O resultado médio do módulo de elasticidade dinâmico foi de 11.9GPa para a zona centro e 11.4GPa para a zona norte. O valor das correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico são maiores na amostra da zona centro apresentando um valor de 0.82. Para a amostra da zona norte o valor obtido foi 0.61.



Figura 2.1 - Aparelho *Timber Grander MTG* (Morgado, 2012)

A avaliação das propriedades mecânicas através do método ultra-sons foi também alvo de estudo por Morgado (2012). Esta foi efectuada com recurso ao equipamento *Pundit Plus* (Figura 2.2). O ensaio consiste na medição da velocidade da onda gerada pelo aparelho ao longo do eixo longitudinal do toro, considerando-se o valor médio das primeiras 5 leituras. Os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico obtidos, utilizando a massa volúmica

determinada de todo o toro (utilizando o peso e o volume de todo o toro), foram 14.29GPa para a primeira amostra (zona centro) e 13.76GPa para a segunda amostra (zona norte). Os resultados das correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico foram 0.82 e 0.62 para as amostras da zona centro e amostras da zona norte, respectivamente.



Figura 2.2 – Aparelho *Pundit Plus* (Morgado, 2012)

Com o intuito de comparar as propriedades mecânicas de toros torneados e toros não torneados, o autor seleccionou uma nova amostra. Essa amostra era constituída por 30 toros da zona centro e mais 10 toros da zona norte. No ensaio de flexão para amostra de toros torneados o autor obteve um valor médio de 12.7GPa para o módulo de elasticidade e de 45.3MPa para a resistência à flexão. Quanto aos ensaios não destrutivos os resultados médios foram de 9.9GPa para módulo de elasticidade dinâmico no ensaio de vibração longitudinal e de 11.71GPa para o ensaio de ultra-sons.

Um outro estudo, realizado por Morgado *et al.* (2008), teve como principal objectivo a determinação das propriedades mecânicas de 200 toros de Pinho bravo com diâmetro a variar entre 70mm e 190mm. Cada toro foi caracterizado visualmente segundo a norma EN 1310 (CEN, 1997), e seguidamente sujeito a ensaios não destrutivos, com recurso aos ultra-sons, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e ensaios destrutivos para a determinação do módulo de elasticidade, da resistência à flexão e à compressão de acordo com a norma EN 14251 (CEN, 2003).

Inicialmente a amostra era composta por 500 toros que foram colocados ao ar livre com o objectivo de obter teores de água inferiores a 20%, e de seguida dessa mesma amostra houve uma selecção de 200 toros que foram transportados para uma sala climática onde permaneceram durante 4 meses. A presença dos toros na sala climática teve um único

objectivo em reduzir o teor de água para próximo de 12%. Este teor de água corresponde às condições ideais de utilização da madeira em construção, que se repercute as condições ambiente de 65% de humidade relativa e 20°C de temperatura.

Os resultados desta investigação foram semelhantes aos do estudo anterior apresentando valores médios para a resistência à flexão de 82.7MPa e para o módulo de elasticidade de 14.6GPa. Os coeficientes de correlação entre a resistência à flexão e o módulo de elasticidade estático e dinâmico são 0.76 e 0.77, respectivamente. Por último o valor médio da massa volúmica foi de 535 kg/m<sup>3</sup> e para a resistência à compressão foi de 40.9MPa.

A nível internacional existem diversos estudos relacionados directamente com o estudo de postes de madeira para suporte de linhas aéreas. Esses estudos remetem para a classificação mecânica dos elementos utilizando técnicas destrutivas e/ou técnicas não destrutivas.

Miná, A. J. S. *et al.* (2004), realizaram um estudo que teve como principal objectivo investigar a eficiência da técnica não destrutiva de ultra-sons em comparação com o ensaio de flexão estática. Para executar estes ensaios foram utilizados 50 postes de madeira da espécie *Eucalyptus citriodora*, em que 15 tinham um comprimento de 7.5m e um diâmetro médio de 21cm e os outros 35 postes tinham um comprimento de 9m e um diâmetro médio de 13.5cm. Foram retirados de cada poste corpos-de-prova, com as dimensões estabelecidas pela NBR-7190/97, para um controlo de humidade onde se permitiu atribuir um valor médio para o teor de água de 12%.

Os postes foram ensaiados para determinar as seguintes propriedades físicas e mecânicas dos postes: massa volúmica com um teor de água em torno de 12%, o módulo de elasticidade na flexão estática e o módulo de elasticidade dinâmico. Todas as amostras foram ensaiadas com o equipamento de ultra-sons, *Sylvatest*, tendo sido realizadas duas leituras do tempo de propagação da onda para cada poste. De seguida os autores procederam ao ensaio de flexão estática onde o poste estava sujeito a uma carga concentrada a meio vão e foram medidas (por meio de anel dinamométrico) duas forças correspondentes aos deslocamentos vertical de 2cm e 4cm.

Para os postes com 7.5m de comprimento obtiveram-se valores médios de 1035kg/m<sup>3</sup> para a massa volúmica, 21572MPa para o módulo de elasticidade dinâmico e 20539MPa para o módulo de elasticidade na flexão estática. Quanto aos postes com um comprimento de 9m foram obtidos os seguintes valores 1087kg/m<sup>3</sup>, 21020MPa e 18392MPa para a massa volúmica, módulo de elasticidade dinâmico e estático, respectivamente. Os coeficientes de

correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático são de 0.79 para os postes de 7.5m e de 0.74 para os postes de 9m.

Em 2003, Cerda e Wolfe, realizaram ensaios de flexão numa amostra de 45 postes da espécie Pinho radiata oriundos do Chile. Os ensaios seguiram os pressupostos da norma americana ASTM D1036 para avaliar a resistência à flexão. Este trabalho foi desenvolvido com o objectivo principal de aferir a viabilidade da aplicação desta espécie como postes para suporte de linhas aéreas, tendo a norma Americana ANSI 05.1 como documento de aprovação. Os postes tinham 12m de comprimento e os ensaios foram conduzidos considerando o sistema estrutural de viga em consola sendo a carga aplicada a 0.6m do topo do poste.

A média da resistência à flexão para a amostra de postes em estudo (45 postes) foi de 45MPa e para o módulo de elasticidade estático foi obtido um valor médio de 10.5GPa, por outro lado a massa volúmica apresentou um valor médio de 440kg/m<sup>3</sup>. Além disso, a nível de roturas nos postes, a maior parte delas ocorreu onde se localizavam nós ou conjuntos de nós.

Um outro estudo sobre postes em consola, sujeitos à flexão (Figura 2.3), seguindo as indicações das normas ASTM D1036 e IRAM 9529, foi realizado por Torrán E. A. *et al.* (2009). Este estudo incidiu no aumento do conhecimento relativo à resistência à flexão e rigidez de flexão (módulo de elasticidade) de postes da espécie Argentinean *Eucalyptus grandis*. Nesta investigação foram diferenciadas duas amostras com características diferentes, ambas foram cultivadas na cidade de Concordia na Argentina e que eram constituídas por postes verdes (teor de água acima do ponto de saturação das fibras).

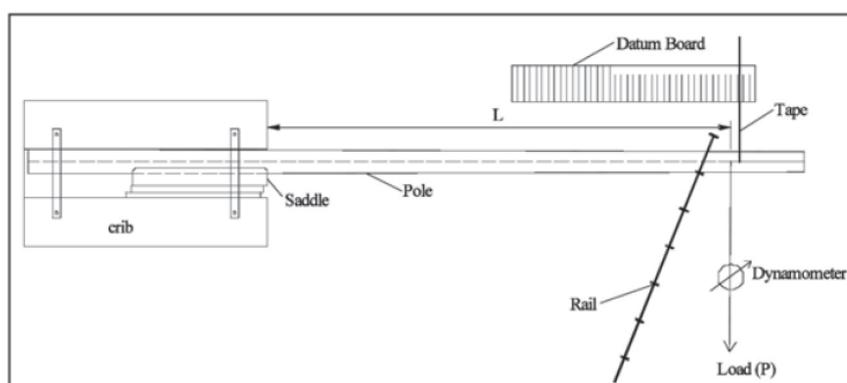


Figura 2.3 - Esquema de ensaio de flexão em consola (Torrán E. A. *et al.*, 2009)

A primeira amostra era composta por 57 postes com 14 anos de idade e com 12m de comprimento e a segunda amostra era composta por 48 postes com 11 anos de idade e 8m de comprimento. Nos ensaios de flexão os postes foram encastrados numa distância de 1,8m e 1,4m para a amostra 1 e 2 respectivamente, para simular a profundidade a que vão estar introduzidos no solo e a carga foi aplicada em todos os postes a 0.6m do topo de cada poste.

Os resultados apontaram para um valor médio do teor de água de 45% para a amostra 1 e de 47% para a amostra 2, verificando assim que em todos os ensaios os postes tinham o teor de água acima do ponto de saturação das fibras. A massa volúmica apresentou um valor médio de 707kg/m<sup>3</sup> e de 682kg/m<sup>3</sup> para a amostra 1 e 2, respectivamente.

Para a amostra 1 obteve-se um valor médio de 62.9MPa para a resistência à flexão e de 10.9GPa para o módulo de elasticidade. Na amostra 2 os valores são mais baixos comparativamente com a amostra 1, tendo sido obtido 56.3MPa e 9.6GPa para a resistência à flexão e para o módulo de elasticidade, respectivamente. Os coeficientes de correlação entre as duas propriedades mencionadas anteriormente apresentam um valor de 0.52 para a amostra 1 e 0.37 para a amostra 2.

Em Espanha, Prieto E. H. *et al.* (2007) fizeram uma avaliação das propriedades de toros torneados da espécie Pinho larício (*Pinus nigra*) de origem dos Montes de Cuenca. O estudo contemplou uma amostra de 445 toros torneados com 8cm, 10cm, 12cm e 14cm e com comprimentos de 2m, 2.5m e 3m. Antes dos ensaios todas as peças estiveram em secagem ao ar livre até atingir um teor de água de 14%.

Após a secagem dos toros os autores procederam a uma avaliação visual de todos os defeitos e particularidades dos toros (Norma EN 1310:1997) e de seguida procederam à realização do ensaio não destrutivo de ultra-sons recorrendo ao aparelho *Sylvatest duo* (Figura 2.4) que permite determinar a velocidade de propagação da onda ao longo do eixo longitudinal do elemento. Por fim realizaram o ensaio de flexão até à rotura, utilizando as especificações estabelecidas pela Norma EN 14251:2003, para o cálculo do módulo de elasticidade global, da resistência à flexão e da massa volúmica na zona de rotura.

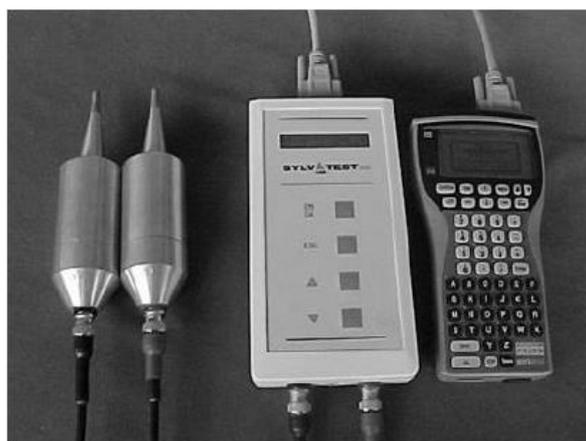


Figura 2.4 – Aparelho *sylvatest duo* (Prieto E. H. *et al.*, 2007)

Os resultados médios dos ensaios de flexão estática da amostra foram 7.1GPa para o módulo de elasticidade estático e 41.2MPa para a resistência à flexão. Os autores determinaram a correlação entre os módulos de elasticidade calculados tendo obtido um 0.83. Neste estudo conclui-se que a posição dos transdutores na secção transversal do toro não introduzia diferenças significativas nos resultados.

Outras duas espécies (Larch e Douglas) foram alvo de estudo por parte de Vries P. e Gard W. (1998) cuja amostra incidiu em madeira circular de pequeno diâmetro. Foram ensaiados 108 toros recolhidos de uma zona oriental da Holanda (Larch) e 145 toros de oriundos de França (Douglas). Estas amostras compreendiam um diâmetro entre 80-140mm e um comprimento entre 2.2-3.0m. O teor de água no instante de ensaio foi de 15% para a amostra 1 (Larch) e de 11% para a mostra 2 (Douglas)

O estudo incidiu na classificação visual tendo sido feito um levantamento relativo a alguns parâmetros, nomeadamente nós, inclinação das fibras, massa volúmica e taxa de crescimento. Neste estudo precedendo a classificação mecânica foram realizados ensaio não destrutivos com recurso à técnica vibração longitudinal. O ensaio de vibração longitudinal consistiu num impacto longitudinal sendo medida a aceleração da vibração com um dispositivo designado de *GrindoSonic MK*. Quanto ao ensaio de flexão estática procedeu-se ao regulamentado na norma EN 408 (CEN, 2003) para o cálculo do módulo de elasticidade estático e da resistência à flexão.

Dos ensaios de flexão resultaram os seguintes valores: 13.4GPa para a amostra 1 e 10.9GPa para amostra 2 em termos de módulo de elasticidade dinâmico e 12.6GPa para a amostra 1 e

18.9GPa para amostra 2 em termos de módulo de elasticidade estático global. As correlações obtidas entre a resistência à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico foi 0.76, entre a resistência à flexão e a massa volúmica foi 0.65 e o entre módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica foi de 0.75. Quanto às correlações estabelecidas entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico, estas apresentam valores entre 0.85 e 0.87 para amostra 1 e para a amostra 2, respectivamente. Do estabelecimento de análise de regressão linear múltipla, o maior valor de coeficiente de correlação foi obtido entre a resistência à flexão, a massa volúmica, o diâmetro nó e o módulo de elasticidade estático com um valor 0.82.

Um outro estudo realizado por Wang X. *et al.* (2001), incidiu no desenvolvimento de técnicas não destrutivas para avaliar o módulo de elasticidade e a rigidez à flexão de toros de pequenos diâmetros. Foram realizados ensaios de vibração transversal, vibração longitudinal e de flexão estática em 159 toros de diâmetro reduzido, sendo a amostra 1 correspondente a 109 toros da espécie jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) e a amostra 2 correspondente a 50 toros da espécie red pine (*Pinus resinosa* Ait.), ambos provenientes do norte de Michigan, EUA. Os toros ensaiados possuíam um comprimento de 3.7m, sendo que depois dos ensaios se recorreu ao corte de rodelas de pequena dimensão na base, a meio e no topo para a obtenção do teor de água.

Inicialmente foram realizados os ensaios de vibração longitudinal e vibração transversal e por fim os ensaios de flexão estática. Cada toro foi sujeito ao ensaio de vibração longitudinal que consistiu num impacto de um martelo numa extremidade e na outra extremidade era medido a onda de tensão, tendo recorrido a um computador para recolha e tratamento de dados. Quanto ao ensaio de vibração transversal, este consistiu num impacto de um martelo a meio vão e a vibração imposta foi registada com um auxílio de um osciloscópio digital e um acelerómetro. Por último para os ensaios de flexão estática foi utilizado o *Metiguard model 312* (Figura 2.5) possibilitando a determinação do módulo de elasticidade estático de cada toro através do cálculo da deformada a meio vão, para uma carga de 445N.



Figura 2.5 – Ensaio de flexão estática utilizando o *Metiguard model 312* (Wang X. *et al.*, 2001)

Os toros da amostra 1 apresentaram valores de teor de água entre 88% e 145% e os da amostra 2 entre 31% e 65% concluindo que todos os toros foram ensaiados em condição saturada, ou seja, teor em água superior a 30%. Dos ensaios de flexão estática resultaram valores médios para o módulo de elasticidade estático de 5.58GPa e 5.52GPa para a amostra 1 e 2, respectivamente. Dos ensaios de vibração transversal os valores do módulo de elasticidade dinâmico estão dentro do intervalo de 1.72GPa e 10.14GPa para a amostra 1 e de 4GPa e 8.4GPa para a amostra 2. O módulo de elasticidade dinâmico calculado pelo ensaio de vibração longitudinal apresenta um valor superior de 21.6% em relação ao ensaio de vibração transversal e de 24.7% em relação ao ensaio de flexão estática para a amostra 1. Quanto à amostra 2 os valores do módulo de elasticidade dinâmico são maiores 11.8% e 18.8% em relação ao módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal e estático por flexão estática, respectivamente.

Os valores dos coeficientes obtidos para as correlações entre os módulos de elasticidade estáticos e os módulos de elasticidade dinâmicos por vibração longitudinal foram de 0.77 e 0.87 para a amostra 1 e 2, respectivamente. Por outro lado, para os coeficientes de correlação entre os módulos de elasticidade estáticos e os módulos de elasticidade dinâmicos por vibração transversal foram de 0.92 para a amostra 1 e 0.97 para a amostra 2.

Por fim, nas tabelas seguintes é feita um resumo dos coeficientes de correlação obtidos em diversos estudos. A determinação destes coeficientes possibilita uma relação entre propriedades mecânicas e físicas da madeira. Estas últimas são de fácil determinação possibilitando a previsão de outras propriedades, nomeadamente a resistência à flexão sem que se tenha de realizar ensaios destrutivos.

Na Tabela 2.1 são apresentados os coeficientes de correlação entre a resistência à flexão e outras propriedades como a massa volúmica, o módulo de elasticidade estático global e algumas das características visuais que, neste caso, foi tida em conta a melhor correlação em cada estudo. Verificou-se que para a massa volúmica a correlação se encontra entre os 0.65 e 0.77 e para o módulo de elasticidade entre os 0.37 e 0.83. Quanto à caracterização visual os valores encontram-se muito próximos, no entanto, existe uma grande variabilidade consoante o tipo de característica.

Tabela 2.1 – Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre a resistência à flexão ( $f_m$ ) e outras propriedades

Autores (ano)	Espécie	Coeficientes de correlação com a resistência à flexão			
		$\rho$	E	Característica visual	
Martins (2010)	Pinheiro bravo	0.66	0.83	Adelgaçamento	-0.64
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona centro)	0.74	0.78	Taxa de crescimento	0.69
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona norte)	0.77	0.62	% de Lenho juvenil	0.77
Morgado <i>et al.</i> (2008)	Pinheiro bravo	0.7	0.75	Taxa de crescimento	0.55
Torrán E. A. <i>et al.</i> (2009)	Eucalyptus grandis (amostra 1)	-	0.52	-	-
Torrán E. A. <i>et al.</i> (2009)	Eucalyptus grandis (amostra 2)	-	0.37	-	-
Vries P. e Gard W. (1998)	Pinho larício	0.65	-	$D_{méd}$ do nó	-0.64

Na Tabela 2.2 são apresentados os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e propriedades mecânicas da madeira (resistência a flexão e módulo de elasticidade estático). Neste caso, faz-se uma distinção entre as várias técnicas utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. Os valores são muito semelhantes em todas as técnicas, destacando-se ainda assim, a técnica de vibração transversal com valores muito perto da unidade.

Tabela 2.2 - Resenha bibliográfica de coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico obtido por diversas técnicas não destrutivas e outras propriedades mecânicas

Utilização do equipamento MTG			
Autores (ano)	Espécie	$f_m$	$E_{global}$
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona centro)	R=0.72	R=0.82
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona norte)	R=0.75	R=0.61
Morgado (2008)	Pinheiro bravo	R=0.75	-
Vries P. et al. (1998)	Pinho larício	R=0.77	R=0.85
Utilização de um equipamento de ultra-sons			
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona centro)	R=0.80	R=0.88
Morgado (2012)	Pinheiro bravo (zona norte)	R=0.87	R=0.68
Miná et al. (2004)	Eucalyptus citriodora (9.0m)	-	R=0.74
Miná et al. (2004)	Eucalyptus citriodora (7.5m)	-	R=0.79
Prieto et al. (2007)	Pinho larício	-	R=0.83
Utilização de um equipamento de stress wave			
Wang X. et al. (2001)	Pinus banksiana	-	R=0.77
Wang X. et al. (2001)	Pinus resinosa	-	R=0.87
Utilização de um equipamento de vibração transversal			
Wang X. et al. (2001)	Pinus banksiana	-	R=0.92
Wang X. et al. (2001)	Pinus resinosa	-	R=0.97

Para a previsão das propriedades mecânicas de elementos circulares de madeira existem inúmeras técnicas disponíveis (ensaios não destrutivos e destrutivos). Estas técnicas divergem essencialmente de três aspectos fundamentais para a sua utilização que são o custo do equipamento, perda de material e a predição das propriedades mecânicas.

## 3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

### 3.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os métodos utilizados neste trabalho para uma avaliação não destrutiva da amostra de postes seleccionada, bem como os princípios teóricos dos métodos.

A selecção de postes constituintes da amostra teve como base três características visuais que constam na Norma Europeia EN14229 (CEN, 2010): 1) o diâmetro nominal na linha-terra (designação para a secção localizada a 1.5m da base do poste), 2) a curvatura do poste, e 3) o comprimento do poste.

Previamente à selecção dos postes, existe um trabalho realizado pela empresa na selecção de árvores a serem cortadas, no transporte dos postes até à serração e no descasque dos mesmos. Após o descasque, estes são colocados em pilhas como ilustra a Figura 3.1, de modo a que o processo de secagem seja mais rápido. Ainda assim, a amostra em estudo consiste na análise de postes que se encontram na empresa à relativamente pouco tempo, para que o teor de água se encontre acima do ponto de saturação das fibras PSF, tal como é imposto pela norma atrás referida. Para o Pinheiro bravo, espécie comercializada pela empresa e em análise neste estudo, o PSF é considerado como sendo 24% tal como indicado na Ficha M2 (LNEC, 1997).



Figura 3.1 – Pilhas representativas dos postes antes da caracterização visual  
(<http://pedrosairmaos.com>)

Posteriormente à selecção de 18 postes (total da amostra em estudo), procedeu-se à caracterização visual da amostra, seguindo as especificações da norma EN 14229 (CEN, 2010). De seguida, foi conduzida a realização de ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através do uso da análise de vibração longitudinal, transversal e ultra-sons. Por fim, foi realizado uma análise por via de carga estática do poste em consola com o objectivo de determinar o módulo de elasticidade estático.

### 3.2. Classificação visual

A classificação visual da amostra constituiu na avaliação das seguintes características visuais dos postes: diâmetro nominal, ovalidade, nós ou conjunto de nós, declive das fibras, taxa de crescimento, curvatura, bolsa de resinas e golpes, danos mecânicos, apodrecimento devido a insectos e fendas. Todas estas características foram analisadas com base nas indicações presentes na norma EN14229 (CEN, 2010).

No que diz respeito aos parâmetros considerados para a selecção dos postes, a norma EN 14229 (CEN, 2010) estabelece que para um comprimento de 8 a 10 metros, pode ocorrer um desvio máximo de -1% a 2 % e ainda um valor entre 180mm e 220mm para o diâmetro nominal a 1.5m da base do poste, ou seja na “linha terra” (LT). Neste estudo foram considerados postes com um comprimento declarado pela empresa de 8 metros.

Além destes dois parâmetros, a curvatura do poste foi o terceiro parâmetro considerado na selecção de postes. A norma referida indica que para curvatura simples, o limite máximo de curvatura corresponde a 1% do comprimento entre o centro da linha terra e a ponta do poste. Para curvatura dupla, deve-se verificar que o traçado de uma linha recta entre o centro da linha-terra e o topo do poste não saia fora dos limites do poste em todo o seu comprimento. Na Figura 3.2 é ilustrado o modo de medição da curvatura simples e dupla.

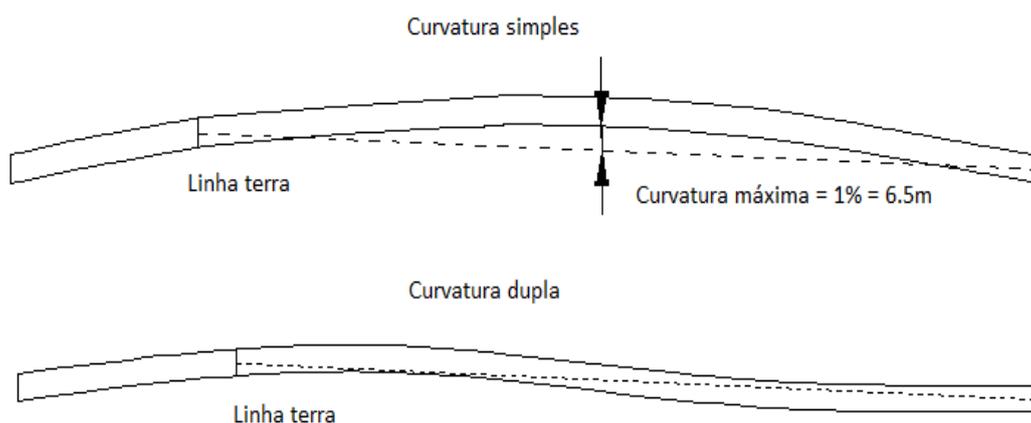


Figura 3.2 – Ilustração dos critérios de medição de curvatura de postes e respectivos limites máximos

Após seleccionados os 18 postes com base nos três parâmetros definidos para aceitação/rejeição foi conduzida a caracterização visual completa dos mesmos.

No que diz respeito ao diâmetro nominal, este é determinado com base na medição dos diâmetros mínimo e máximo e perímetro nas secções da linha terra (a 1,5m da base do poste) e na secção de aplicação da carga (a 150mm do topo do poste). Com base nestes valores é calculada a ovalidade da secção e se esta for superior a 5% o diâmetro nominal considerado corresponde ao diâmetro mínimo medido. Se a ovalidade for inferior a 5%, o diâmetro nominal consiste no diâmetro teórico, ou seja, obtido com base no perímetro medido na respectiva secção. A Figura 3.3 ilustra a distribuição de diâmetros nominais na linha terra, enquanto a Figura 3.4 diz respeito aos diâmetros nominais na aplicação de carga.

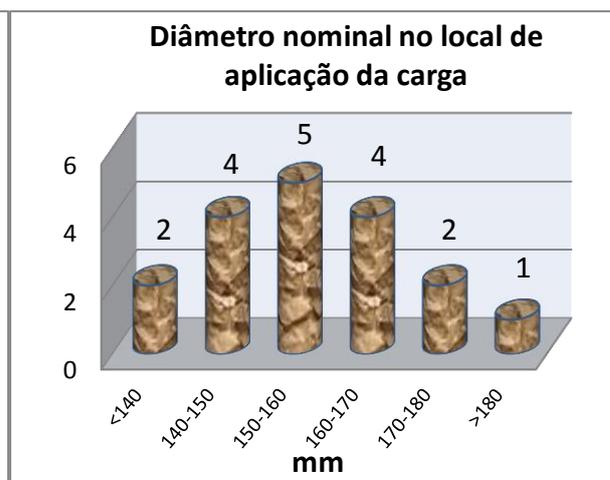
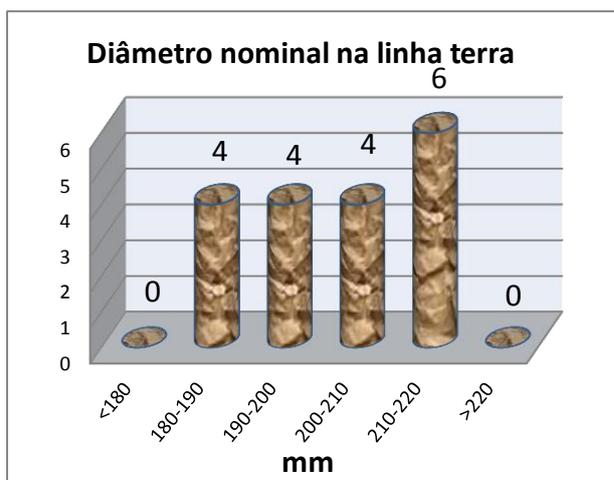


Figura 3.3 – Distribuição de frequências do diâmetro nominal na linha terra

Figura 3.4 – Distribuição de frequências do diâmetro nominal na aplicação da carga

Como se pode observar na Figura 3.4, todos os postes utilizados para os ensaios cumpriram os requisitos indicados na norma possuindo diâmetros nominais no intervalo 180mm a 220mm. O valor médio de diâmetro nominal observado na linha terra foi de 200.8mm e na secção de aplicação de carga foi de 156.9mm.

A ovalidade permite ter uma noção da assimetria da secção transversal de um poste. A ovalidade é determinada através da diferença entre o diâmetro máximo ( $d_{m\acute{a}x}$ ) e diâmetro mínimo ( $d_{m\acute{i}n}$ ) de uma secção transversal expresso em percentagem dividindo pelo diâmetro mínimo, como é ilustrado na Equação 1.

$$OVALIDADE (\%) = \frac{d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n}}{d_{m\acute{i}n}} * 100 \quad (1)$$

A média dos resultados da ovalidade da amostra resultou em 4.6% e 5.0% para a secção a 1.5m da base e para secção de aplicação da carga, respectivamente.

Com os valores médios dos diâmetros a 1.5m da base e no local da aplicação da carga, foi determinado o adelgaçamento do poste. Este parâmetro define-se como o estreitamento do poste entre a linha terra e o local de aplicação da carga e calcula-se pela diferença entre o diâmetro médio na linha terra e o diâmetro médio no local de aplicação da carga dividindo pela distância entre essas duas secções (Equação 2). O valor médio de adelgaçamento foi de 6.8mm/m.

$$\text{Adelgaçamento [mm/m]} = \frac{d_{méd,LT} - d_{méd,q}}{l_{LT-q}} \quad (2)$$

Outra característica visual que foi alvo de classificação foi a presença de nós pois é a característica que mais afecta a resistência da madeira, devido à interrupção/desvio das fibras que a sua ocorrência numa determinada secção do poste provoca (Wood Handbook, 1999). Para cada poste foi feito o levantamento das secções com presença de nós e de seguida em todas essas secções foram determinadas a localização relativamente à base, o perímetro e o diâmetro de cada nó isolado e conjunto de nós. Na Figura 3.5 é apresentado um histograma de frequências da média dos diâmetros dos nós isolados e/ou dos conjuntos de nós ocorridos em cada poste. O valor médio dos diâmetros médios foi de 25.2mm e dos diâmetros máximos foi de 47.4mm.

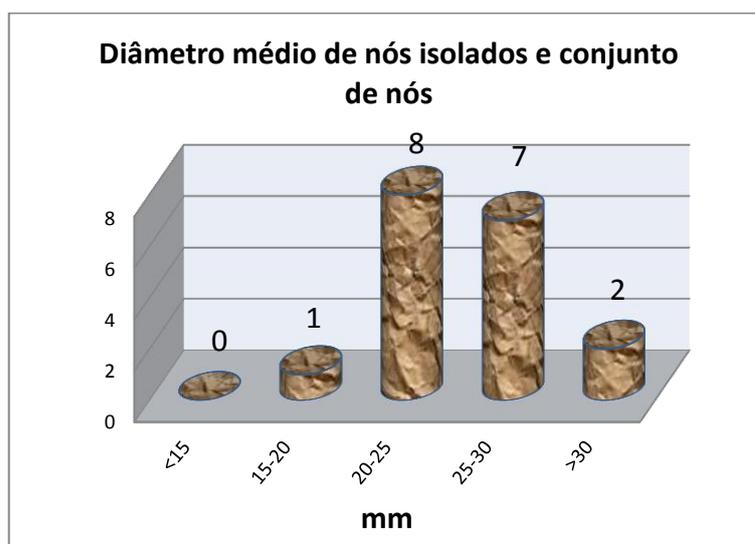


Figura 3.5 – Distribuição de frequências do diâmetro médio de nós isolados e conjunto de nós

Ainda relativamente aos nós, a norma EN 14229 (CEN, 2010) refere dois critérios de medição dos nós. O primeiro critério consiste na razão máxima entre o diâmetro do nó ou conjunto de nós e o perímetro da secção onde ocorre (Figura 3.6). Quanto ao segundo critério, é determinada a razão máxima entre o somatório de todos os diâmetros dos nós, ou conjunto de nós ocorridos em 300mm sobre o perímetro na secção média desse mesmo troço (Figura 3.7).

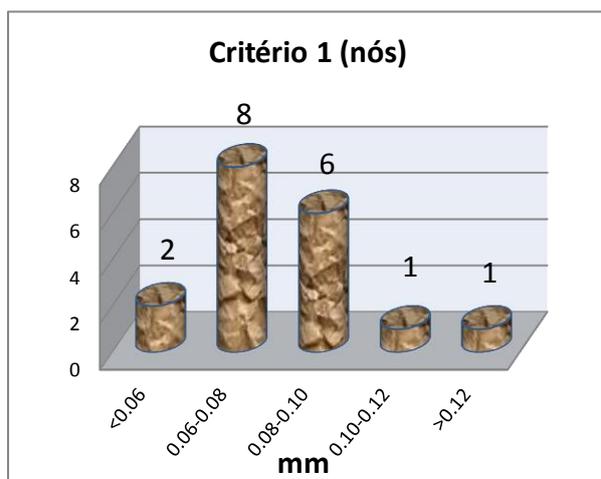


Figura 3.6 – Distribuição de frequências da máxima razão entre o diâmetro do nó e o perímetro

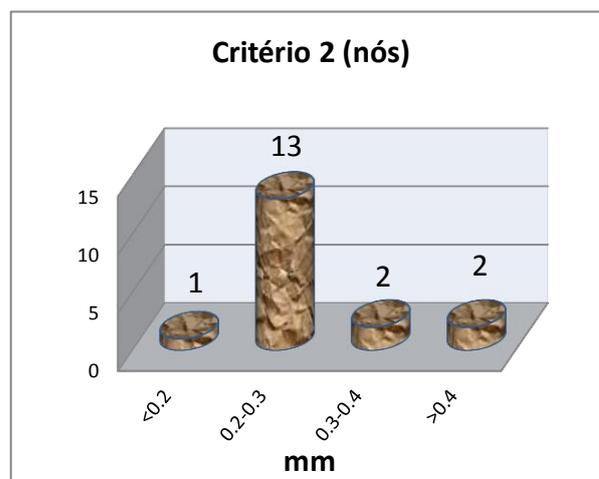


Figura 3.7 – Distribuição de frequências da máxima razão entre o somatório de diâmetros de nós e o perímetro

A curvatura de um poste é uma característica que depende das condições de crescimento do poste, pois é muito influenciada pela exposição ao vento e exposição solar. Como mencionado, este foi um dos aspectos a ter em conta para a aceitação/rejeição dos postes a serem estudados. Para cada poste da amostra foi anotado o tipo de curvatura, se simples ou dupla. Em todos os postes foi visível uma curvatura simples exceptuando em 4 postes que apresentaram uma curvatura dupla.

A taxa de crescimento é um parâmetro que indica o crescimento da árvore ao longo da sua existência e é na generalidade das situações avaliada pela largura dos anéis de crescimento. No entanto, segundo a norma de classificação considerada, a taxa de crescimento refere-se ao número de anéis de crescimento por 25 mm. A medição foi realizada na maior linha radial existente contando o número de anéis de crescimento tendo a contagem início após os primeiros 50mm medidos da medula para o exterior. Esta característica foi avaliada somente na base dos postes dado que estes se encontravam na maioria dos casos já cortados nos topos com a configuração final para aplicação em linha. O valor médio da taxa de crescimento foi de 12.9anéis/25mm. Esta característica pode ser avaliada também, pela largura média, em milímetros, dos anéis de crescimento, medido na maior linha radial possível, de traçar na base do poste. Para este caso o valor médio foi de 2.7mm.

A última característica visual a ser observada foi o declive das fibras ao longo do eixo longitudinal do poste. Este desvio pode ocorrer por diversas razões sendo o processo de

crescimento da árvore e a proximidade de nós os aspectos que mais influenciam. A norma indica que a medição do desvio das fibras deve ser feito num comprimento de um metro, contudo para simplificar a medição, esta foi realizada num comprimento de 10cm e posteriormente extrapolada para 1m. A medição desta característica foi realizada próximo dos 2m medidos a partir da base, tendo como fundamento, o facto de que em Martins (2010) se verificou que a rotura dos postes ocorreu próximo dessa distância. O valor médio da inclinação das fibras foi de 3.7cm/m.

De seguida é exibida uma tabela resumo apresentado valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões de todas as características visuais analisadas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Características visuais obtidas, segundo a norma EN 14229 (CEN, 2010)

Características Visuais	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
Diâmetro nominal na linha terra (LT) (mm)	200.8	218.0	181.8	11.5
Diâmetro nominal na aplicação da carga (mm)	156.9	186.5	135.9	14.1
Ovalidade na linha terra (LT) (%)	4.6	9.4	1.4	2.3
Ovalidade na aplicação da carga (%)	5.0	10.3	1.4	2.9
Adelgaçamento (mm/m)	6.8	9.5	4.2	1.7
Declive das fibras (cm/m)	3.7	8.6	1.3	2.4
Taxa de crescimento na base (nº de anéis/25mm)	12.9	15.8	8.3	2.3

Todos as outras características visuais referidas no início do capítulo tais como bolsa de resina, golpes, danos mecânicos, apodrecimento devido a insectos e fendas não foram detectados razão pela qual não são mencionados.

### 3.3. Classificação não destrutiva

A classificação não destrutiva tem sido aplicada em diversos estudos através de diversas metodologias evasivas quanto ao provete alvo de classificação. Neste estudo, pretende-se, com a utilização de diferentes métodos, determinar o módulo de elasticidade dinâmico e consequentemente aferir o potencial dos mesmos na predição das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade). Esse potencial é conferido através da análise dos coeficientes de correlação obtidos entre as propriedades em análise.

Existem diversas metodologias no domínio da classificação não destrutiva, sendo que no presente estudo foram consideradas duas metodologias: vibração (longitudinal e transversal) e

ultra-sons. Ao longo do presente subcapítulo são descritas estas metodologias, quer a nível da fundamentação teórica bem como do procedimento a ter em conta na realização dos ensaios. No último ponto deste subcapítulo é apresentado um ensaio não destrutivo de flexão simplificada para o cálculo do módulo de elasticidade estático. O esquema deste ensaio procura seguir o mais possível as indicações da norma EN 14229 (CEN, 2010), sendo que apresenta algumas simplificações.

São também apresentados os resultados obtidos na aplicação destes métodos nos 18 postes constituintes da amostra em estudo.

### 3.3.1. Análise por vibração

A análise por vibração baseia-se no conceito de que qualquer corpo tem uma frequência de vibração própria. No caso específico da madeira, essa frequência de vibração está relacionada com a massa e rigidez da peça, podendo recorrer-se a duas abordagens distintas: transversal e longitudinal. O desenvolvimento desta técnica não destrutiva tem como objectivo a classificação mecânica de elementos estruturais, contudo, devido aos bons resultados obtidos, a utilização desta técnica tem vindo a aumentar na avaliação de elementos estruturais *in situ*, como é exemplo, o estudo de Ledesma (2010) na monitorização da cobertura do pavilhão atlântico.

Para a vibração transversal, a equação de vibração livre, segundo Clough e Penzien (1993), é dada pela Equação 3:

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} * \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Em que EI é a rigidez à flexão,  $\bar{m}$  a massa do elemento por unidade de comprimento (L) e  $v(x,t)$  é a função do deslocamento transversal. Considerando o elemento com extremidades livres e propriedades constantes ao longo do seu comprimento, a Equação 3 pode ser trabalhada e simplificada de modo a chegar à Equação 4 que nos permite calcular o valor da frequência própria de vibração, para os vários modos de vibração.

$$f = \frac{n^2 * \pi}{2} * \sqrt{\frac{E_{dyn\_T} * I}{m * l_{tv}^3}}, n = 1,2,3 \dots \quad (4)$$

Considerando o primeiro modo de vibração, e colocando a Equação 4 em ordem ao módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal ( $E_{dyn\_T}$ ), obtemos a expressão seguinte:

$$E_{dyn\_T} = \frac{4 * f^2 * m * l_{tv}^3}{\pi^2 * I} [MPa] \quad (5)$$

Onde “ $l_{tv}$ ” representa a distância entre apoios do poste em metros, “ $f$ ” a frequência do 1º modo de vibração em Hertz, “ $m$ ” a massa do elemento em quilogramas e “ $I$ ” a inércia em  $m^4$ .

Após a medição das características geométricas de cada poste e do conhecimento da massa, foram realizados os ensaios com recurso a um acelerómetro piezoeléctrico (Figura 3.8) e ao equipamento *NI USB-4431 da National Instruments* (Figura 3.9) que permite a aquisição de dados relativos à aceleração ao longo do tempo.



Figura 3.8 – Acelerómetro piezoeléctrico  
(<http://www.bksv.com>)



Figura 3.9 – *NIUSB-4431 da National Instruments*  
(<http://sine.ni.com>)

Cada poste encontrava-se simplesmente apoiado sobre dois apoios, um em cada topo do poste. Esses apoios consistiam numa peça de madeira arredondada que por sua vez estava sobre uma peça metálica (Figura 3.10). O objectivo deste tipo de apoio foi conceder uma maior estabilidade ao poste durante o ensaio de vibração transversal e longitudinal. Após o poste estar estabilizado sobre os dois apoios, deu-se início ao ensaio promovendo-se um impacto transversal através de um martelo, a 4m da base do poste (Figura 3.11).



Figura 3.10 – Esquema de apoio na base do poste

Figura 3.11 – Esquema de ensaio de vibração transversal

Através da conexão do equipamento a um computador, e com recurso ao programa *LabView SignalExpress* da *National Instruments* é obtido o gráfico magnitude vs frequência, permitindo assim determinar a frequência própria de vibração do poste. Os valores do módulo de elasticidade dinâmico, da massa, da frequência e do vão entre apoios do ensaio de vibração transversal são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores da frequência, da massa, do vão ( $l_{tv}$ ) e do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dyn\_T}$ ) do ensaio de vibração transversal

Valor	Freq. (Hz)	Massa (kg)	$l_{tv}$ (m)	$E_{dyn\_T}$ (GPa)
Média	5.1	157.9	7.79	14.7
Máximo	5.9	199.3	7.89	19.2
Mínimo	4.2	124.8	7.65	11.5
Desvio Padrão	0.5	23.9	0.06	2.2

No caso de se tratar de um impacto longitudinal e considerando um elemento com propriedades constantes ao longo do seu eixo horizontal a equação de vibração livre associada com esforço axial pode ser determinada de uma forma semelhante para o caso de vibrações de flexão. A expressão seguinte (Equação 6) representa a equação livre do movimento de um elemento, sendo  $EA$  a rigidez axial,  $\bar{m}$  a massa do elemento por unidade de comprimento ( $L$ ) e  $u(x,t)$  é a função deslocamento longitudinal.

$$EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \bar{m} * \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Considerando um elemento simplesmente apoiado com extremidades livres a Equação (6) simplificada resulta numa relação entre o módulo de elasticidade dinâmico por vibração longitudinal e a frequência própria de vibração para os vários modos vibração (Equação 7).

$$f = \frac{n}{l * 2} * \sqrt{\frac{E_{dyn\_L} * l}{\rho}}, n = 1,2,3 \dots \quad (7)$$

Assim sendo a expressão que permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico por vibração longitudinal para o 1º modo de vibração é dada pela Equação 8:

$$E_{dyn\_L} = 4 * l^2 * f^2 * \rho [MPa] \quad (8)$$

Onde “l” representa o comprimento total do poste em metros, “f” a frequência do 1º modo de vibração em Hertz, e “ρ” a massa volúmica em quilogramas por metro cúbico.

Nesta técnica foi utilizada o mesmo procedimento de ensaio de vibração transversal à excepção do posicionamento do acelerómetro e do local de impacto do martelo. Neste caso, como se trata de um ensaio de vibração longitudinal o impacto foi efectuado no topo do poste na direcção longitudinal e na base do poste foi medido a frequência de vibração através do acelerómetro (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Posicionamento do acelerómetro no ensaio de vibração longitudinal

Na Tabela 3.3 são apresentados os parâmetros utilizados para calcular o módulo de elasticidade dinâmico por vibração longitudinal de acordo com a Equação 8.

Tabela 3.3 - Valores da frequência, do comprimento total do poste (l), da massa volúmica ( $\rho$ ) e do módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração longitudinal

Valor	Freq. (Hz)	l(m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>dyn_L</sub> (GPa)
Média	275.5	8.03	757.8	14.8
Máximo	302.3	8.09	913.0	17.1
Mínimo	235.4	7.98	621.0	12.4
Desvio Padrão	17.9	0.03	74.7	1.4

### 3.3.2. Análise por ultra-sons

Esta metodologia consiste na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, com base na velocidade de propagação de ondas acústicas e na massa volúmica da madeira.

Neste ensaio não destrutivo foi utilizado um aparelho portátil electrónico *Fakopp Microsecond Timer*, composto por um par transdutores, sendo um o emissor da onda e o outro o receptor da mesma. Através de um martelo de borracha os dois transdutores foram fixadas na superfície do poste em cinco situações diferentes: 1) 0-4m do poste; 2) 4-8m do poste; 3) 1-2m do poste; 4) 1-2.5m do poste e 5) 1-3m do poste.

Com recurso a um martelo apropriado, dá-se início ao ensaio com um impacto no transdutor emissor da onda e através do transdutor receptor é registado o tempo ( $\Delta t$ ) que a onda leva a percorrer a distância entre eles (Figura 3.13). Para cada situação foram registadas 3 leituras do tempo ( $\Delta t$ ) e no fim foi feita a média entre as mesmas.



Figura 3.13 – Esquema de ensaio de ultra-sons

Com a distância entre os dois transdutores na direcção longitudinal ( $l_{us}$ ) e do tempo que a onda demora a percorrer essa mesma distância ( $\Delta t$ ) determina-se a velocidade de propagação da onda ( $C$ ) através da Equação 9.

$$C = \frac{l_{us}}{\Delta t} [m/s] \quad (9)$$

O módulo de elasticidade dinâmico, segundo Morgado (2012), pode ser determinado através da Equação 10, conhecendo a velocidade de propagação da onda e a massa volúmica.

$$E_{dyn\_us} = \rho * C^2 [MPa] \quad (10)$$

Na Tabela 3.4 são apresentados os valores médios, máximos, mínimos e desvios padrão obtidos do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dyn\_us}$ ) e da velocidade de propagação da onda para as 5 situações diferentes de posicionamento dos transdutores adoptado no presente estudo.

Tabela 3.4 – Valores do  $E_{dyn\_us}$  e da velocidade da onda ( $C$ ) utilizando o ensaio de ultra-sons

Valor	1)		2)		3)		4)		5)	
	C (m/s)	$E_{dyn\_us}$ (GPa)								
<b>Média</b>	4489	15.2	4332	14.1	3977	12.0	4002	12.1	4067	12.5
<b>Máximo</b>	4884	18.5	4862	18.4	4489	16.4	4461	15.7	4338	14.4
<b>Mínimo</b>	4048	11.9	3900	10.7	3413	8.7	3482	8.3	3578	9.3
<b>Desvio Padrão</b>	253	1.7	301	1.8	289	2.0	318	2.0	223	1.3

### 3.3.3. Análise por via de carga estática

Nesta secção são descritos os ensaios preconizados numa máquina em desenvolvimento pela empresa promotora deste projecto. O objectivo dos ensaios executados nesta máquina é a obtenção de parâmetros técnicos passíveis de ser usados na classificação de postes de suporte de linhas aéreas.

Neste ensaio são aplicadas forças e medidos deslocamentos, tentando de alguma forma obter parâmetros de rigidez, módulos de elasticidade, próximos dos obtidos seguindo a EN 14229 (CEN, 2010).

A partir do declive da recta força vs deslocamento de cada poste, foi determinado o módulo de elasticidade. Na Tabela 3.5 é apresentado uma resenha dos valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões do módulo de elasticidade determinado através das 4 técnicas não destrutivas disponíveis neste estudo.

Tabela 3.5 – Apresentação dos valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade

Técnica	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
$E_{dyn\_T}$	14.7	18.4	11.5	2.1
$E_{dyn\_L}$	14.8	17.1	12.4	1.4
$E_{dyn\_us}$ 1)	15.2	18.5	11.9	1.7
$E_{dyn\_us}$ 2)	14.1	18.4	10.7	1.8
$E_{dyn\_us}$ 3)	12.0	16.4	8.7	2.0
$E_{dyn\_us}$ 4)	12.1	15.7	8.3	2.0
$E_{dyn\_us}$ 5)	12.5	14.4	9.3	1.3
E (flexão simplificada)	6.8	8.4	4.7	0.9

De referir que os valores médios apresentados pelas 3 técnicas dinâmicas são muito semelhantes, ao contrário do módulo de elasticidade obtido neste ensaio que se encontram aquém do que era esperado. Estes valores são muito baixos devido a anomalias presentes na máquina que entretanto estão a ser colmatadas. Ao que tudo indica, uma das anomalias mais preponderante para estes resultados é o nível de rigidez das torres, no qual está previsto a colocação de novos macacos hidráulicos de maneira a aumentar essa rigidez.

## 4 Ensaio de flexão de acordo com a EN 14229

### 4.1. Introdução

Neste capítulo, são descritos os ensaios de flexão dos postes em estudo, em particular do módulo de elasticidade, seguindo para tal os pressupostos da Norma Europeia EN 14229 (CEN, 2010), em específico no anexo C. Nos vários subcapítulos vão ser descritas todas as fases do ensaio tais como o esquema de montagem, o procedimento e ainda os resultados obtidos do módulo de elasticidade estático paralelo às fibras.

### 4.2. Esquema de ensaio

O ensaio de flexão realizou-se na empresa Pedrosa e Irmãos, LDA, por um equipamento desenvolvido pela própria empresa que foi utilizado no estudo Martins (2010) para o cálculo das propriedades de flexão do poste.

De acordo com a norma EN 14299 (CEN, 2010) o ensaio de flexão para postes de linhas aéreas consiste no encastramento do poste até 1.5m da base (simular o encastramento no solo) (Figura 4.1) e no aplicar de uma carga perpendicularmente ao eixo do poste a 150mm do topo (simular os cabos de transmissão do telefone) (Figura 4.2)



Figura 4.1 – Zona de encastramento



Figura 4.2 – Zona de aplicação da carga

Com uma máquina carregadora de rodas com garras os postes foram colocados um a um no dispositivo de ensaio e foram ajustados manualmente até que a posição de ensaio estivesse correcta. O poste deve ser colocado com a curvatura natural orientada para o local de aplicação da carga, ou seja, quando se dá início ao ensaio de flexão as fibras externas da secção junto ao encastramento devem estar à tracção. Esta orientação foi definida em aquando a caracterização visual, apontando uma seta na base do poste como também é ilustrado na Figura 4.1. O esquema de ensaio de flexão proposto pela norma EN14229 (CEN, 2010) é apresentado na Figura 4.3.

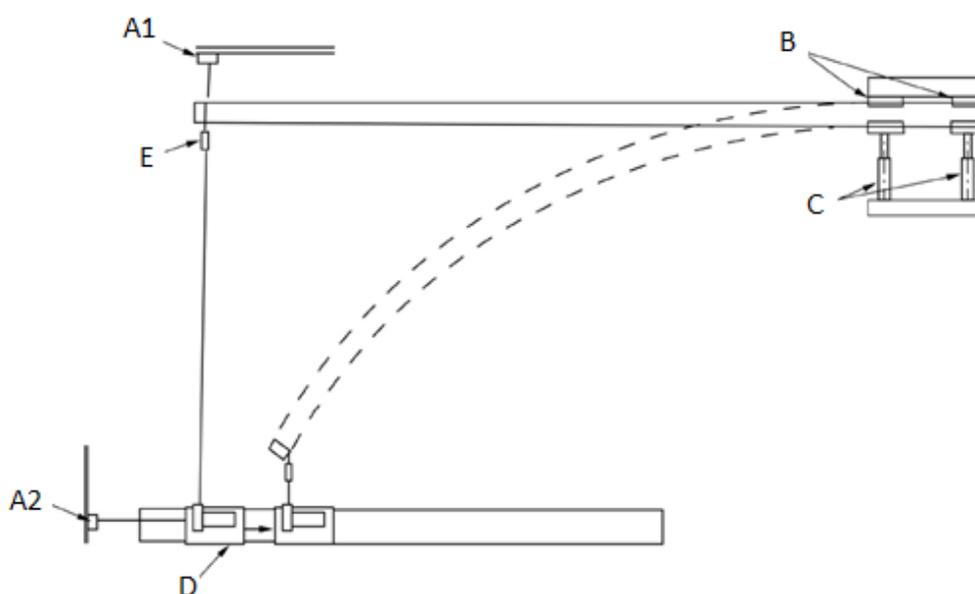


Figura 4.3 - Esquema de ensaio proposto pela EN 14229 (CEN, 2010)

No decorrer do ensaio foi feita a aquisição de dados para um computador portátil através do equipamento cDAQ-9174 da National Instruments com leituras de segundo a segundo. As medições cingiram-se a deslocamentos em duas direcções (perpendicular e paralela ao poste) e a uma força. O deslocamento de flexão (perpendicular ao poste) foi medido no ponto A1 (Figura 4.3) através de um transdutor de deslocamentos SDP200D da marca TML, com capacidade máxima de 200mm. O deslocamento paralelo ao poste foi medido no ponto A2

(Figura 4.3), com recurso a um transdutor de deslocamentos de fio, DP-1000E, da marca TML com capacidade máxima de 1000mm.

A força foi aplicada no ensaio através de um cabo de aço disposto na perpendicular ao poste e traccionado por um motor (Figura 4.4). A força foi medida através de uma célula de carga com capacidade máxima de 1000Kg da marca VETEK (Ponto E na Figura 4.3).



Figura 4.4 – Motor com um cabo de aço ligado a uma célula de carga

Tal como referido anteriormente, o encastramento do poste foi feito até 1.5m da base. Este foi conseguido com a utilização de dois pares de blocos de madeira com 50cm de comprimento espaçados entre si (ponto B da Figura 4.3). Estes foram apertados contra a base do poste por um par de macacos hidráulicos até o poste ficar sob alguma compressão nessa zona (ponto C da Figura 4.3).

### 4.3. Determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade da madeira é uma propriedade mecânica que condiciona a resistência à deformação em flexão de estruturas.

Para o cálculo do módulo de elasticidade estático foi utilizada a expressão C.1 do anexo C da norma EN14229 (CEN, 2010) transcrita para este documento pela Equação 11. No entanto foi

assumida uma simplificação resultante da utilização do método dos mínimos quadrados, considerando o declive obtido dos pares força vs deslocamento como ilustra a Equação 12.

$$E = \frac{Q \left( l - l_g - l_q - (s_a - s_0) \right)^3 * d_q^3}{3 * I_q (t_a - t_0) * d_g^3} \quad (11)$$

$$D = \frac{Q (l - l_g - l_q)^3}{(t_a - t_0)} \quad (12)$$

Segundo a mesma norma a carga deve ir até 30% da capacidade total do poste e deve ser alcançada nos primeiros 90 segundos, com uma margem de  $\pm 30$  segundos. Os resultados do ensaio devem permitir a aquisição de pelo menos 30 pares de leitura força vs deslocamento.

Na Figura 4.5 é ilustrado um gráfico tipo de força vs deslocamento, bem como a equação da recta de regressão linear que fornece o declive a considerar para o cálculo final do módulo de elasticidade.

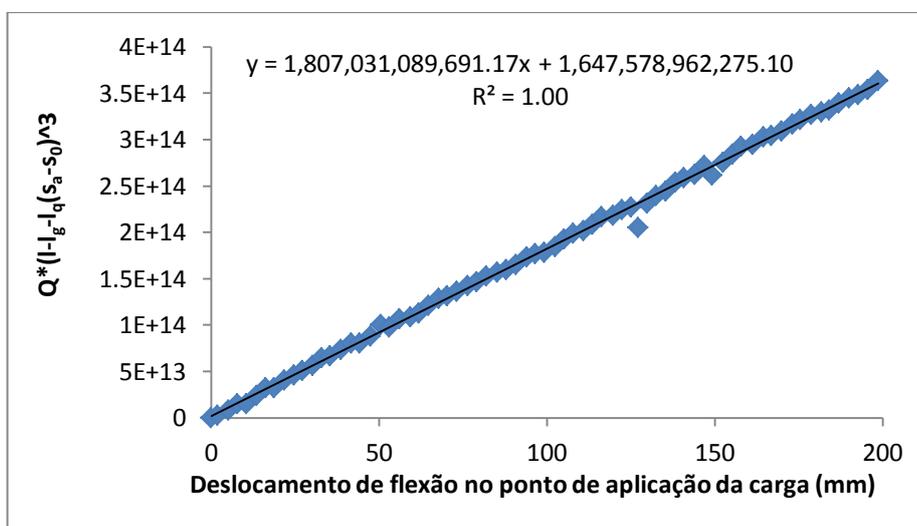


Figura 4.5 – Determinação do declive da recta força vs deslocamento

Após a determinação do declive da recta força vs deslocamento é calculado o módulo de elasticidade através da Equação 11, considerando a simplificação realizada com a determinação do declive mencionado. A distribuição de frequências do módulo de

elasticidade, da amostra em estudo, é apresentada na Figura 4.6. Neste caso, a média dos valores do módulo de elasticidade situa-se nos 10.6GPa.

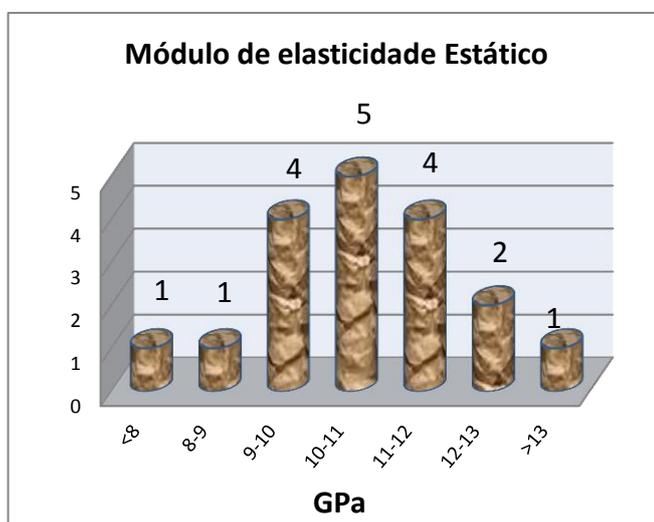


Figura 4.6 – Distribuição de frequências do módulo de elasticidade estático

#### 4.4. Teor de água

O teor de água, por definição, é a relação entre o peso de água e o peso seco de um dado material, apresentado em percentagem. Esta propriedade, de acordo com o Wood Handbook (USDA, 1999), tem grande influência no valor de quase todas as propriedades da madeira. Segundo a norma utilizada para o ensaio de flexão, o valor do teor de água nos postes deveria situar-se acima do ponto de saturação das fibras, que neste caso para o Pinheiro bravo se situa nos 24% (LNEC, 1997). Este parâmetro, segundo a norma, deveria ser medido após o ensaio destrutivo de flexão retirando uma rodela perto do local da rotura, porém visto que não se realizou o ensaio destrutivo optou-se por efectuar a medição do teor de água através do equipamento *Hydromette RTU 600* da marca GANN como ilustra a Figura 4.7.

A medição do teor de água foi realizada próxima dos 2m medidos a partir da base do poste, dado que, em Martins (2010) se verificou que a generalidade das roturas ocorreu próximo dessa distância. Deste modo, permite que se obtenha o teor de água numa zona próxima à qual seria medida em situação de ensaio de resistência à flexão do poste.



Figura 4.7 - Equipamento de medição do teor de água

Para cada poste foram feitas várias leituras do teor de água variando a profundidade de penetração das agulhas. Os resultados são apresentados Tabela 4.1. De referir que a negrito se encontram os valores obtidos abaixo do PSF do Pinheiro bravo, e como tal gera dúvidas que o teor de água do poste possa ainda se encontrar acima dos 24% caso a medição fosse feita em laboratório, pelo método de secagem em estufa. No entanto, para os postes 2, 5 e 9 parece ser claro que o seu teor de água é inferior a 24%.

Tabela 4.1 - Valores registados do teor de água a várias profundidades

	Leituras a várias profundidades					
<b>Poste 1</b>	<b>16.6</b>	<b>18.8</b>	<b>22.0</b>	26.8	31.5	
<b>Poste 2</b>	<b>14.9</b>	<b>17.3</b>	<b>19.1</b>	<b>20.7</b>	<b>22.8</b>	<b>23.1</b>
Poste 3	24.0	35.4	45.7	55.5	60.6	
Poste 4	24.4	31.7	36.0	40.0	43.0	46.0
<b>Poste 5</b>	<b>13.1</b>	<b>15.3</b>	<b>17.8</b>	<b>20.7</b>		
Poste 6	33.3	46.2	63.5	68.6	73.4	
Poste 7	47.1	56.4	64.1	66.5		
Poste 8	38.5	52.3	62.2	69.2		
<b>Poste 9</b>	<b>15.2</b>	<b>18.0</b>	<b>20.3</b>	24.3		
<b>Poste 10</b>	<b>15.4</b>	<b>18.5</b>	<b>22.4</b>	25.9	29.1	30.8
Poste 11	31.7	48.5	61.5	66.1	69.8	
Poste 12	43.0	68.5	73.4	75.1		
Poste 13	35.6	57.3	70.3			
<b>Poste 14</b>	<b>15.6</b>	24.5	35.5	42.3	46.3	48.2
Poste 15	35.6	49.2	54.7	64.0	72.5	

---

Poste 16	22.1	36.1	46.7	53.5	58.4
Poste 17	26.7	40.3	48.6	57.3	
<b>Poste 18</b>	<b>19.7</b>	29.8	38.4	44.6	47.7

---

#### 4.5. Massa Volúmica

A massa volúmica é uma das mais importantes propriedades da madeira. Esta é muitas vezes usada para estimar os valores de propriedades mecânicas da madeira com bastante fiabilidade, devido às boas correlações geralmente.

A massa volúmica de um corpo define-se pelo quociente entre a massa e o volume desse corpo. A massa, para cada poste, foi obtida no dispositivo utilizado no ensaio de flexão simplificada através das células de carga colocadas no dispositivo. O volume foi determinado de um modo aproximado, através dos diâmetros médios da secção da base e do topo do poste, e conseqüentemente, o adelgaçamento do poste. Com o adelgaçamento do poste é possível determinar o comprimento que este necessitaria para que o diâmetro fosse nulo. Subtraindo o volume do cone medido após o comprimento do poste ao volume total, obtém-se o volume aproximado do poste. O valor médio da massa volúmica para os 18 postes foi de  $757.8\text{Kg/m}^3$ .

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Neste capítulo, o objectivo é analisar os resultados obtidos ao longo do presente estudo. Analisando este estudo em comparação com estudos anteriores, pretende-se aumentar o conhecimento das propriedades da madeira de Pinheiro bravo.

Os objectivos da primeira e da segunda análise deste capítulo consistem em avaliar qualitativamente e quantitativamente as técnicas não destrutivas. Para a primeira análise utilizou-se um tratamento estatístico, correlacionando os resultados obtidos no subcapítulo 4.3 com os resultados obtidos no capítulo 3. Além disso as correlações obtidas nos estudos apresentados no capítulo 2 também vão ser alvo de discussão. Para a segunda análise foi tido em conta três parâmetros fundamentais para a escolha de uma técnica relativamente a outra: 1) custo do equipamento a ser utilizado para cada técnica, 2) rapidez de execução de um ensaio e 3) número de pessoas necessárias para a realização do ensaio.

Para o terceiro e último ponto foi feito um enquadramento do módulo de elasticidade estático de postes da espécie em estudo, relativamente a outras espécies. Para esse enquadramento foram utilizados os estudos sobre postes e o estudo sobre toros da espécie Pinheiro bravo apresentados na revisão bibliográfica.

### 5.2. Análise quantitativa das técnicas não destrutivas

Neste subcapítulo foi feita uma comparação quantitativa entre as técnicas não destrutivas em comparação com o módulo de elasticidade estático obtido segundo o esquema de ensaio da EN 14229 (CEN, 2010). Para isso utilizaram-se correlações lineares simples entre propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas do material. Os estudos apresentados na revisão bibliográfica, que abarquem este tipo de análise, são igualmente utilizados na análise.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as correlações obtidas entre o módulo de elasticidade estático e as propriedades físicas obtidas na classificação visual dos postes (ponto 3.2 do presente estudo).

Tabela 5.1 – Coeficientes de correlação entre características visuais e o módulo de elasticidade estático

	Características visuais		
Taxa de crescimento	0.20	Massa volúmica	-0.43
Inclinação das fibras	-0.69	Adelgaçamento	-0.41
D <sub>méd</sub> do nó	-0.04	Diâmetro nominal LT	-0.20
D <sub>máx</sub> do nó	-0.09	Diâmetro nominal Q	0.24
D <sub>mín</sub> do nó	-0.07	Ovalidade LT	0.52
Critério 1 (nós)	-0.25	Ovalidade Q	0.27
Critério 2 (nós)	-0.12		

Analisando a tabela anterior, verifica-se que a inclinação das fibras ( $R=-0.69$ ) e a ovalidade na linha terra ( $R=0.52$ ) são os parâmetros que apresentam uma melhor correlação com o módulo de elasticidade estático. A par destes encontram-se a massa volúmica ( $R=-0.43$ ) e o adelgaçamento ( $R=-0.41$ ) apresentando também uma correlação bastante significativa. Relativamente a outros estudos, Martins (2010) e Vries e Gard (1998) obtiveram a massa volúmica ( $R=0.58$  e  $R=0.66$ , respectivamente) como a melhor propriedade a correlacionar. No entanto, no estudo de Martins (2010) a inclinação das fibras ( $R=-0.10$ ) e a ovalidade na linha terra ( $R=0.18$ ) apresentam valores bastante mais baixos que os obtidos neste estudo.

O diâmetro médio do nó, o diâmetro máximo do nó e o diâmetro mínimo do nó apresentam valores de correlação muito baixos, não sendo viáveis para estimar o módulo de elasticidade estático através de correlações. Em comparação com o estudo de Martins (2010), os dois primeiros parâmetros apresentam correlações muito superiores ( $R=-0.39$  e  $R=-0.37$ , respectivamente). Na espécie Larch, Vries e Gard (1998), obtiveram para o diâmetro médio do nó ( $R=-0.56$ ) a melhor correlação possível das propriedades físicas.

Todas as outras propriedades apresentaram correlações um pouco superiores às apresentadas anteriormente ( $R$  entre  $-0.12$  e  $0.27$ ), contudo não são recomendáveis para a previsão do módulo de elasticidade estático. Martins (2010) considerou o diâmetro nominal na linha terra ( $R=-0.48$ ) uma correlação não desprezável para estimar o módulo de elasticidade estático, o que não se veio a concluir neste estudo ( $R=-0.20$ ).

No que diz respeito aos ensaios dinâmicos, com os resultados dos ensaios de vibração (transversal e longitudinal) e de ultra-sons e por outro lado o ensaio estático de flexão

simplificada também foram estabelecidas correlações com o módulo de elasticidade estático obtidos segundo o esquema de ensaio da EN 14229 (CEN, 2010). Na Tabela 5.2 são apresentadas as correlações obtidas.

Tabela 5.2 – Correlação entre ensaios dinâmicos e o módulo de elasticidade estático

Ensaio dinâmico	R
Vibração transversal	0.45
Vibração longitudinal	0.54
Ultra-sons 0-4m	0.11
Ultra-sons 4-8m	0.25
Ultra-sons 1-2m	0.16
Ultra-sons 1-2.5m	0.18
Ultra-sons 1-3m	0.11
Flexão simplificada	0.80

Procedendo à análise das correlações estabelecidas na Tabela 5.2, verifica-se que o ensaio de ultra-sons não apresenta correlações significativas como módulo de elasticidade estático. Pelo contrário, Morgado (2012) para o ensaio de ultra-sons obteve correlações na amostra da zona centro ( $R=0.82$ ) e na amostra da zona norte ( $R=0.62$ ) muito superiores. A razão para estas diferenças entre correlações pode dever-se à geometria dos elementos (diâmetros e comprimentos inferiores aos postes). Outra razão possível para as diferenças obtidas pode ser justificada, pelo facto de o equipamento utilizado na análise de toros permitir a análise completa do elemento, enquanto no presente estudo se teve de proceder a uma análise por troços limitada pelo comprimento dos cabos do equipamento.

No que diz respeito às técnicas de vibração apresentaram uma melhor correlação com o módulo de elasticidade estático em comparação com as de ultra-sons. As correlações obtidas para as técnicas de vibração são semelhantes, embora a de vibração longitudinal ( $R=0.54$ ) tenha sido superior ao de vibração transversal ( $R=0.45$ ). Para o ensaio de vibração longitudinal, mas utilizando o MTG, Morgado (2012) obteve um valor superior ( $R=0.82$  para amostra da zona centro e  $R=0.61$  para a amostra da zona norte) que ainda assim foi superado por Vries e Gard (1998) quer para a espécie Larch ( $R=0.85$ ) quer para a espécie Douglas ( $R=0.87$ ) utilizando o equipamento *GrindoSonic MK5 "industrial"*. Quanto ao ensaio de vibração transversal, Wang X. *et al.* (2001) obteve o dobro da correlação obtida no presente estudo ( $R=0.92$  para *Pinus banksiana*  $R=0.97$  para *Pinus resinosa*).

Por fim, o ensaio que melhor permite estimar o módulo de elasticidade estático é o ensaio de flexão simplificada ( $R=0.80$ ). Embora os valores do módulo de elasticidade estático obtidos segundo o esquema de ensaio da EN 14229 (CEN, 2010) sejam significativamente superiores aos obtidos por flexão simplificada, a melhor correlação foi obtida neste ensaio. Esta melhor correlação pode ser justificada pelo facto de que ambas as metodologias resultam de introdução de esforços mecânicos em fase elástica linear.

### **5.3. Análise qualitativa das técnicas não destrutivas**

No presente estudo, foram aplicados 5 métodos de avaliação não destrutiva para postes circulares da espécie Pinheiro bravo. Como o próprio nome indica, a utilização de qualquer um destes métodos não afecta a integridade do elemento para um uso futuro.

O primeiro método baseou-se numa caracterização visual dos postes com o objectivo de determinar várias propriedades físicas. Existem normas onde são dadas as indicações sobre requisitos a verificar no processo de classificação (EN 14229 (CEN, 2010)). Esta classificação é relativamente simples de aplicar, mas demorada e requer a utilização de algum equipamento específico (ex: paquímetro, fita métrica, etc.). Embora não permita determinar propriedades mecânicas para utilização estrutural, é importante uma vez que algumas das propriedades determinadas apresentam boas correlações com as primeiras.

Nos restantes quatro métodos utilizados a avaliação baseou-se na determinação do módulo de elasticidade dinâmico ou estático. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado com base em três tipos de ensaio: 1) ensaio de vibração longitudinal, 2) ensaio de vibração transversal, 3) ensaio de ultra-sons. O módulo de elasticidade estático foi determinado através de um ensaio de flexão simplificado.

Nos ensaios de vibração, quer transversal quer longitudinal, foi necessária a utilização do equipamento *NI USB-4431 da National Instruments* e um acelerómetro piezoeléctrico para a medição das acelerações e a posterior obtenção da frequência própria de vibração a partir destas. Este é um ensaio de fácil e rápida execução e de médio custo, embora necessite de 2 pessoas para realizá-lo. No caso de ensaios de ultra-sons, o equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi o *Fakopp Microsecond Timer* (médio custo). À semelhança do ensaio de vibração, este é de fácil e rápida execução necessitando de 2 pessoas qualificadas para realizar o ensaio.

Por último, o ensaio de flexão para o cálculo do módulo de elasticidade estático, é mais dispendioso do que os ensaios referidos anteriormente. Para este ensaio foi utilizado um mecanismo hidráulico, que necessita de pelo menos 2 pessoas especializadas. O custo deste método é bastante superior aos anteriores, dado o custo de fabricação do mecanismo de ensaio, processo de automatização do mesmo e da necessidade de equipamentos para aquisição de dados. Para além destes custos acresce a necessidade de uma máquina e consequente operador que coloque o poste no mecanismo de ensaio.

Na Tabela 5.3 é apresentada um resumo de uma avaliação qualitativa das 5 técnicas não destrutivas utilizadas neste estudo.

Tabela 5.3 – Comparação qualitativamente das 5 técnicas não destrutivas

Tipo de técnica	Rapidez	Nº de pessoas	Custo
Classificação visual	Baixa	1	Baixo
Vibração transversal	Elevada	2	Médio
Vibração longitudinal	Elevada	2	Médio
Ultra-sons	Elevada	2	Médio
Flexão simplificada	Média	2 ou mais	Elevado

#### **5.4. Comparação do módulo de elasticidade estático entre madeira circular de pinho bravo e outras espécies**

Neste subcapítulo pretende-se fazer um enquadramento da espécie Pinho bravo, em postes, por comparação, com outras espécies. Na Figura 5.1 são apresentados os valores médios dos módulos de elasticidade estático obtido no presente estudo (ensaio de flexão de acordo com a norma EN14229) e os obtidos nos diversos estudos, referentes a postes, apresentados na revisão bibliográfica. Tang et al (2006), mencionado no estudo de Martins (2010), realizou uma investigação para a obtenção das propriedades mecânicas das 3 espécies mais utilizadas em postes de linhas aéreas nos Estados Unidos da América, às quais também são alvo de comparação. As espécies em estudo foram o Southern pine, o Douglas fir e o Western redcedar, sendo que a primeira engloba outras 4 espécies (Loblolly pine, Longleaf pine, shortleaf pine e Slash pine).

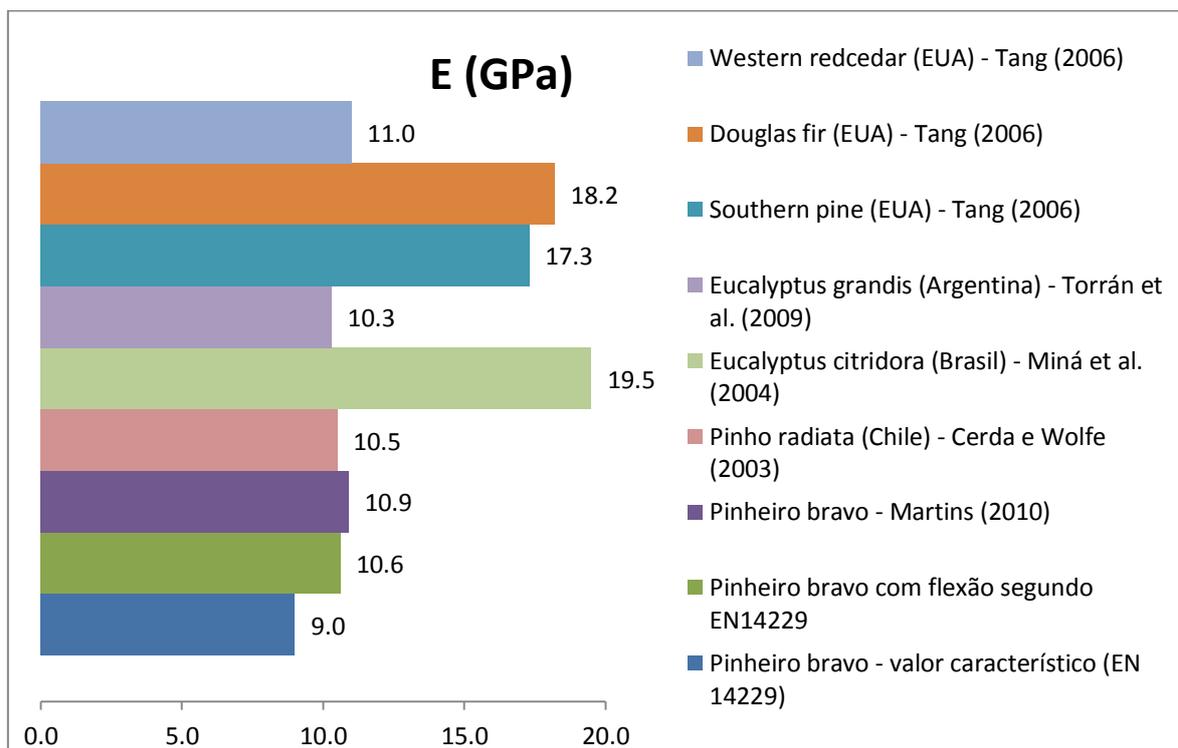


Figura 5.1 – Comparação de módulos de elasticidade de postes circulares para aplicação em postes de linhas aéreas

Os resultados dos módulos de elasticidade relativos a postes são muito semelhantes em todas as espécies, à exceção das espécies *Eucalyptus citriodora*, Douglas fir e Southern pine, que apresentam um valor superior na ordem dos 45%. Para o estudo de Miná, A. J. S. *et al.* (2004), sobre a espécie *Eucalyptus citriodora*, a justificação para esta diferença pode dever-se ao esquema de ensaio utilizado, visto que utilizaram um sistema bi-apoiado com carga no centro de vão. Como era de esperar o valor do módulo de elasticidade apresentado por Martins (2010) é bastante próximo, visto que foi utilizado o mesmo dispositivo de ensaio para ambos os estudos.

Sucedendo à comparação entre postes, na Figura 5.2 são apresentados os módulos de elasticidade estáticos obtidos no presente estudo, e os módulos de elasticidade obtidos nos estudos de Morgado (2012) e Morgado *et al.* (2010), referentes a toros.

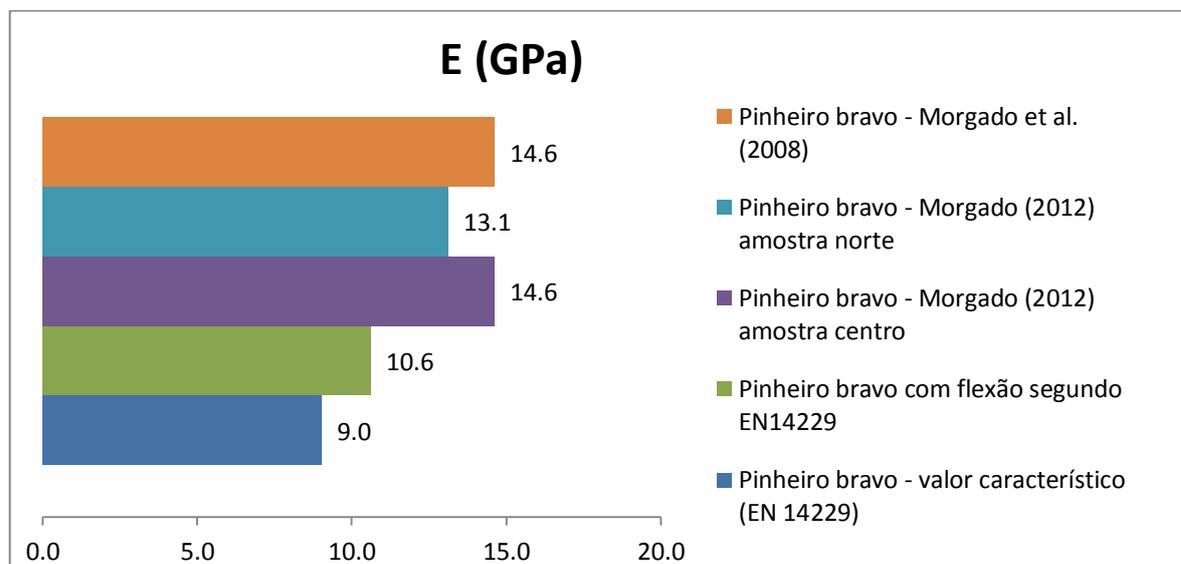


Figura 5.2 – Comparação de módulos de elasticidade obtidos em postes com os obtidos em toros para a espécie Pinheiro bravo

Por outro lado, quando se compara os postes e toros na espécie Pinheiro bravo, os valores são superiores nos toros. Uma das razões para esta diferença substancial é que o tipo de ensaio utilizado nos toros é diferente (ensaio de carga denominado de *four point bending test*), com carga aplicada no terço central do vão. Além disso, os teores de água na situação de ensaio nos toros, são mais baixos (cerca de 12%), e de acordo com o Wood Handbook (USDA, 1999) as propriedades mecânicas aumentam com o decréscimo do teor de água. Em espécies semelhantes ao Pinheiro bravo, como é o caso de ponderosa pine, o Wood Handbook (USDA) apresenta uma variação na ordem dos 0.77, entre o módulo de elasticidade estático para elementos verdes e elementos com 12% de teor de água. Para o caso do Pinheiro bravo, a variação apresentada, entre a amostra deste estudo e a amostra da zona centro do estudo de Morgado (2012), é de 0.73.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu em ampliar o conhecimento das propriedades mecânicas de postes de madeira de Pinheiro bravo e de aferir o potencial dos métodos não destrutivos para estimar essas mesmas propriedades mecânicas. No âmbito destes objectivos foram realizados ensaios e obtidos resultados. Estes foram comparados com os estudos apresentados na revisão bibliográfica. Para isso, foi realizado uma classificação visual (segundo os pressupostos da norma EN 14229), seguida de ensaios dinâmicos e de flexão (esquema de ensaio proposto pela mesma norma) para a determinação das propriedades do material.

Dos resultados obtidos para os módulos de elasticidade dinâmicos foram sempre superiores aos obtidos para os módulos de elasticidade estáticos. Os valores médios para os ensaios dinâmicos foram 14.7GPa, 14.8GPa e 13.2GPa para o ensaio de vibração transversal, vibração longitudinal e ultra-sons, respectivamente. Para os ensaios estáticos registaram-se valores de 6.8GPa para o ensaio de flexão simplificada e de 10.6GPa para o método definido na EN14229. Este último está dentro do esperado, pois é semelhante a outros obtidos em condições semelhantes para a mesma espécie de madeira.

Ainda no que diz respeito ao ensaio estático que segue os pressupostos da EN 14229, os valores obtidos são bastante credíveis quando comparados com os valores característicos apresentados pela mesma norma ( $E=9\text{GPa}$ ), no entanto este tipo de ensaio acarreta um custo elevado em comparação com as outras técnicas. Assim, com a utilização das técnicas não destrutivas (classificação visual e ensaio dinâmicos) pretendeu-se avaliar a possibilidade, de avaliar o módulo de elasticidade estático a partir destes. Estas técnicas são mais vantajosas em comparação com as de flexão pois a nível de equipamentos, de tempo e de poupança em material são mais económicos que as técnicas destrutivas.

Da classificação visual, resultaram boas correlações entre o módulo de elasticidade estático e a inclinação das fibras ( $R=-0.69$ ), a ovalidade na linha terra ( $R=0.52$ ), a massa volúmica ( $R=-0.43$ ) e o adelgaçamento ( $R=-0.41$ ). Esta é uma técnica pouco dispendiosa, pois necessita de equipamento de baixo custo e de 1 pessoa especializada, no entanto requer algum tempo para a sua realização.

Além das propriedades físicas o módulo de elasticidade estático também apresenta boas correlações com propriedades dinâmicas. No que diz respeito às técnicas de vibração, a correlação do ensaio de vibração longitudinal ( $R=0.54$ ) foi superior ao do ensaio de vibração transversal ( $R=0.45$ ). Quanto ao ensaio de ultra-sons, nas cinco situações estudadas, a correlação ficou um pouco abaixo do que era esperado tendo por base a comparação com os resultados obtidos nos estudos anteriores realizados em toros. A melhor correlação obtida foi no equipamento de ensaio à flexão simplificada, desenvolvido pela empresa, com um valor de 0.80.

Por fim foi efectuado um enquadramento da espécie Pinheiro bravo com outras espécies, apresentadas em estudos anteriores. Essa comparação foi feita tanto para postes como para toros. Em relação aos estudos apresentados, sobre postes, em que as condições de ensaio foram semelhantes ao deste estudo, o módulo de elasticidade para espécie Pinheiro bravo é semelhante às outras espécies, à excepção da espécie *Eucalyptus citriodora*, o Douglas fir e Southern pine que apresentam valores superiores na ordem dos 45%. Na comparação entre postes e toros, utilizou-se unicamente estudos da espécie Pinheiro bravo. Os resultados do módulo de elasticidade apresentados pelos postes foram mais baixos em comparação com os toros. Isto acontece devido às diferenças entre os esquemas de ensaios e os teores de água no momento de ensaio, que segundo o Wood Handbook (USDA, 1999) quando o teor de água é superior, existe um decréscimo nas propriedades mecânicas.

## 6.1. Trabalho Futuro

Visto que os estudos sobre a madeira da espécie Pinheiro bravo, para aplicação de postes de linhas aéreas, ainda está pouco desenvolvida é aconselhável a continuação destes estudos para um melhor conhecimento das suas propriedades mecânicas. Em Portugal, os postes para suporte de linhas aéreas são essencialmente desta espécie, no entanto se fossem conhecidas outras propriedades de outros materiais, poderiam ser implantados outro tipo de postes.

Existem inúmeras técnicas não destrutivas como a perfuração, a análise de imagem, vibração, ultra-sons, etc. que podem ser testadas em postes de modo a aferir quais as propriedades/técnicas mais eficazes na predição das propriedades mecânicas dos postes. Algumas dessas técnicas também podem ser executadas para postes em serviço onde permitem avaliar o estado de conservação do poste ao longo dos anos.

No presente estudo, as únicas correlações obtidas foram entre as técnicas não destrutivas e o módulo de elasticidade estático. Sendo a resistência à flexão uma das propriedades mais

importes na selecção de postes. Deste modo, seria relevante avaliar as correlações estabelecidas entre a resistência à flexão e as várias propriedades medidas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (1998). "Standard Test Methods of Static Test Wood Poles". D 1036-98, American Society for Testing and Materials, USA.
- Cerda, G. e R. W. Wolfe (2003). "Bending strength of Chilean radiate pine poles". Forest Products Journal, Vol.53, N°4, pp. 61-65.
- CEN (2003). "Structural round timber – Test methods." EN14251. Comité Européen de normalization.
- CEN (2010). "Structural timber – Wood poles for overhead lines". EN 14229, Comité Européen de Normalization.
- Clough, R. W. e Penzien, J.(1993), "Dynamics of structures," McGraw - Hill International Editions.
- Ledesma, M. F. (2010). "Modelação e monitorização do comportamento dinâmico da cobertura do Pavilhão Atlântico". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- LNEC (1997). "Madeira para construção – Pinho bravo para estruturas". M2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Martins, C. E. d. J. (2010). "Seleção e caracterização de madeira de secção circular para postes de linhas aéreas". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martins, C. E. d. J. e A. M. P. G. Dias (2012). "Bending Strength and Stiffness of Portuguese Maritime Pine Utility Poles". Forest Products Journal, Vol.62, N°2, pp. 114-120.

- Miná, A. J. S., F. G. R. d. Oliveira, et al. (2004). "Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som - Nondestructive evaluation of logs using ultrasonic technique." *SCIENTIA FLORESTALIS*, N° 65, pp. 188-196.
- Morgado, T. F. M. (2012). "Classificação e Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Morgado, T. F. M. et al. (2008). "Grading and testing of Maritime pine and larch roundwood". Conference COST E53, 29-30 October 2008, Delft, The Netherlands.
- Negrão, J. H. (2011). "Estruturas de madeira em Portugal - Presente e passado recente". In *Proceedings of CIMAD11 - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção*, Coimbra, Portugal.
- Prieto, E. H., J. I. F.-G. Seco, et al. (2007). "Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro." *Informes de la Construcción*, Vol. 59, N°506, pp. 87-95.
- Tang R. C. et al. (2006). "Effects of juvenile-mature wood ratio on the bending performance of Southern pine poles: I. Analytic Analysis". 60th International Convention of FPS. Newport Beach, California, USA.
- Torrán E. A. et al. (2009). "Bending strength and Stiffness of Poles of Argentinean *Eucalyptus grandis*". *Maderas, Ciencia y Tecnología*, Vol.11, N°1, pp. 71-84.
- USDA Forest Service. Forest Products Laboratory (USDA). 2010. *Wood Handbook: "Wood as an Engineering Material"*. Forest Prod. Soc., Madison, WI, USA.
- Vries, d. P. A. e W. Gard (1998). "The development of a strength grading system for small diameter roundwood." *Heron*, Vol.43, N°4, pp 183-197.
- Wang, X., R. J. Ross, et al. (2001). "Several Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small-Diameter Logs." Research paper FPL-RP-600. USDA Forest Service.
-

## ANEXO A – CORRELAÇÕES

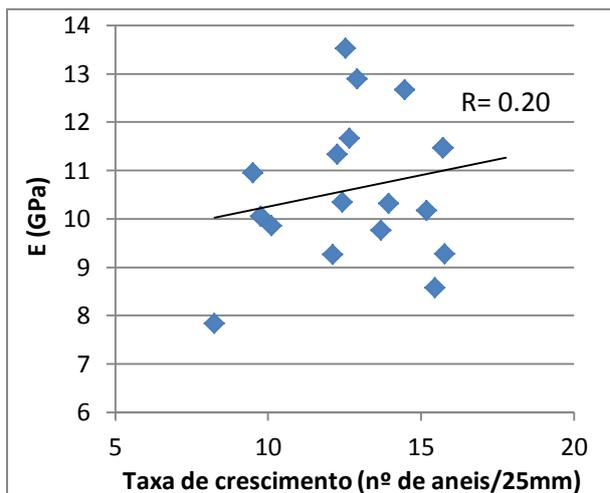


Figura A.1 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a taxa de crescimento

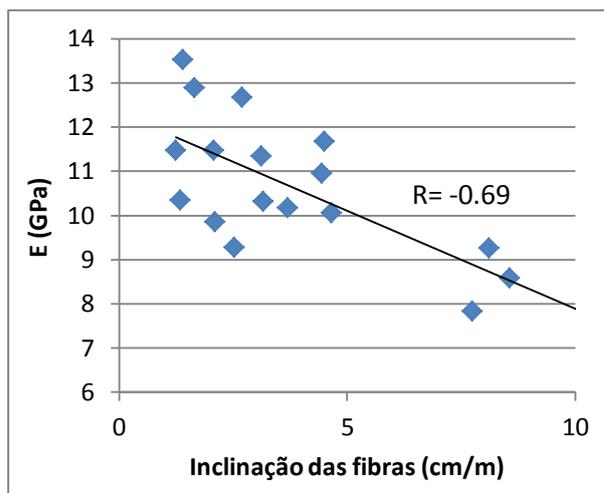


Figura A.2 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a inclinação das fibras

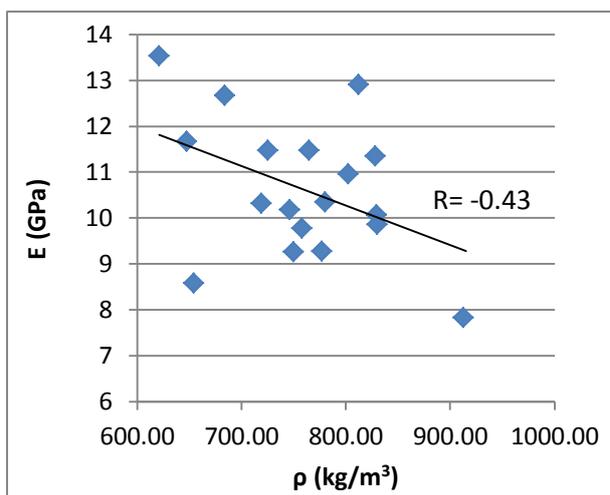


Figura A.3 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a massa volúmica

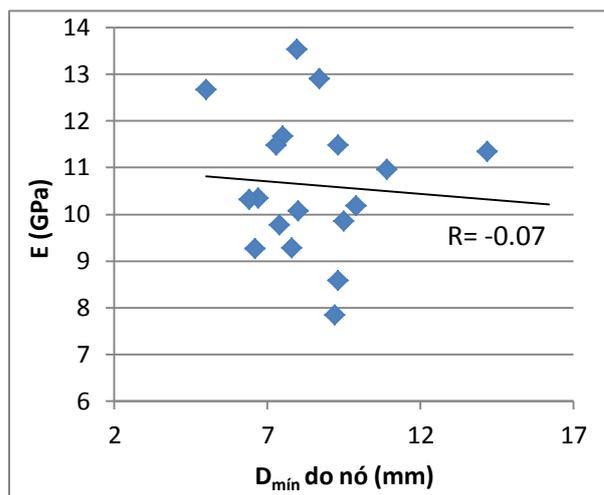


Figura A.4 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro mínimo do nó

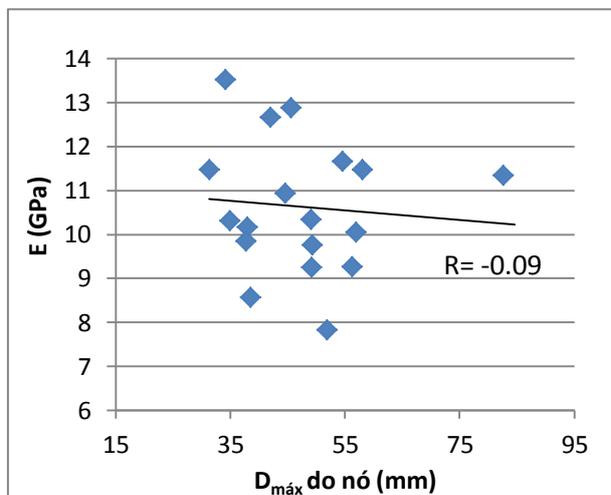


Figura A.5 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro máximo do nó

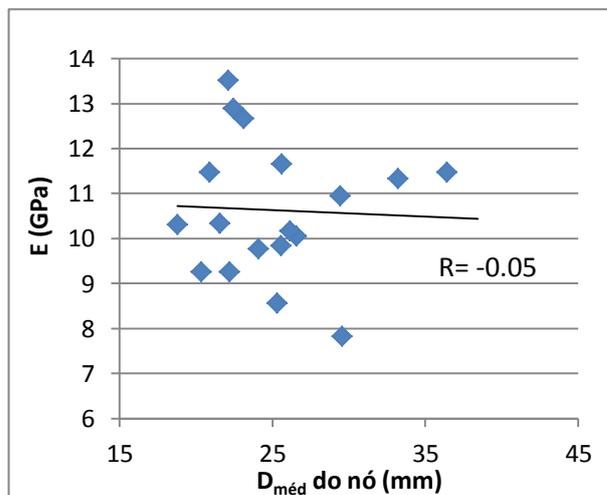


Figura A.6 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro médio do nó

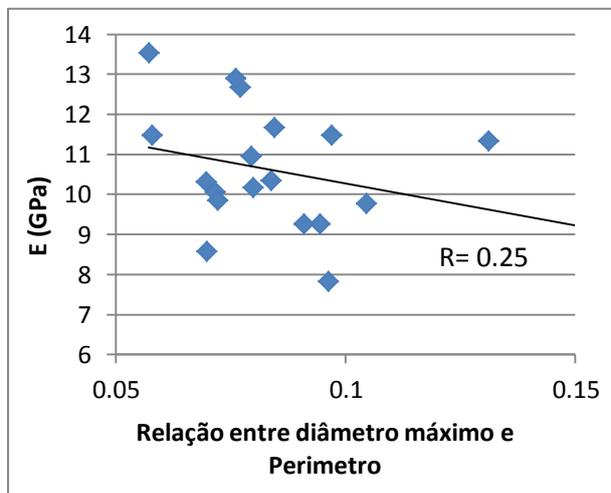


Figura A.7 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a relação entre o diâmetro máximo e o perímetro

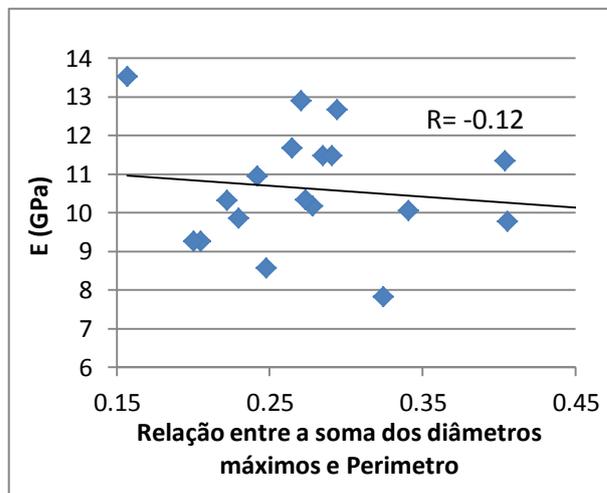


Figura A.8 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a relação entre a soma dos diâmetros máximos e o perímetro

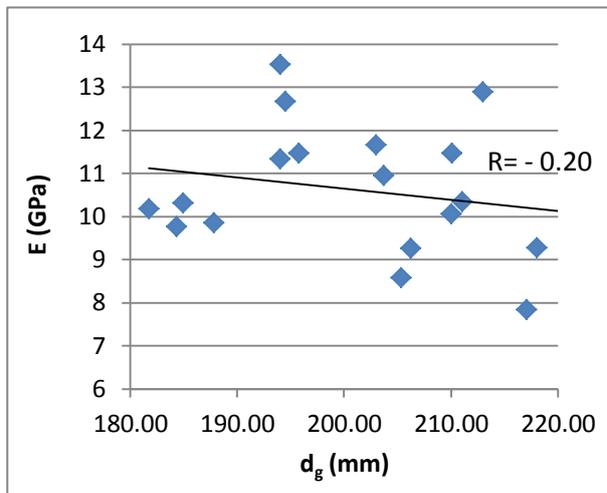


Figura A.9 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro nominal na linha terra

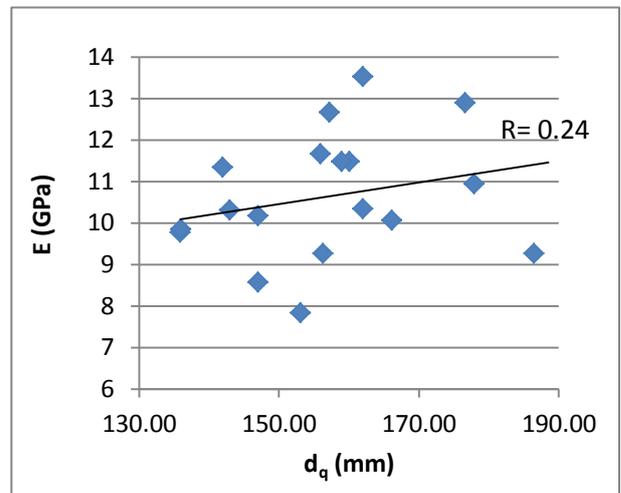


Figura A.10 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o diâmetro nominal no local de aplicação da carga

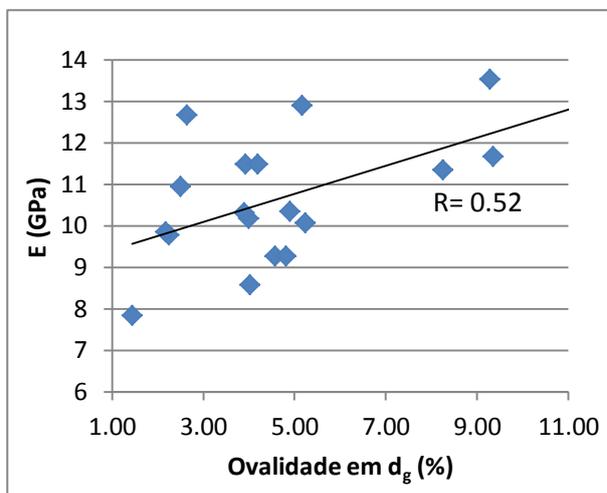


Figura A.11 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a ovalidade na linha terra

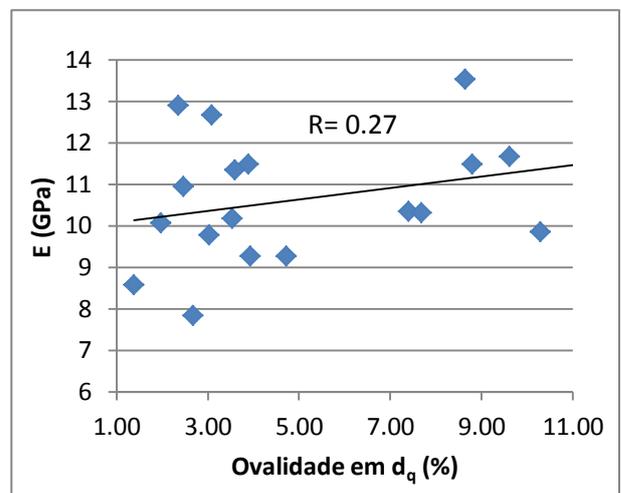


Figura A.12 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a ovalidade no local de aplicação da carga

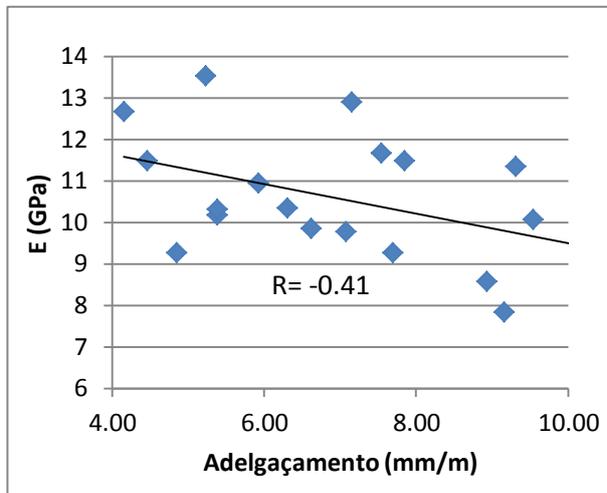


Figura A.13 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o adelgaçamento

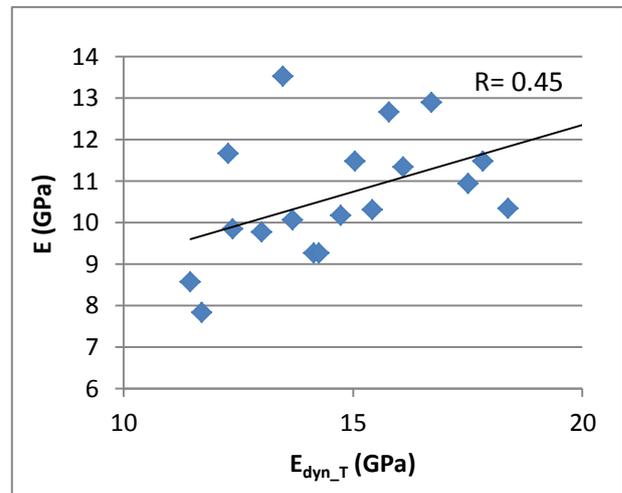


Figura A.14 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração transversal

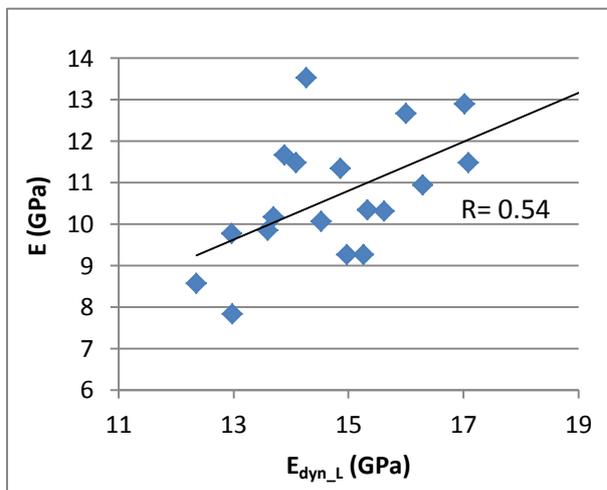


Figura A.15 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio de vibração longitudinal

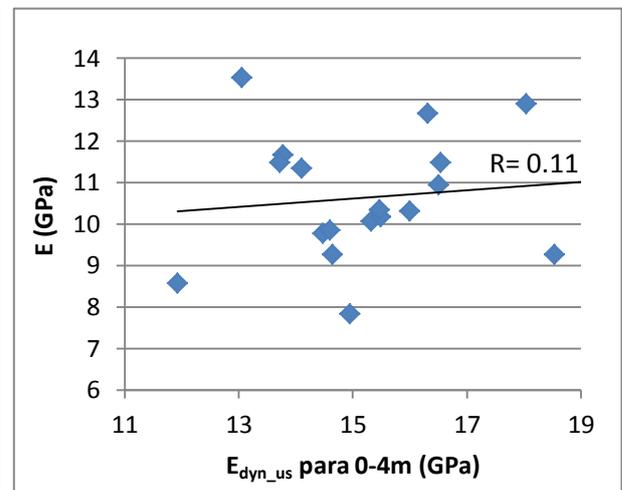


Figura A.16 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 0m e 4m

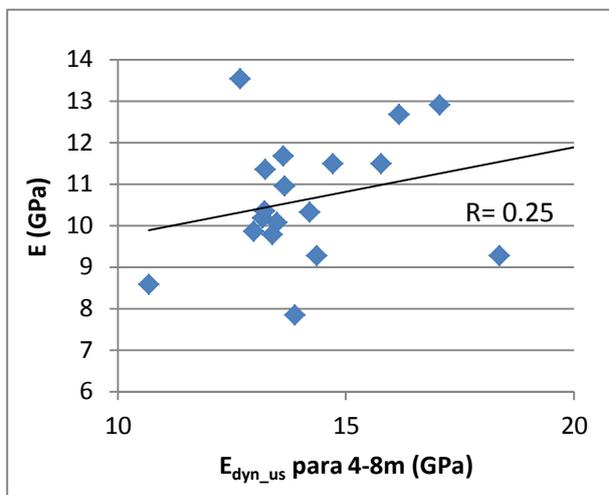


Figura A.17 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 4m e 8m

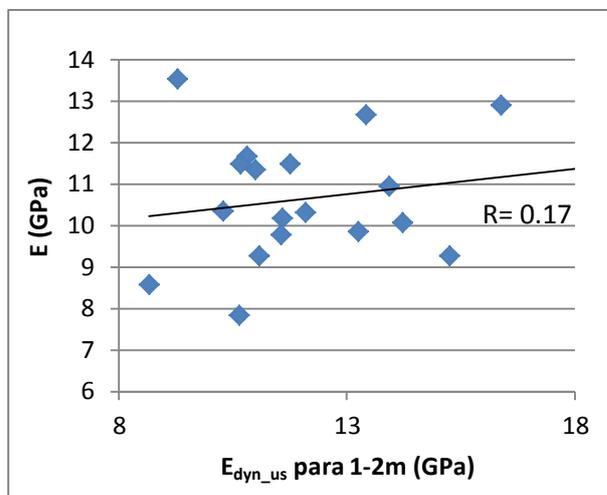


Figura A.18 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 2m

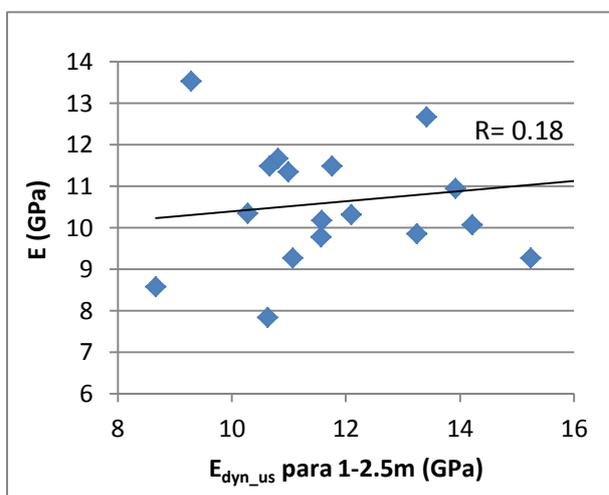


Figura A.19 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 2.5m

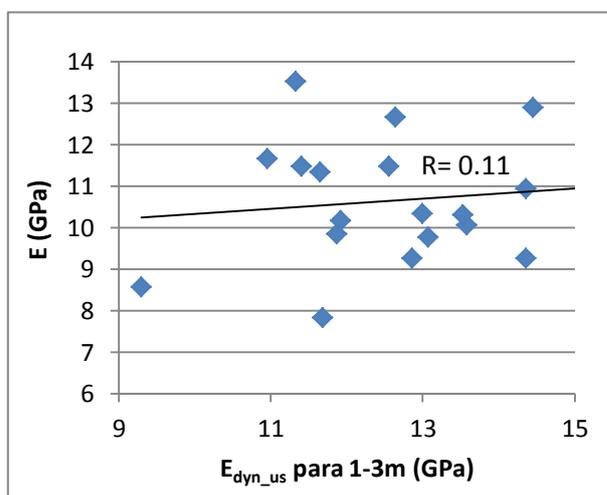


Figura A.20 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico do ensaio ultra-sons com sondas a 1m e 3m

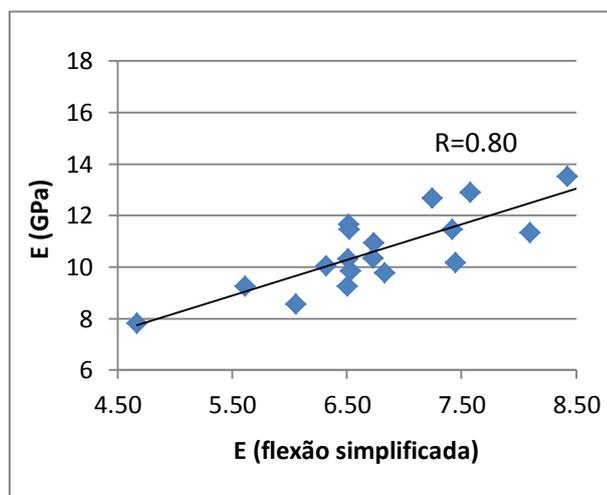


Figura A.21 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade estático obtido com flexão simplificada