



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

Avaliação das propriedades de postes de madeira com recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas

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

Autor

Fábio Oliveira Pereira

Orientadores

Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

Ricardo Joel Teixeira Costa

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2015

AGRADECIMENTOS

Este trabalho e o meu percurso académico certamente ficarão na história da minha vida, por isso não posso deixar passar esta fase sem tecer alguns agradecimentos.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por todo o apoio prestado, pelos conselhos, pelo carinho e pela educação que me proporcionaram, com base na alegria, amizade e responsabilidade. Graças aos meus pais, tive direito aos melhores anos da minha vida académica e se a ultrapassei com sucesso a eles o devo, por isso um muito obrigado.

A amizade é um dos pilares do meu bem-estar, como tal não podia deixar de referenciar os meus amigos. Diogo Amaro e Orlando Costa, obrigado por estarem ativamente presentes na minha vida e por poder contar sempre convosco. Renato Tostão, Jorge Silva, Anthony Mendes, Gonçalo Pereira, João Gonçalves, Ruben Salgueiro e João Fernandes, sem vocês esta etapa não tinha sido a mesma, desde as noitadas a estudar aos momentos de descontração que foram sem dúvida muito importantes, e se há coisa que eu levo de Coimbra no coração é a vossa amizade e saudade para a vida.

Aos meus orientadores Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias e Professor Doutor Ricardo Joel Teixeira Costa pela contribuição e apoio prestado que possibilitaram a execução deste trabalho.

Ao Eng. Carlos Martins pela ajuda incansável não só na realização dos ensaios experimentais, mas também pelo esclarecimento de dúvidas e pelas sugestões interessantes para o trabalho.

Quero agradecer a disponibilidade e o apoio que a empresa Pedrosa e Irmãos, Lda prestou, não só ao nível do espaço e material dos ensaios, mas também devido à resolução de qualquer imprevisto que surgiu com prontidão. Um obrigado sentido ao Eng. Nélson Pedrosa, Eng. Frazão e Joel.

Ao Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco pela disponibilização do aparelho de aquisição de dados, Data Logger TDS-530.

Um agradecimento especial à Portugal Telecom pela informação fornecida relativa aos dados da rede de distribuição de telecomunicações nacional.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo a avaliação de propriedades mecânicas de postes de madeira através de métodos destrutivos e não destrutivos, visando a sua classificação de forma mais eficaz. A espécie analisada é o Pinheiro Bravo devido à sua preponderância nas florestas nacionais e aplicação nos postes de suporte de linhas aéreas, como por exemplo as linhas de telecomunicações, uma das muitas utilidades.

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida em parceria com a empresa Pedrosa e Irmãos, Lda, situada em Monte Redondo, no distrito de Leiria, tendo sido nas suas instalações que se realizou a grande maioria do trabalho experimental.

O trabalho teve início na seleção das amostras cumprindo com os requisitos normativos, seguindo-se a medição de características visuais, como por exemplo, comprimentos, diâmetros e perímetros em várias secções, essenciais para a continuidade do trabalho de classificação mecânica. Posteriormente, realizaram-se os ensaios vibração longitudinal com a finalidade de obter o módulo de elasticidade dinâmico. Recorrendo a uma máquina desenvolvida pela empresa, ensaiaram-se os postes através de um ensaio de carga estática de modo a obter o módulo de elasticidade simplificado. Por fim, fizeram-se os ensaios segundo o Anexo C da EN14229 (CEN, 2010), através do qual é possível determinar o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão de cada poste.

Retirados todos os valores dos ensaios relativos a cada poste foi conduzido um tratamento dos mesmos e respetiva análise. Por fim, calcularam-se as correlações entre todas as propriedades medidas e a resistência à flexão, através de regressões lineares simples, para avaliar qual o parâmetro que melhor se correlaciona com as propriedades mecânicas determinadas pelos ensaios da norma EN14229 (CEN, 2010). Das correlações estabelecidas verificou-se que o módulo de elasticidade estático é a propriedade que melhor se correlaciona com a resistência à flexão ($R=0,80$), pelo que na análise de resultados se optou por comparar não só todas as características medidas com a resistência à flexão, mas também com o módulo de elasticidade estático.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the mechanical properties of wood utility poles using destructive and non-destructive techniques, aiming a more effective classification. The investigated species is Maritime pine because is the most abundant specie in Portugal and has on overhead lines an important utility.

This dissertation was carried in partnership with Pedrosa e Irmão, Lda, located in Monte Redondo, Leiria, where experimental work was made.

The work was started by the selection of the samples and their visual characterization, measuring length, diameters and perimeters, according to the normative requirements. After that, the longitudinal vibration tests was executed with the purpose of get dynamic modulus of elasticity. Poles were tested through a static load test using a company's machine to obtain simplified modulus of elasticity. Finally, static modulus of elasticity and bending strength of each pole were determined following Annex C of EN14229 (CEN,2010).

After all tests, correlations between bending strength and all measured properties were calculated by simple linear regressions, to find the measured parameter that correlates better with the mechanical properties determined according EN14229 (CEN, 2010). It was found that static modulus of elasticity is the better property to correlate with bending strength ($R=0,80$). Accordingly, the analysis compare not only all measured properties with bending strength, but also with static modulus of elasticity.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
SIMBOLOGIA	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Metodologias não destrutivas	4
2.3 Estudos sobre características mecânicas e visuais de madeira de seção circular	5
3 AVALIAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA.....	16
3.1 Introdução	16
3.2 Classificação Visual.....	18
3.3 Classificação de postes recorrendo a ensaios não destrutivos	23
3.3.1 Introdução.....	23
3.3.2 Ensaio de Vibração Longitudinal	24
3.3.3 Ensaio de carga estática	28
3.4 Classificação de postes segundo a EN14229	28
3.4.1 Introdução.....	28
3.4.2 Esquema de montagem do Ensaio	29
3.4.3 Módulo de Elasticidade	30
3.4.4 Resistência à flexão	32
3.5 Propriedades medidas em laboratório.....	35

3.5.1	Teor de água	35
3.5.2	Massa volúmica	38
3.6	Tratamento estatístico de resultados	39
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	41
4.1	Introdução	41
4.2	Resultados provenientes dos ensaios	41
4.3	Comparação das propriedades medidas com outros estudos e espécies	49
5	CONCLUSÕES.....	53
5.1	Trabalho futuro	54
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	ANEXO A – DADOS PORTUGAL TELECOM	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies (ICNF, 2013)	2
Figura 1.2 – Fatores de degradação verificados nos postes em serviço (PT).....	3
Figura 2.1 – Esquema de ensaio proposto na prEN14229 (Martins, 2010)	5
Figura 2.2 – Equipamento de vibração longitudinal, Timber Grader MTG, e sistema de apoio dos toros (Morgado, 2012)	9
Figura 2.3 – Ensaio de vibração longitudinal (Vries, P. et al., 2006).....	11
Figura 2.4 – Metodologia do ensaio de resistência à flexão (Cerdeira e Wolfe, 2003).....	13
Figura 2.5 – Esquema do sistema de flexão dos postes (Vidor, 2011).....	14
Figura 2.6 – Esquema de ensaio (Torrán, E.A. et al., 2009)	15
Figura 3.1 – Postes em esteira	17
Figura 3.2 – Postes selecionados para a amostra.....	17
Figura 3.3 – Exemplo ilustrativo da medição de diâmetros através de um paquímetro.....	19
Figura 3.4 – Critérios de medição da curvatura dos postes	20
Figura 3.5 – Seção transversal de um poste e respetivos anéis de crescimento	22
Figura 3.6 – Procedimento que viabiliza a avaliação da taxa de crescimento	22
Figura 3.7 – Pormenor da medição da inclinação das fibras numa zona próxima da rotura....	23
Figura 3.8 – Metodologia do ensaio de vibração longitudinal com utilização do acelerómetro piezoelétrico.....	25
Figura 3.9 – Equipamento NI USB-4431 (http://www.smarttechconsulting.com)	25
Figura 3.10 – Frequência do 1º modo de vibração através do acelerómetro piezoelétrico	25
Figura 3.11 - Metodologia do ensaio de vibração longitudinal com utilização do MTG.....	26
Figura 3.12 – Avaliação do volume dos postes através do método aproximado.....	27
Figura 3.13 – Pormenor do encastramento dos postes nos ensaios do módulo de elasticidade estático e da resistência à flexão.....	29
Figura 3.14 – Aplicação da carga durante o ensaio de resistência à flexão	30
Figura 3.15 – Material de ensaio (esquerda para a direita): defletómetro TML SDP-200D; defletómetro de fio TML DP-1000E; Data Logger TDS-530 (http://tml.jp); célula de carga VETEK de 10 tf.....	30
Figura 3.16 – Distribuição percentual do módulo de elasticidade estático (Postes Novos).....	31
Figura 3.17 – Distribuição percentual do módulo de elasticidade estático (Postes Usados)....	31
Figura 3.18 – Distribuição percentual da resistência à flexão (Postes Novos).....	33
Figura 3.19 – Distribuição percentual da resistência à flexão (Postes Usados)	33

Figura 3.20 – Pormenor de roturas provocadas por tração.....	34
Figura 3.21 – Pormenor de roturas provocadas por compressão.....	34
Figura 3.22 – Pormenor de dupla rotura verificada num dos postes usados	34
Figura 3.23 – Distribuição percentual da localização da rotura (Postes Novos).....	35
Figura 3.24 – Distribuição percentual da localização da rotura (Postes Usados).....	35
Figura 3.25 – Processo de secagem das rodelaas próximas da zona de rotura (Postes Novos) .	36
Figura 3.26 – Processo de secagem das rodelaas próximas da zona de rotura (Postes Usados)	36
Figura 3.27 – Distribuição de frequências do teor de água dos postes novos e usados	37
Figura 3.28 – Avaliação do teor de água recorrendo ao humidímetro	37
Figura 3.29 – Medição do diâmetro e altura das rodelaas.....	38
Figura 3.30 – Pesagem das rodelaas.....	38
Figura 4.1 – Pormenor da deterioração do poste usado junto à linha terra	42
Figura 4.2 – Deterioração dos postes usados disponíveis	42
Figura 4.3 – Pormenor relativo à marcação de postes retirados de serviço.....	43
Figura 4.4 – Relação entre a data de fabrico e a resistência à flexão (Postes Usados)	43
Figura 4.5 – Verificação da eficácia do tratamento aplicado ao poste	44
Figura 4.6 – Comparação de massas volúmicas de madeira de seção circular	51
Figura 4.7 – Comparação de módulos de elasticidade de madeira de seção circular.....	51
Figura 4.8 – Comparação de resistências à flexão de madeira de seção circular	52
Figura A-1 – Dados da amostra recolhidos de postes em serviço.....	A-1
Figura A-2 – Estado da amostra de postes em serviço.....	A-1
Figura A-3 – Recomendação de substituição da amostra de postes em serviço.....	A-1
Figura A-4 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Sul do país.....	A-2
Figura A-5 – Estado da amostra de postes em serviço na zona de Lisboa e Vale do Tejo do país.....	A-3
Figura A-6 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Centro do país	A-4
Figura A-7 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Norte do país	A-5

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Valores do diâmetro nominal medido na Linha terra	19
Quadro 3.2 – Valores da ovalidade medida na Linha terra	20
Quadro 3.3 – Valores da ovalidade medida no ponto de aplicação da carga	21
Quadro 3.4 – Valores do adelgaçamento dos postes	21
Quadro 3.5 – Valores da taxa de crescimento medida em rodela provenientes da base dos postes	22
Quadro 3.6 – Valores da taxa de crescimento medida em rodela provenientes do topo dos postes	22
Quadro 3.7 – Valores da inclinação das fibras extrapolados para 1m.....	23
Quadro 3.8 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico recorrendo ao ensaio de vibração longitudinal.....	26
Quadro 3.9 – Valores da massa volúmica determinada através do método aproximado	27
Quadro 3.10 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico recorrendo ao método aproximado	27
Quadro 3.11 – Valores do módulo de elasticidade simplificado recorrendo ao ensaio de carga estática	28
Quadro 3.12 – Valores do módulo de elasticidade estático dos postes recorrendo ao ensaio disposto na EN14229 (CEN, 2010)	32
Quadro 3.13 – Valores da resistência à flexão dos postes recorrendo ao ensaio disposto na EN14229 (CEN, 2010)	33
Quadro 3.14 – Valores da massa volúmica dos postes em condição saturada e dos postes com teor de água de 12%.....	39
Quadro 3.15 – Valores característicos da massa volúmica e da resistência à flexão em postes novos e usados.....	40
Quadro 4.1 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e o módulo de elasticidade estático em postes novos.....	45
Quadro 4.2 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e o módulo de elasticidade estático em postes usados	45
Quadro 4.3 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e a resistência à flexão em postes novos.....	46
Quadro 4.4 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e a resistência à flexão em postes usados	46

Quadro 4.5 – Coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão com o módulo de elasticidade simplificado em postes novos e usados.....	47
Quadro 4.6 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e o módulo de elasticidade estático em postes novos.....	47
Quadro 4.7 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e o módulo de elasticidade estático em postes usados.....	47
Quadro 4.8 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão em postes novos.....	48
Quadro 4.9 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão em postes usados	49

SIMBOLOGIA

C – Velocidade de propagação da onda acústica

E – Módulo de elasticidade estático

EA – Rigidez axial

E_{dyn} – Módulo de elasticidade dinâmico

I_q – Momento de Inércia no ponto de aplicação da carga

LT – Linha terra

MED – Módulo de elasticidade dinâmico proveniente do ensaio de vibração longitudinal

MED (ρ aproximado) – Módulo de elasticidade dinâmico calculado através da massa volúmica determinada pelo método aproximado

MED (ρ laboratório) – Módulo de elasticidade dinâmico calculado através da massa volúmica determinada em laboratório

PT – Empresa Portugal Telecom

Q – Carga aplicada no ensaio do módulo de elasticidade estático e resistência à flexão

V – Volume

d_g – Diâmetro nominal na linha terra

d_q – Diâmetro nominal no ponto de aplicação da carga

d_{max} – Diâmetro máximo

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

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

d_{min} – Diâmetro mínimo

f – Frequência própria de vibração

$f_{m,05}$ – Percentil de 5% da resistência à flexão

$f_{m,k}$ – Valor característico da resistência à flexão

k – Fator estatístico

l – Comprimento total dos postes

l_{max} – Distância da base à seção de tensão máxima ou linha terra, a que for superior

l_g – Distância entre a base do poste e a linha terra

l_q – Distância entre o topo do poste e o ponto de aplicação da carga

l_{LT-q} – Comprimento entre a linha terra e o ponto de aplicação da carga

m – Massa

\bar{m} – Massa por unidade de comprimento

m_0 – Massa das rodela secas

m_1 – Massa das rodela saturadas

$m(f_m)$ – Valor médio da resistência à flexão

$m(f_{m,05})$ – Valor médio do percentil de 5% da resistência à flexão

m_{ref} – Massa das rodela com teor de água de referência (12%)

n – Modos de vibração

n_j – Número de postes da amostra

s – Desvio padrão

$s_a - s_0$ – Deslocamento do ponto de aplicação da carga na direção paralela ao eixo longitudinal do poste

$s(f_m)$ – Desvio padrão da resistência à flexão

$t_a - t_0$ – Deslocamento do ponto de aplicação da carga na direção perpendicular ao eixo longitudinal do poste

$u(x, t)$ – Função deslocamento ao longo do eixo longitudinal

w – Teor de água

w_{ref} – Teor de água de referência (12%)

ρ – Massa volúmica

$\bar{\rho}$ – Massa volúmica média

ρ_{05} – Percentil de 5% da massa volúmica da amostra

ρ_k – Valor característico da massa volúmica

ρ método aproximado – Massa volúmica determinada através do método aproximado

Linha terra – Zona do poste a 1,5m acima da base

Módulo de elasticidade estático – Módulo de elasticidade determinado através das disposições da EN14229 (CEN, 2010)

Módulo de elasticidade simplificado – Módulo de elasticidade determinado através do ensaio de carga estática

Postes Novos – Postes verdes com teor de água acima do ponto de saturação das fibras (24%)

Postes Usados – Postes retirados de serviço das linhas de distribuição da Portugal Telecom

1 INTRODUÇÃO

A madeira, enquanto material de construção, remonta aos primórdios da Humanidade. Atualmente tem diversas aplicações não só ao nível da construção de estruturas de Engenharia mas também, por exemplo, na produção de papel. O Homem desde cedo começou por explorar este material na construção de estruturas visto que este é um material relativamente leve e fácil de trabalhar, principalmente quando não existiam os sistemas mecânicos dos dias de hoje, o que fez com que a madeira adquirisse uma extrema importância no modo de vida das pessoas. Atualmente, numa era em que o betão e o aço são os materiais dominantes na construção civil, a madeira ainda assim continua a ser um material muito competitivo em determinado tipo de estruturas, não só devido às propriedades mecânicas que lhe estão inerentes, mas também porque a madeira fornece uma sensação de conforto e bem-estar muito característica.

As propostas de classificação de edifícios que visam promover a construção sustentável, enunciam a madeira como um dos principais materiais a utilizar, não só porque a madeira apresenta um excelente comportamento acústico mas também térmico.

O Pinheiro bravo é uma das espécies mais utilizadas no nosso país devido à sua abundância em território nacional e os postes de madeira, são uma das suas variadíssimas aplicações. Este tipo de produto é usado essencialmente para suporte de linhas aéreas, nomeadamente na rede de distribuição elétrica e de telecomunicações, visto que são mais baratos, leves e de fácil instalação comparativamente a postes de outros materiais, como é o caso do betão.

A madeira é um material que pode ser facilmente tratado com agentes preservadores existentes no mercado e apresenta características distintas dependendo da espécie em causa, classificando-se como resinosa ou folhosa. A variabilidade das suas propriedades físicas e mecânicas é uma das suas principais desvantagens. Portanto, torna-se muito relevante desenvolver técnicas e estudos que permitam minorar este problema. É deste pressuposto que parte o presente trabalho, que através de uma análise destrutiva e não destrutiva tem como objetivo analisar as propriedades físicas e mecânicas de postes de madeira.

A nível nacional, segundo o ICNF (2013), o uso florestal representa a ocupação de solo preponderante do território com 35%, no entanto entre 1995 e 2010, notou-se uma diminuição da área florestal a uma taxa de -0,3% ao ano. Ainda neste período de tempo, observou-se um aumento de 13% da área total de Eucalipto, uma redução de 263 mil hectares da área total de

Pinheiro bravo e uma estabilização com ligeira diminuição da área de Sobreiro. Por conseguinte, o eucalipto passou a ser a espécie predominante nas florestas nacionais, à frente do Pinheiro bravo e do Sobreiro, como se verifica na Figura 1.1.

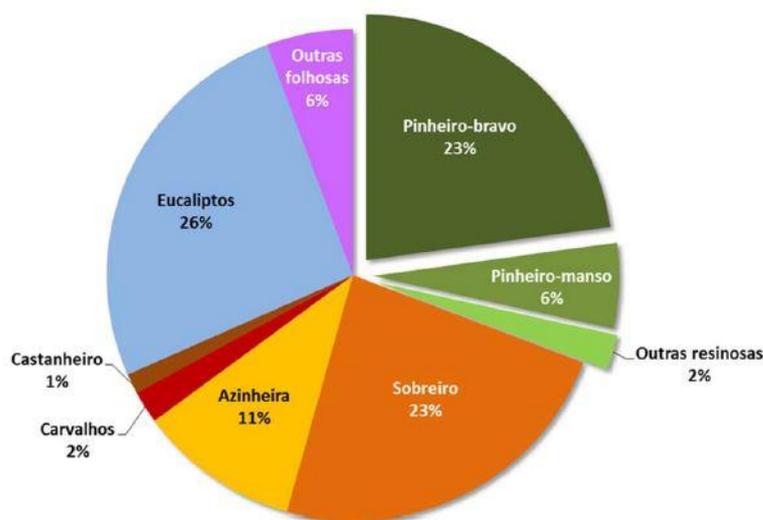


Figura 1.1 – Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies (ICNF, 2013)

Com o objetivo de enriquecer este estudo, em contato com a Portugal Telecom (PT) realizou-se uma análise estatística relativamente à distribuição, quantificação e estado de serviço dos postes de madeira, uma vez que esta é provavelmente das empresas que mais requer este tipo de produto em território nacional.

Regra geral, segundo Portugal Telecom (2010), o estado dos postes instalados deve ser verificado acima e abaixo da linha do solo. Acima do nível do solo e até cerca de 2m de altura, o procedimento consiste na aplicação de várias pancadas em torno do poste com o objetivo de averiguar o tipo de som emitido. Caso o martelo produza um som claro e de forte repercussão o poste encontra-se em bom estado, por outro lado caso a reação do martelo seja amortecida emitindo um som oco, pode estar-se na presença de um poste com bolsas de podridão. O procedimento de verificação do estado de podridão de um poste abaixo do nível do solo, implica a abertura de uma cova em torno do poste de 35cm de profundidade. Para o efeito, deve utilizar-se uma navalha ou uma chave de fendas com um comprimento de pelo menos 120mm.

Os postes de madeira estão tão próximos do dia-a-dia da população e passam completamente despercebidos à maior parte das pessoas. Mas, este tema para uma empresa desta dimensão tem uma importância significativa, devido ao problema da durabilidade, uma vez que se têm registado alguns incidentes nos últimos anos que podem estar relacionados com o efeito

duradouro do tratamento. Traduzindo esta informação numericamente, no ano de 2012 e 2013 a empresa teve necessidade de adquirir cerca de 62 000 e 51 000 postes de madeira, respetivamente, para garantir a operacionalidade da sua rede de distribuição. A Região Centro do País (Guarda, Castelo Branco, Viseu, Santarém, Coimbra, Leiria e Lisboa) e as Ilhas (Madeira e Açores) foram líderes no que toca à substituição de postes, cerca de 30 000 unidades substituídas em 2012 e 25 000 unidades em 2013, para as duas zonas em conjunto.

O poste quando é comprado ao fornecedor vem-lhe acoplada uma garantia. No entanto, a PT realiza uma avaliação do estado dos postes em serviço. Os dados aqui referidos relativamente a este assunto são do período de Outubro de 2012 a Setembro de 2013. Como é possível verificar no Anexo A, o concelho de Ponte-de-Sôr é o que regista a maior percentagem (73,3%) de elementos em mau estado, ou seja dos 255 postes verificados cerca de 187 não estavam em boas condições. Cascais é o concelho com uma maior amostra de postes verificados (1242 unidades), por conseguinte é também detentor da maior quantidade absoluta a ser reparada (307 unidades).

Como se sabe, uma das desvantagens dos postes de madeira, relativamente aos postes de betão por exemplo, refere-se à sua durabilidade. A Portugal Telecom quando procede à substituição de um poste, anota as principais anomalias possíveis de visualizar, desde buracos e fendas até podridões dos elementos. Analisando a informação fornecida na Figura 1.2, verifica-se que os buracos de pica-pau são a ação que mais contribui para a degradação dos postes (44%).

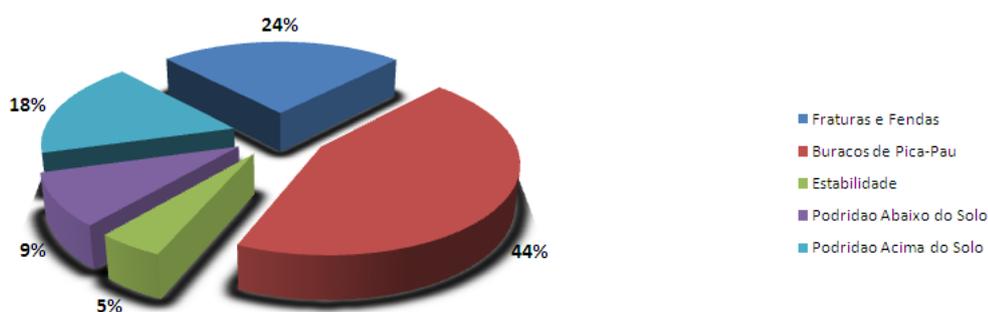


Figura 1.2 – Fatores de degradação verificados nos postes em serviço (PT)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se não só algumas metodologias não destrutivas bastante utilizadas em ensaios de classificação de elementos de madeira, mas também alguns estudos que já foram realizados de interesse para o presente estudo, ou seja sobre a determinação das características mecânicas de elementos circulares de madeira.

2.2 Metodologias não destrutivas

Atualmente, devido aos recentes avanços da tecnologia, existem diversas técnicas de avaliação não destrutivas que permitem obter as características mecânicas dos materiais. Nos parágrafos que se seguem encontram-se descritas metodologias não destrutivas que fazem uso da análise de imagem, ultrassons e vibração longitudinal e transversal.

Em Morgado (2012) referiu-se que a análise por imagem permite detetar defeitos nas peças através de imagens internas ou da superfície dos elementos. As imagens podem ser obtidas, por exemplo, através de câmaras de vídeo, termografia e ressonância nuclear magnética. A captação de imagens por câmaras de vídeo, consiste num varrimento superficial da peça através de uma câmara de vídeo. A termografia relaciona a massa volúmica e as propriedades térmicas da peça quando se aplica uma excitação térmica superficial ao material, em que uma diferença de temperatura localizada na peça se associa à presença de defeitos. A ressonância nuclear magnética é um procedimento em que a aplicação no elemento de um campo magnético, permite criar uma imagem da peça.

Os ensaios de ultrassons permitem medir a velocidade de propagação de uma onda acústica induzida no material. Para isso, mede-se a distância entre dois transdutores, um emissor e outro recetor, e determina-se o tempo de propagação do sinal entre os dois pontos. Por intermédio da velocidade de propagação da onda e da massa volúmica da peça, é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico (Equação (1)).

$$E_{dyn} = \rho \times C^2 \quad (1)$$

As técnicas de ensaio de vibração, quer longitudinal, quer transversal, baseiam-se no princípio de que todos os materiais têm uma frequência própria de vibração. Esta técnica permite determinar parâmetros de rigidez dos materiais, como o módulo de elasticidade, em função da frequência própria de vibração. De entre as técnicas não destrutivas supracitadas, o ensaio de vibração longitudinal foi o único efetuado neste estudo, como tal apresenta-se uma descrição mais pormenorizada do mesmo no capítulo 3.

2.3 Estudos sobre características mecânicas e visuais de madeira de seção circular

Em Portugal, embora poucos, já existem alguns estudos dedicados à avaliação das propriedades físicas e mecânicas de madeira circular de Pinheiro bravo.

Martins (2010) efetuou o primeiro estudo em Portugal que incidiu na caracterização e classificação de madeira de seção circular de Pinheiro bravo, para aplicação de linhas aéreas, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos postes ensaiados à data segundo a prEN 14229 (CEN, 2007).

Em primeiro lugar, selecionaram-se 64 postes saturados, ou seja com teor de água superior a 24% segundo a Ficha M2 (LNEC, 1997). Após a seleção da amostra foi conduzida a caracterização visual tendo em conta a prEN14229 (CEN, 2007). De seguida, realizaram-se ensaios com vista à obtenção do módulo de elasticidade e resistência à flexão de cada elemento. Foi adotado um mecanismo criado com base na norma em causa (Figura 2.1) que consiste no encastramento dos postes a 1,5m da base e na aplicação de uma carga a 15cm do topo do poste, simulando as condições de serviço.

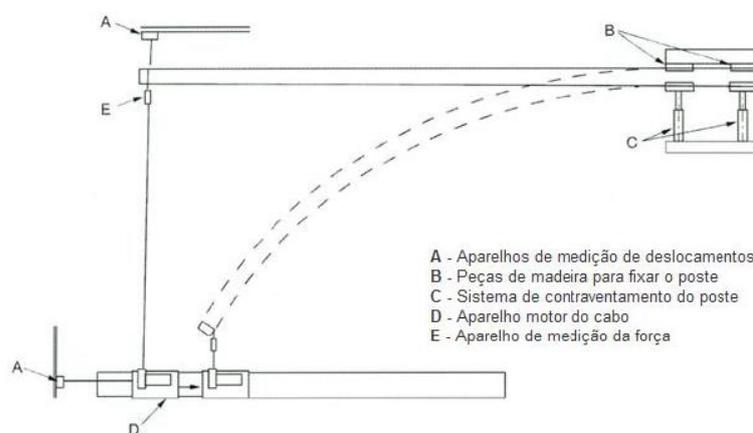


Figura 2.1 – Esquema de ensaio proposto na prEN14229 (Martins, 2010)

Por fim, colocaram-se rodelas com cerca de 5cm de espessura, retiradas de uma zona próxima da rotura, da base e do topo, numa estufa em laboratório a uma temperatura de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ e determinaram-se os teores de água dos postes respeitando a NP 614 (LNEC,1973). Através da medição da altura e diâmetro médios das rodelas, juntamente com as respetivas massas, calculou-se as massas volúmicas dos postes. Da amostra de postes considerada neste estudo foram obtidos valores médios de teor de água de 65,4% e massa volúmica de $573,4\text{Kg/m}^3$.

Para além destas características, analisou-se a resistência de madeira limpa através de ensaios de flexão. Para cada poste retiraram-se quatro peças com 45cm de comprimento em duas zonas distintas (montante e jusante da zona da rotura), onde cada peça deu origem a duas outras peças, possibilitando o ensaio de peças em condição saturada e seca. As peças eram isentas de nós e tinham seção transversal de 25x25mm, o que perfaz um total de 256 elementos de madeira limpa ensaiada.

As peças colocaram-se numa sala climatizada a 20°C e 65% de humidade relativa, onde permaneceram durante aproximadamente três meses com o objetivo de atingir o teor de água de 12%. Após a secagem do material, a seção transversal das peças sofreu uma retificação, através de uma plaina, passando a 20x20mm, e o comprimento das peças alterou-se de 45cm para 38cm.

O esquema de ensaio para determinar os módulos de elasticidade da madeira limpa consideraram as condições especificadas na EN408 (CEN, 2003) relativamente à velocidade do ensaio e à carga máxima. Neste ensaio os elementos encontravam-se simplesmente apoiados, carregados pontualmente ao centro e com um vão de 320mm. Por sua vez, o ensaio de resistência à flexão de madeira limpa seguiu a metodologia imposta pela ISO 3133 (ISO, 1975).

O valor característico da resistência à flexão, o módulo de elasticidade médio e massa volúmica média e característica obtidos para a madeira de seção circular foram de 37,04MPa, 10,93GPa, $573,42\text{ kg/m}^3$ e $478,9\text{ kg/m}^3$. Efetuados os ensaios e correlacionando as propriedades mecânicas e visuais da madeira de seção circular, constatou-se que o módulo de elasticidade é a característica com maior capacidade de previsão da capacidade resistente de um poste ($R=0,83$), seguida da massa volúmica ($R=0,66$). Uma vez que o módulo de elasticidade apresentou uma boa correlação com a resistência à flexão, comparou-se este parâmetro com todas as características medidas, sendo a massa volúmica a que apresentou a melhor correlação ($R=0,58$).

Este autor apresenta uma comparação entre as propriedades do Pinheiro bravo e de outras espécies, concluindo-se que o Pinheiro bravo se pode enquadrar no panorama dos estudos internacionais com aplicação em postes de linhas aéreas.

As técnicas de ensaio não destrutivas para avaliação das propriedades mecânicas de madeira circular de Pinheiro bravo, com aplicação em postes de suporte a linhas aéreas, foram analisadas em Marto (2013). Este autor numa primeira fase, selecionou e caracterizou visualmente os 18 postes representativos da amostra, segundo a EN14229 (CEN, 2010). Seguidamente, procedeu-se à realização de ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal, ultrassons e ensaio de flexão simplificada, que permitiram calcular o módulo de elasticidade dinâmico segundo cada ensaio. Por fim, determinou o módulo de elasticidade estático recorrendo à EN14229 (CEN, 2010), para verificar a capacidade da previsão das propriedades mecânicas.

A amostra selecionada seguiu os pressupostos impostos pela norma adotada quer ao nível das características visuais, quer ao nível do estado dos postes relativamente ao ponto de saturação das fibras. No entanto, o teor de água neste estudo apenas foi medido a cerca de 2 metros da base do poste, recorrendo ao equipamento *Hydromette RTU 600* da marca GANN, uma vez que não se submeteram os postes à rotura e, conseqüentemente, não foram retiradas rodelas próximas da zona de rotura para determinar esta propriedade em laboratório. Neste estudo concluiu-se ainda que três dos postes não se encontravam com um valor do teor de água superior ao ponto de saturação das fibras.

A análise da fiabilidade dos resultados obtidos através dos ensaios não destrutivos efetuou-se comparando-os com o módulo de elasticidade estático de cada poste. Essa análise constitui um tratamento estatístico dos dados, recorrendo a regressões lineares simples.

O ensaio de flexão simplificada trata-se de uma aproximação da metodologia preconizada na EN14229 (CEN, 2010), e corresponde à aplicação de uma carga constante, que quando analisada em conjunto com as deformações impostas permite calcular parâmetros de rigidez, ou seja módulos de elasticidade.

O cálculo das propriedades resistentes, mais precisamente dos diferentes módulos de elasticidade, e as correlações provenientes dizem respeito ao objetivo fundamental deste trabalho. Obtiveram-se valores médios do módulo de elasticidade dinâmico de 14,7GPa, 14,8GPa e 13,2GPa para o ensaio de vibração transversal, vibração longitudinal e ultrassons, respetivamente. Por sua vez, o ensaio de flexão simplificada e o ensaio de flexão segundo a norma forneceram valores médios de 6,8GPa e 10,6GPa.

Outro estudo a nível nacional, efetuado por Morgado *et al.* (2008), consistiu na análise de 200 toros provenientes da zona centro interior do país. Cada toro foi caracterizado visualmente de acordo com a EN1310 (CEN, 1997), os diâmetros variaram entre 70mm e 190mm, apresentando-se 81% das peças com diâmetro inferior a 120mm. A amostra foi submetida a ensaios não destrutivos, através de ensaios de vibração longitudinal recorrendo ao aparelho Timber Grader MTG, com o intuito de determinar o módulo de elasticidade dinâmico, e

seguidamente a ensaios destrutivos para determinar a resistência à flexão e à compressão, seguindo a EN 14251 (CEN, 2003).

Neste último estudo, inicialmente foram selecionados 500 toros e colocaram-se ao ar livre com o objetivo de se atingirem teores de água inferiores a 20%. Para se obterem teores de água próximos de 12%, efetuou-se uma seleção final de 200 toros que foram posteriormente colocados na sala climática do Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Relativamente aos resultados obtidos, deste estudo resultaram valores médios para a resistência à flexão, módulo de elasticidade paralelo às fibras e massa volúmica de 82,7MPa, 14,6GPa e 535kg/m³. Por fim, correlacionaram-se as propriedades visuais e mecânicas medidas com a resistência à flexão, destacando-se o módulo de elasticidade estático e dinâmico e a massa volúmica, com coeficientes de correlação de 0,76, 0,77 e 0,70, respetivamente.

Morgado (2012) estudou métodos de classificação e propriedades mecânicas em toros de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo, com vista à aplicação estrutural, através de ensaios destrutivos e não destrutivos. Os toros ensaiados dividem-se em duas amostras, 70 toros recolhidos na zona Centro, distrito de Castelo Branco, e 50 toros recolhidos na região Norte, distrito de Braga.

As peças que se encontravam em estado verde, foram colocados a secar ao ar livre até possuírem um teor de água inferior a 20%. Após esta secagem inicial, os toros de ambas as amostras foram transportados para uma sala climatizada, num ambiente com humidade relativa de 65% e 20°C de temperatura, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra de modo a atingir o teor de água de aproximadamente 12%. Em seguida, determinaram-se características visuais como, por exemplo, a ovalidade, o adelgaçamento e a inclinação das fibras de acordo com a EN14251 (CEN, 2003b).

Este autor efetuou ensaios destrutivos de flexão, de acordo com a EN 14251 (CEN, 2003b), que preconiza apoios simples e carregamentos simétricos. Os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade estático e para a resistência à flexão da amostra da zona Centro foram 14,6GPa e 67,7MPa, respetivamente. Por sua vez, a amostra da região Norte apresentou valores médios de 13,1GPa e 71,0MPa para o módulo de elasticidade estático e para a resistência à flexão, respetivamente. Após o ensaio destrutivo de flexão, retiraram-se rodelas de uma zona próxima da rotura e isenta de nós para analisar características como, o teor de água e a massa volúmica.

Para além da classificação visual, este autor avaliou outras técnicas não destrutivas, como é o caso dos ensaios por vibração. Esta metodologia permite a determinação do módulo de elasticidade dinâmico que permite estimar a rigidez. A avaliação não destrutiva por meio de

vibração longitudinal foi efetuada com recurso ao equipamento comercial Timber Grader MTG (Figura 2.2). O valor médio registado para o módulo de elasticidade dinâmico foi de 11,9GPa e 11,4GPa para a zona Centro e Norte, respetivamente. Analisando as correlações, verifica-se que correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à flexão, obtêm-se valores muito semelhantes para as amostras da região Centro ($R=0,72$) e Norte ($R=0,75$). Por sua vez, verifica-se alguma discrepância nas correlações obtidas entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico da zona Centro ($R=0,82$) e Norte ($R=0,61$).



Figura 2.2 – Equipamento de vibração longitudinal, Timber Grader MTG, e sistema de apoio dos toros (Morgado, 2012)

Este autor retirou ainda 30 toros do conjunto da zona Centro e 10 toros da zona Norte, para avaliar a influência do fornecimento dos toros nas respetivas propriedades mecânicas. Contudo, verificou-se que não existiram diferenças significativas entre os coeficientes de correlação obtidos para os toros torneados e não torneados.

Alargando o raio de pesquisa a nível mundial, encontram-se alguns estudos referentes à determinação de propriedades mecânicas de madeira circular de várias espécies não só em forma de postes de suporte a linhas aéreas, mas também em toros de madeira.

Yin *et al.* (2004) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de toros e madeira serrada da espécie *Cunninghamia lanceolata*, correspondente a um abeto chinês, relacionando módulos de elasticidade dinâmicos com a resistência à flexão. A amostra selecionada englobou 15 abetos chineses recolhidos com 36 anos de idade, posteriormente cortados individualmente em 4 toros verdes, ou seja saturados, de 2,4m de comprimento cada um, a 1,3m, 3,7m, 6,1m e 8,5m do nível do solo, sendo a amostra total constituída por 60 toros.

Após a marcação e transporte dos 60 toros para o laboratório CRIWI em Beijing, retirou-se uma rodela de 200mm de espessura na base de cada toro para medições do teor de água. Seguidamente, procedeu-se a 3 ensaios não destrutivos baseados na medição de ondas de tensão (Fakopp FRS-06/00), vibração longitudinal (FFT Analyser AD-3542) e ultrassons (PUNDIT) em todos os toros. Efetuados os ensaios não destrutivos, cortou-se cada toro a 1m da base e do

topo e uma rodela de 40mm no centro, alterando-se a amostra para 115 peças de madeira serrada (50×100×1000mm). Depois da secagem das peças, que durou cerca de quatro meses ao ar livre, foram novamente submetidas, com cerca de 7% de teor de água, aos ensaios de vibração longitudinal e ultrassons. Seguidamente retocaram-se as 115 peças (40×90×1000mm) e com a finalidade de atingirem o teor de água de equilíbrio (12%), colocaram-se numa sala à temperatura constante de 20°C e 65% de humidade relativa, para posteriormente efetuar os ensaios estáticos de flexão, levando as peças à rotura.

Antes dos ensaios de rotura, registaram-se características como a presença de nós, tendo em conta as dimensões e a localização. O ensaio estático de flexão seguiu o procedimento recomendado pela norma ISO/DIS 13910, e após cada rotura identificou-se o respetivo modo de rotura. O registo das roturas mostrou que 75% ocorreram em zonas com presença de nós e que em 70% das peças verificaram-se roturas por compressão.

Relativamente à relação entre a resistência à flexão, proveniente do ensaio estático de peças com o teor de água de equilíbrio, e os módulos de elasticidade dinâmicos, originários dos ensaios dinâmicos realizados quer para os toros verdes, quer para as peças de madeira serrada secas ao ar livre, concluiu-se que em ambas as situações o ensaio de vibração longitudinal é o que fornece maior fiabilidade, assumindo um coeficiente de correlação $R=0,48$ e $R=0,68$ para toros verdes e para as peças secas ao ar livre, respetivamente. Segundo os autores do estudo, o resultado alcançado recorrendo ao ensaio de vibração longitudinal assume uma classificação qualitativa moderadamente boa, no que diz respeito à previsão da resistência à flexão.

Vries, P. *et al.* (2006) estudaram o desenvolvimento de um sistema de classificação de madeira circular de pequeno diâmetro, baseado na determinação de parâmetros como o módulo de elasticidade, estático e dinâmico, e a resistência à flexão. A amostra constituída por 205 peças, corresponde à espécie Larch (*Larix kaempferi*) produzida na zona Este da Holanda numa área de, aproximadamente, 3500 km². A amostra dividiu-se em 4 subconjuntos de acordo com o diâmetro da peça (100mm, 120mm, 140mm e cónico), o comprimento das peças variou entre 2,20m e 3,00m, a idade das árvores que deram origem aos toros estava entre 35 e 40 ± 6 anos e o teor de água na altura dos ensaios era de 15%.

Mediu-se ainda a massa volúmica, o declive das fibras, a presença e dimensão dos nós e a taxa de crescimento. O módulo de elasticidade dinâmico determinou-se segundo métodos não destrutivos, baseando-se numa relação entre a frequência própria de vibração e a elasticidade. Recorreu-se a dois instrumentos distintos, utilizando-se um acelerómetro piezoelétrico (GrindoSonic MK5) para a grande maioria da amostra, mas para cerca de vinte peças utilizou-se um aparelho portátil (Timber Grader MTG), em que se mede, respetivamente, a aceleração e a frequência provocadas por um impacto induzido na direção longitudinal (Figura 2.3).

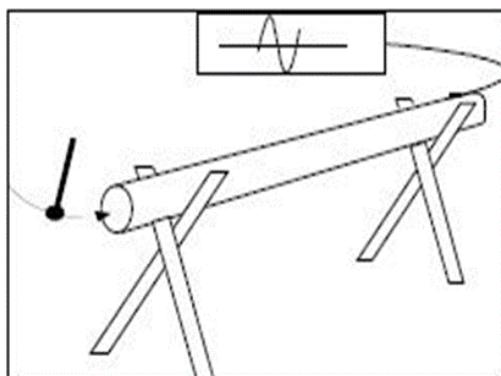


Figura 2.3 – Ensaio de vibração longitudinal (Vries, P. et al., 2006)

Em laboratório, seguindo as normas EN408 e EN14251, montou-se um esquema de ensaio para determinar o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão. A determinação do módulo de elasticidade estático baseou-se na aplicação de 40% da carga de rotura expetável, relacionando-a com os deslocamentos provocados. Seguidamente, descarregou-se a peça e carregou-se novamente até se atingir a rotura e, conseqüentemente, a resistência à flexão.

Os ensaios permitiram determinar um valor médio do módulo de elasticidade de 15,46GPa e valores caraterísticos da resistência à flexão e da massa volúmica de 40 MPa e 435 kg/m³, respetivamente.

A eficácia da previsão da capacidade resistente da madeira circular avaliou-se recorrendo a uma análise estatística baseada em regressões lineares simples e múltiplas. Analisando primeiramente os resultados obtidos das regressões lineares simples, constatou-se que de entre as caraterísticas visuais medidas e o módulo de elasticidade dinâmico, este último foi o que melhor coeficiente de correlação obteve com a resistência à flexão ($R=0,77$). Como o módulo de elasticidade pode ser calculado com recurso a ensaios dinâmicos e estáticos, analisaram também a correlação existente entre ambos ($R=0,87$). Para além disso, efetuou-se uma análise probabilística baseada em regressões lineares múltiplas, segundo 18 combinações possíveis, entre as propriedades medidas e a resistência à flexão, sendo que o melhor resultado para prever a resistência à flexão englobou o diâmetro do nó, a inclinação das fibras, a massa volúmica, a taxa de crescimento e o módulo de elasticidade dinâmico ($R=0,86$).

Outro estudo baseado na avaliação das propriedades de toros de madeira baseada em técnicas de avaliação não destrutivas, encontra-se descrito em Wang *et al.* (2001). Esta investigação visou o desenvolvimento de técnicas que permitam avaliar a rigidez à flexão e o módulo de elasticidade estático de toros de pequeno diâmetro. Analisaram-se duas amostras distintas, a amostra 1 constituída por 109 toros da espécie jack pine (*Pinus banksiana Lamb.*) e a amostra

2 formada por 50 toros da espécie red pine (*Pinus resinosa Ait.*), provenientes de florestas localizadas no norte de Michigan. As árvores retiraram-se das plantações com idade entre 50 e 70 anos de idade para a amostra 1 e 38 anos de idade para a amostra 2.

Cortaram-se os toros com comprimentos de 3,7 metros e após a realização dos ensaios retiraram-se rodela da base, do topo e da seção central de cada toro com o objetivo de se proceder à determinação do teor de água das peças. Registou-se também a massa e os diâmetros nas duas pontas dos toros com o intuito de determinar a massa volúmica. No que diz respeito aos ensaios, dividiram-se em três fases incluindo ensaios de flexão estática, vibração longitudinal e vibração transversal, sendo este último de pouca relevância para o presente estudo.

O ensaio de vibração longitudinal caracteriza-se pela colocação de um acelerómetro na base dos toros que regista a velocidade da onda provocada pelo impacto de um martelo na outra ponta da peça, necessária ao cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. O ensaio de flexão estática incidiu na utilização do *Metriguard Model 312* que consiste na aplicação de uma carga a meio vão de 445N e na medição da correspondente deformada, conduzindo ao cálculo do módulo de elasticidade estático.

Os teores de água apresentaram uma variação entre 31% a 65% e 88% a 145% na amostra 1 e 2, respetivamente. Quanto à massa volúmica da amostra 1 variou entre 460 kg/m³ a 860 kg/m³, por sua vez na amostra 2 verificaram-se valores a variar entre 770 kg/m³ a 900 kg/m³. O ensaio de vibração longitudinal deu origem à melhor estimativa do módulo de elasticidade estático, tendo-se obtido valores médios do módulo de elasticidade dinâmico de 5,58 GPa e 5,52 GPa na amostra 1 e 2, respetivamente.

Recorrendo a análises de regressão, relacionaram-se as propriedades medidas nos diferentes ensaios com o módulo de elasticidade estático das duas espécies. Focando os resultados nos ensaios de flexão estáticos e nos ensaios de vibração longitudinal, reparou-se que a amostra 2 (R=0,87) possuiu um coeficiente de correlação superior ao da amostra 1 (R=0,77), embora sejam os dois bastante satisfatórios.

No Chile, devido a um aumento significativo da plantação de Chilean radiata pine, os produtores investigaram novas aplicações deste material, surgindo assim a ideia de utilizar esta espécie em postes de redes de distribuição. A ANSI 05.1 identifica os requisitos necessários para o reconhecimento da viabilidade desta espécie para este tipo de aplicação, em termos da resistência à flexão dos elementos, e foi sobre esta norma que se debruçou o estudo de Cerda e Wolfe (2003). A amostra do estudo corresponde a 45 postes com 12 metros de comprimento e mediram-se características como o adelgaçamento e a massa volúmica assumindo valores

médios de 2,5% e 440kg/m^3 , respetivamente. Os postes foram ensaiados em condição saturada e a condição imposta pela norma relativamente aos anéis de crescimento também se verificou.

A carga aplicou-se a 0,6m do topo do poste em incrementos de 500 N, as deformações retiraram-se manualmente após cada incremento de carga e a duração de cada ensaio de rotura variou entre 5 e 15 minutos, segundo o esquema de ensaio ilustrado na Figura 2.4. Praticamente todas as roturas se verificaram em zonas com presença de nós, sendo que todas as roturas que se deram a 1m acima da linha terra evidenciaram presença de nós. Os valores médios da resistência à flexão e do módulo de elasticidade alcançados foram de 52MPa e 10,5GPa, respetivamente, conferindo à espécie em estudo os requisitos de admissibilidade para a utilização em postes de distribuição de linhas aéreas.



Figura 2.4 – Metodologia do ensaio de resistência à flexão (Cerde e Wolfe, 2003)

Prieto, E. *et al.* (2007) estudou a aplicação dos ultrassons na avaliação das propriedades mecânicas de madeira circular de pequeno diâmetro, referente à espécie Pinho larício (*Pinus nigra*) proveniente dos Montes de Cuenca.

A amostra total correspondeu a um total de 445 toros com diâmetros finais de 8, 10, 12 e 14 centímetros, e após a realização dos ensaios não destrutivos avaliou-se a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a massa volúmica de cada peça. O comprimento dos toros ensaiados foi variado consoante o diâmetro, assim para peças com 8, 10 e 12 centímetros de diâmetro o comprimento correspondente foi de 2, 2,5 e 3 metros, respetivamente. No caso de toros com 14 centímetros de diâmetro o comprimento foi de 2,5 e 3 metros.

Os resultados obtidos para a totalidade da amostra, foram para a massa volúmica e a resistência à flexão média e característica $462,2\text{ kg/m}^3$, $398,1\text{ kg/m}^3$, 41,2MPa e 24,6MPa, respetivamente. Por sua vez, o módulo de elasticidade calculado foi de 7,10 GPa.

Vidor (2011) avaliou a vida útil de postes de madeira de eucalipto em serviço em redes de distribuição de energia elétrica. O estudo consistiu na reavaliação de mais de 9 mil postes no estado do Rio Grande do Sul (Brasil) que já tinham sido inspecionados entre 2001 e 2006, com o intuito de averiguar a evolução do seu processo de deterioração e a perda de resistência mecânica. Selecionaram-se 77 postes que foram submetidos a ensaios de resistência mecânica e determinaram-se a resistência à flexão dinâmica e o módulo de elasticidade à flexão dinâmica. As inspeções efetuadas permitiram estabelecer um diagnóstico do estado de conservação dos postes, constatando-se que mais de 60% encontravam-se em bom estado de conservação.

Aproximadamente 98% dos postes ensaiados apresentavam comprimentos de 9 metros e 11 metros e foram submetidos a tratamento à base de CCA e Creosote. Na falta de normalização específica para postes usados seguiram-se as metodologias da NBR 6231 e NBR 8456, que consiste no encastramento dos postes na zona próxima da base e na aplicação de uma carga a 30 centímetros do topo (Figura 2.5).

Os valores médios da resistência à flexão não apresentaram variação significativa tendo em conta os comprimentos, apresentando 34,8 MPa e 33,2 MPa para os postes de 9 metros e 11 metros, respetivamente. Por sua vez, o valor médio do módulo de elasticidade sofreu um aumento de aproximadamente 40% com o aumento do comprimento dos postes, ou seja obtiveram-se valores de 11859MPa e 16861MPa para os postes de 9 metros e 11 metros, respetivamente.

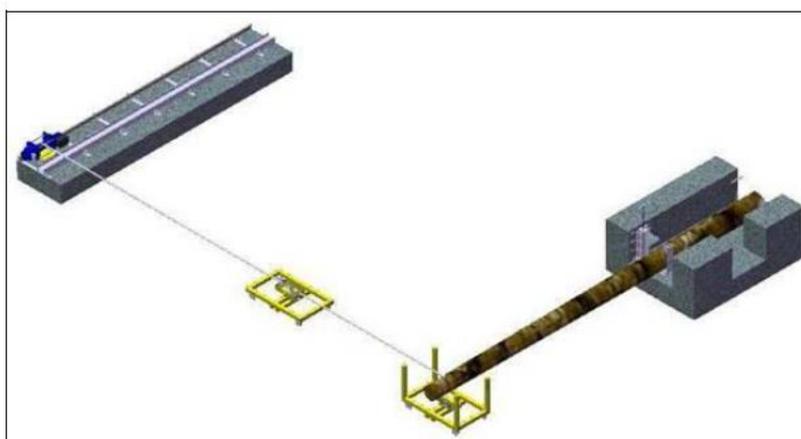


Figura 2.5 – Esquema do sistema de flexão dos postes (Vidor, 2011)

Em Torrán, E.A. *et al.* (2009) apresentaram-se os resultados de uma investigação que consistiu na determinação da resistência e rigidez de postes da espécie *Eucalyptus grandis* da Argentina. A amostra dividiu-se em duas componentes ensaiadas separadamente, a primeira amostra constituída por 57 postes de 12 metros de comprimento e retirados da plantação com 14 anos

de idade, na zona de Concordia. Por sua vez, a segunda amostra correspondeu a 48 postes de 8 metros de comprimento e 11 anos de idade. Os elementos de estudo não possuíam qualquer tipo de tratamento e na altura do ensaio encontravam-se saturados com teor de água médio de 45% e 47% para a amostra 1 e 2, respetivamente. A massa volúmica determinada apresentou um valor médio de 707 kg/m^3 e 682 kg/m^3 para a amostra 1 e 2, respetivamente. O procedimento de ensaio adotada seguiu a ASTM 1036 (2005) e a IRAM 9529 (2004). Relativamente ao esquema de ensaio (Figura 2.6), os postes foram encastrados a 1,8m e 1,4m da base na amostra 1 e 2, respetivamente, por sua vez, o ponto de aplicação da carga encontrava-se a 0,60m do topo do poste em ambos os casos.

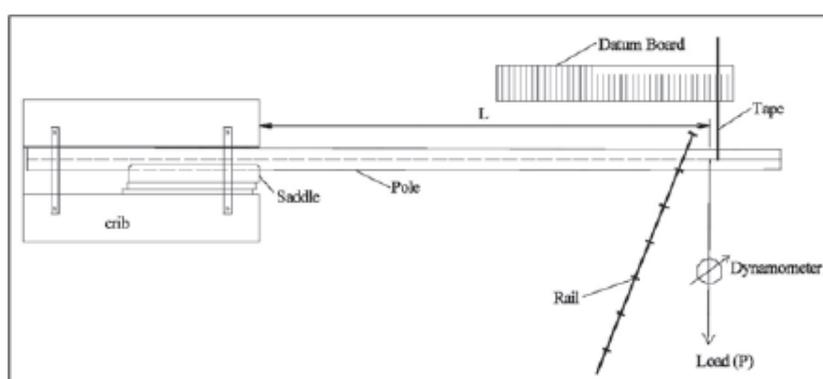


Figura 2.6 – Esquema de ensaio (Torrán, E.A. et al., 2009)

Primeiramente, identificaram-se as características visuais dos postes antes de proceder aos ensaios mecânicos, como o adelgaçamento, comprimento, a inclinação das fibras e o crescimento anual dos anéis. O valor médio da tensão de rotura foi de 62,9MPa e 56,3MPa para a amostra 1 e 2, respetivamente. Por outro lado, o valor médio do módulo de elasticidade alcançou os 10,935GPa e 9,546GPa para a amostra 1 e 2, respetivamente. O módulo de elasticidade e a tensão de rotura foram correlacionadas e o coeficiente de correlação obtido foi de 0,52 e 0,37 para a amostra 1 e 2, respetivamente.

TTT Products Limited (2012) apresentou um mecanismo desenvolvido com o intuito de classificar postes da espécie *New Zealand radiata pine*, através de ensaios baseados nas propriedades mecânicas dos postes. Este mecanismo permite a avaliação de propriedades como o módulo de elasticidade, a resistência à flexão e a carga última aplicada no topo do elemento. A amostra ensaiada encontrou-se em condição saturada e determinou-se um valor característico da resistência à flexão de 38MPa e um valor médio do módulo de elasticidade de 8,7GPa.

3 AVALIAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA

3.1 Introdução

Este capítulo diz respeito a toda a análise das propriedades dos postes, desde a fundamentação teórica necessária para a obtenção de resultados até à descrição pormenorizada e explicação de cada característica analisada.

A madeira retirada das florestas antes de se tornar num poste, é submetida a várias etapas. Primeiramente selecionam-se as árvores a cortar e posteriormente transportam-se para a empresa. Aqui dá-se o descasque dos elementos e colocam-se em esteiras (Figura 3.1), que são pilhas organizadas, de modo a que sequem para posteriormente seguirem para tratamento. No entanto, por vezes após a fase de descasque são colocados em estufas próprias para acelerar o processo de secagem. Por fim, aplica-se um tratamento preservador que lhes confere um aumento de durabilidade.

A amostra de postes selecionados divide-se em dois grupos: i) postes novos em condição verde (com teor de água acima do ponto de saturação das fibras, 24%) e ii) postes usados que foram retirados de serviço das linhas de telecomunicações da Portugal Telecom devido a rotura ou sinais claros de degradação acentuada.

O primeiro passo deste trabalho consistiu na escolha de 43 postes novos e 20 postes usados de uma forma faseada (Figura 3.2), uma vez que a fiabilidade dos resultados obtidos para postes novos é dependente do ponto de saturação das fibras, que segundo a Ficha M2 (LNEC, 1997) tem de ser superior a 24%. Logo, se a amostra fosse selecionada de uma só vez corria-se o risco de esta condição não se verificar, impossibilitando a realização dos ensaios. Portanto, dividiu-se a amostra de postes novos em três fases de vinte, doze e onze postes, respetivamente, enquanto que a sequência de ensaios dos postes usados realizou-se de uma só vez, garantindo a análise de todas as propriedades, desde a classificação visual até à rotura, num intervalo de tempo aceitável.



Figura 3.1 – Postes em esteira



Figura 3.2 – Postes selecionados para a amostra

A comparação de postes de diferentes localizações geográficas era um dos objetivos na seleção de postes, contudo dada a quantidade de madeira que é diariamente cortada em floresta não foi possível saber a proveniência exata de cada poste. No entanto, tendo em conta a seleção faseada de postes, pode-se considerar que a amostra representa o Pinheiro bravo existente na floresta nacional, tendo como base a intervenção da empresa envolvida no estudo.

Antes de proceder à classificação visual e aos ensaios referidos neste estudo, analisaram-se três características à priori que permitem “pré-selecionar” os postes, visto que não cumprindo estes requisitos, segundo a EN14229 (CEN, 2010), são automaticamente rejeitados. Essas características são o diâmetro nominal na linha terra, a curvatura e o comprimento do poste. Com o intuito de determinar características visuais como a ovalidade, o adelgaçamento e a massa volúmica, retiraram-se ainda os diâmetros máximos e mínimos na base, linha terra, a quinze centímetros do topo (ponto de aplicação da carga no ensaio normalizado) e no topo de cada poste.

Alguns ensaios não destrutivos podem ser uma ótima solução nesta indústria porque são de fácil e rápida execução e não envolvem custos significativos, como é o caso do ensaio de vibração longitudinal. A classificação visual, que se trata de uma metodologia mais demorada, e o ensaio de carga estática, constituem os restantes ensaios não destrutivos adotados neste estudo.

Seguidamente, através da máquina desenvolvida pela empresa, realizaram-se ensaios de carga estática com vista à determinação do módulo de elasticidade simplifica. Por fim, recorrendo a um mecanismo desenvolvido pela empresa, que se encontra em conformidade com os requisitos da EN14229 (CEN,2010), ensaiou-se cada poste faseadamente, primeiro para determinar o módulo de elasticidade estático e, finalmente, a resistência à flexão levando-os à rotura.

Finalizados os ensaios foram retiradas rodela de cada poste, com auxílio de uma moto serra, o mais próximo possível da zona de rotura, na base e no topo. Através da análise das rodela em laboratório, determinaram-se não só os teores de água e as massas volúmicas, mas também as taxas de crescimento na base e no topo para a totalidade da amostra.

3.2 Classificação Visual

A classificação visual de postes de madeira pretende seleccionar a madeira através das suas características visuais de relevância e deve incorporar, segundo a EN14229 (CEN, 2010), parâmetros que podem influenciar as propriedades do material, tais como:

- Diâmetro nominal na linha-terra e no ponto de aplicação da carga
- Ovalidade
- Adelgaçamento
- Nós ou conjunto de nós
- Inclinação das fibras
- Percentagem de cerne
- Taxa de crescimento
- Curvatura
- Bolsas de resina
- Danos mecânicos
- Ataques de insetos
- Fissuras e fendas

No entanto, alguns destes parâmetros não foram analisados devido à sua inexistência, como é o caso das bolsas de resina, a percentagem de cerne, os danos mecânicos, os ataques de insetos e as fissuras e fendas.

Para efeitos de ensaio, relativamente ao comprimento dos postes, a norma refere que deve balizar-se entre os 8 a 10 metros, e que o desvio permitido é de -1% a 2%. Como os postes têm na sua grande maioria 8 metros, e os que não têm cumprem os desvios impostos, pode dizer-se que a amostra encontra-se em conformidade.

No que diz respeito ao diâmetro nominal a 1,5m da base, ou seja na linha terra, a norma refere um intervalo admissível entre 180mm a 220mm (Quadro 3.1). O diâmetro nominal é calculado, segundo a norma, tendo em conta a ovalidade, ou seja, se a ovalidade for superior a 5% o diâmetro nominal corresponde ao diâmetro mínimo medido com recurso a um paquímetro (Figura 3.3), por sua vez se a ovalidade for inferior a 5% o diâmetro nominal é calculado com base no perímetro da secção em estudo medido com o auxílio de uma fita métrica.

Quadro 3.1 – Valores do diâmetro nominal medido na Linha terra

	Diâmetro nominal - Linha terra (mm)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	181	220	196	10
Postes Usados	156	206	178	15



Figura 3.3 – Exemplo ilustrativo da medição de diâmetros através de um paquímetro

Outro dos aspetos visuais que entra no estudo quando se classifica visualmente um poste é a curvatura. Este parâmetro condiciona a seleção dos postes segundo a EN14229 (CEN, 2010), que prevê para o caso da curvatura simples um desvio máximo de 1% da distância entre o ponto onde a curvatura é máxima e o segmento de reta balizado entre a linha terra e o topo. Na maioria dos casos o desvio máximo permitido foi de 6,5cm visto que os postes ensaiados têm aproximadamente 6,5m entre a linha terra e o topo. Por outro lado, perante um poste com curvatura dupla deve ser possível estabelecer uma linha reta entre a linha terra e o topo sem que essa linha exceda os limites do mesmo (Figura 3.4). A avaliação da curvatura foi efetuada recorrendo a um fio de nylon, fixo entre as seções pretendidas, e um paquímetro para averiguar a condição supracitada.

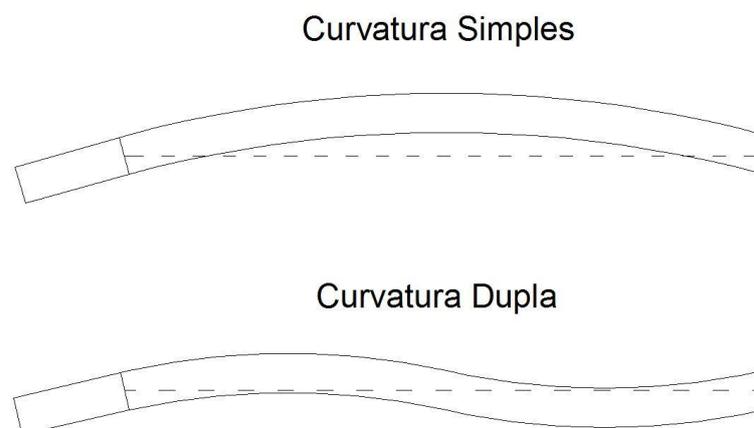


Figura 3.4 – Critérios de medição da curvatura dos postes

Concluída a fase de pré-seleção tendo em conta o comprimento, o diâmetro nominal na linha-terra e a curvatura, seguiu-se uma classificação visual mais pormenorizada que aborda características como a ovalidade, adelgaçamento, inclinação das fibras, taxa de crescimento, teor de água e massa volúmica. Como já foi referido na introdução deste capítulo, primeiramente retiraram-se os diâmetros, mínimos e máximos, na base, na linha terra, a 0,15m do topo e no topo de cada poste.

Estes dados permitem o cálculo da ovalidade (Equação (2)), que consiste na diferença entre o diâmetro máximo e mínimo, dividida pelo diâmetro mínimo da seção em estudo e expressa em percentagem. Este parâmetro determinou-se para a secção da linha terra (Quadro 3.2) e para a secção de aplicação da carga (Quadro 3.3), a quinze centímetros do topo segundo a EN14229 (CEN, 2010), com o objetivo de determinar o método de cálculo do diâmetro nominal. Através da ovalidade é possível avaliar a assimetria da seção transversal relacionada com o crescimento da madeira.

$$Ovalidade (\%) = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{min}} * 100 \quad (2)$$

Quadro 3.2 – Valores da ovalidade medida na Linha terra

	Ovalidade - Linha terra (%)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	2,2	9,8	5,2	2,2
Postes Usados	1,7	12,7	5,9	2,4

Quadro 3.3 – Valores da ovalidade medida no ponto de aplicação da carga

	Ovalidade - Ponto de aplicação da carga (%)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	1,8	11,0	5,1	2,0
Postes Usados	1,4	8,3	5,3	1,8

O adelgaçamento é o parâmetro que quantifica o estreitamento do poste, neste caso desde a linha terra até ao ponto de aplicação da carga. Este parâmetro é calculado pela diferença entre o diâmetro médio na linha terra e o diâmetro médio na seção de aplicação da carga, dividindo pela distância entre as duas seções (Equação (3)). Quer o diâmetro médio na linha terra, quer o diâmetro médio no ponto de aplicação da carga obtêm-se segundo a média entre o diâmetro mínimo e máximo dessas seções. No Quadro 3.4 apresentam-se os valores do adelgaçamento dos postes novos e dos postes usados.

$$\text{Adelgaçamento (mm/m)} = \frac{d_{med,LT} - d_{med,q}}{l_{LT-q}} \quad (3)$$

Quadro 3.4 – Valores do adelgaçamento dos postes

	Adelgaçamento (mm/m)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	4,1	13,8	8,2	2,5
Postes Usados	4,1	12,3	6,9	1,9

Cortando uma fatia de um poste observa-se a seção transversal constituída por vários anéis de forma aproximadamente circular, denominados anéis de crescimento (Figura 3.5). Estes anéis estão relacionados com a idade da árvore e são constituídos por duas zonas distintas, uma mais escura e uma mais clara que correspondem ao crescimento da árvore no período de Outono/Inverno e Primavera/Verão, respetivamente. Para analisar o crescimento da árvore determina-se a taxa de crescimento, que segundo a norma corresponde à quantidade de anéis de crescimento por 25mm. Para cada fatia, contaram-se os anéis segundo a maior linha radial iniciando-se a medição após 50mm do exterior da medula (Figura 3.6). No entanto, para diâmetros nominais inferiores a 150mm a medição foi iniciada na medula, como indica a norma, ao longo da maior linha radial. A taxa de crescimento foi calculada para duas seções em cada poste: na base (Quadro 3.5) e no topo (Quadro 3.6). Esta análise foi realizada para as respetivas rodelas que foram retiradas após cada ensaio de rotura.

Quadro 3.5 – Valores da taxa de crescimento medida em rodelas provenientes da base dos postes

	Taxa de crescimento - Base (nº de anéis/25mm)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	4,2	21,8	13,0	4,2
Postes Usados	4,2	22,2	9,0	4,5

Quadro 3.6 – Valores da taxa de crescimento medida em rodelas provenientes do topo dos postes

	Taxa de crescimento - Topo (nº de anéis/25mm)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	2,4	22,2	9,8	4,4
Postes Usados	2,9	15,3	6,9	3,0



Figura 3.5 – Seção transversal de um poste e respetivos anéis de crescimento

Figura 3.6 – Procedimento que viabiliza a avaliação da taxa de crescimento

O fio da madeira corresponde à inclinação das fibras ao longo do eixo longitudinal do tronco (Figura 3.7) e define-se como uma característica visual fundamental, na medida em que condiciona todo o comportamento da peça incluindo a capacidade resistente (Cachim, 2014). Por vezes, a orientação das fibras assume uma forma helicoidal, alternativamente à habitual forma retilínea, esta é influenciada pelo processo de crescimento da árvore.



Figura 3.7 – Pormenor da medição da inclinação das fibras numa zona próxima da rotura

A averiguação desta característica nem sempre é de fácil medição. Decidiu-se portanto conduzir a medição após o ensaio de resistência à flexão, numa zona próxima da rotura onde fosse visível a fissuração das fibras, tendo-se medido a inclinação para um troço de 10cm, procedendo-se posteriormente a uma extrapolação para um troço de 1m (Quadro 3.7).

Quadro 3.7 – Valores da inclinação das fibras extrapolados para 1m

	Inclinação das fibras (mm/m)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	15,0	175,4	60,3	29,9
Postes Usados	15,0	135,0	41,5	28,3

3.3 Classificação de postes recorrendo a ensaios não destrutivos

3.3.1 Introdução

Com o avançar da tecnologia e da precisão dos resultados, os ensaios não destrutivos ganharam alguma influência em aplicações relacionadas com a construção civil, pois permitem analisar o estado de qualquer material sem o danificar mesmo que já esteja em utilização. O objetivo destes ensaios consiste na obtenção do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade simplificado, comparando-o com as propriedades mecânicas normalizadas, como o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão, de modo a perceber a utilidade que este parâmetro pode fornecer na classificação dos postes, através das correlações entre ambos.

Neste subcapítulo é explicitada a base teórica dos ensaios realizados bem como os resultados que deles provêm. Existem inúmeros métodos de ensaios não destrutivos possíveis de efetuar em função das propriedades desejadas, por conseguinte neste estudo apenas se realizou o ensaio de vibração longitudinal e o ensaio de carga estática.

3.3.2 Ensaio de Vibração Longitudinal

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, baseado no ensaio de vibração longitudinal, obtém-se segundo a condição de todos os materiais possuírem uma frequência própria de vibração, que depende da massa e da rigidez do elemento a analisar. Em Clough e Penzien (1993) mostra-se que considerando elementos prismáticos com propriedades uniformes ao longo do comprimento, a análise de vibrações livres associada a deformações axiais traduz-se na equação (4):

$$EA \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} - \bar{m} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

Onde EA representa a rigidez axial, \bar{m} a massa por unidade de comprimento e $u(x, t)$ a função deslocamento ao longo do eixo longitudinal.

Na altura do ensaio, cada elemento encontrava-se simplesmente apoiado e livre nas extremidades, por conseguinte resolvendo a equação (4) é possível relacionar o módulo de elasticidade dinâmico, proveniente do ensaio de vibração longitudinal, com a frequência própria de vibração, para os vários modos de vibração, através da equação (5):

$$f = \frac{n}{l \times 2} \times \sqrt{\frac{E_{dyn} \times l}{\rho}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem ao módulo de elasticidade dinâmico para o 1º modo de vibração obtém-se a equação (6):

$$E_{dyn} = 4 \times l^2 \times f^2 \times \rho \text{ [GPa]} \quad (6)$$

Em que “l” representa o comprimento total do poste (m), “f” a frequência do 1º modo de vibração (Hz) e “ρ” a massa volúmica (kg/m³).

O ensaio de vibração longitudinal efetuou-se com os postes dispostos em esteira sem estarem em contato uns com os outros, em condição simplesmente apoiada e livre nas extremidades. A distância medida entre os apoios que formam a esteira foi de aproximadamente 5,50m. Os módulos de elasticidade dinâmicos dos postes novos e usados, determinaram-se com equipamentos diferentes devido a indisponibilidade de material na altura dos ensaios. A frequência de vibração dos postes novos mediu-se recorrendo ao aparelho Timber Grader MTG

da *Brookhuis*, enquanto que a frequência de vibração relativa aos postes usados foi determinada através de um acelerómetro piezoelétrico (Figura 3.8), em que a conversão da informação recebida efetuou-se com recurso a um computador portátil, ao equipamento *NI USB-4431* (Figura 3.9) e ao programa *LabView Signal Express* da *National Instruments*.

O ensaio de vibração longitudinal, efetuado através do acelerómetro piezoelétrico, consiste na aplicação de uma pancada com um martelo, no topo do poste, que permite ao acelerómetro piezoelétrico, colocado na base, recolher o sinal que é transmitido para o computador que, através do programa, torna possível a medição a frequência de vibração do elemento.



Figura 3.8 – Metodologia do ensaio de vibração longitudinal com utilização do acelerómetro piezoelétrico



Figura 3.9 – Equipamento NI USB-4431 (<http://www.smartechconsulting.com>)

Em alguns casos, analisando os dados obtidos, torna-se possível distinguir o primeiro e o segundo modo de vibração, embora o primeiro seja o modo relevante para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Frequência do 1º modo de vibração através do acelerómetro piezoelétrico

Por sua vez, o ensaio realizado com o MTG (Figura 3.11) requer também uma pancada de martelo, no entanto aplicada na base junto ao aparelho de medição, conferindo a este ensaio maior rapidez de execução, embora não seja muito significativa, comparativamente ao método no qual se utiliza o acelerómetro piezoelétrico. Para cada pancada, este aparelho forneceu um valor da frequência de vibração, tendo-se registado várias leituras até se obter a repetição do mesmo valor três vezes.



Figura 3.11 - Metodologia do ensaio de vibração longitudinal com utilização do MTG

Como as diferenças entre o MED (módulo de elasticidade dinâmico), determinado com base na massa volúmica com teor de água de 12%, e o MED, calculado através da massa volúmica saturada, são insignificantes quando correlacionadas com o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão, no capítulo 4 analisou-se o módulo de elasticidade dinâmico com base na massa volúmica saturada determinada em laboratório (Quadro 3.8).

Quadro 3.8 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico recorrendo ao ensaio de vibração longitudinal

	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	8,1	19,7	11,3	2,4
Postes Usados	7,9	15,5	11,4	2,0

Na equação (6) é possível averiguar que o módulo de elasticidade dinâmico depende não só da frequência de vibração, mas também do comprimento e da massa volúmica do poste. O ensaio visou a determinação da frequência própria de vibração dos postes, por sua vez a massa obteve-se no ensaio de carga estática e o volume com base no adelgaçamento linear.

A massa volúmica traduz-se como a razão entre a massa e o volume do elemento em causa, como tal estas são as características a determinar. A massa é um dado fornecido pelo ensaio de carga estática uma vez que a medição deste parâmetro corresponde ao procedimento inicial do ensaio, antes da aplicação da carga. Pelo método aproximado, o volume calcula-se com base nos diâmetros médios, entre o mínimo e o máximo, na base e no topo, considerando um adelgaçamento constante (Figura 3.12).

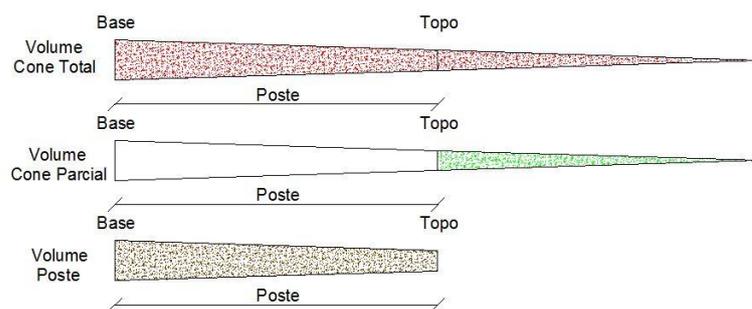


Figura 3.12 – Avaliação do volume dos postes através do método aproximado

No Quadro 3.9 apresentam-se os valores da massa volúmica determinada através do método aproximado para os postes novos e usados.

Quadro 3.9 – Valores da massa volúmica determinada através do método aproximado

	ρ método aproximado (kg/m^3)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	615,6	1212,1	999,8	150,8
Postes Usados	365,3	849,7	659,4	131,5

Para além do MED calculado através da massa volúmica dos postes em condição saturada determinada em laboratório, estudou-se também a análise do MED obtido através da massa volúmica calculada através do método simplificado (Quadro 3.10).

Quadro 3.10 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico recorrendo ao método aproximado

	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	8,2	22,8	13,6	2,6
Postes Usados	7,0	18,4	11,6	2,7

3.3.3 Ensaio de carga estática

Como já foi referido anteriormente, a classificação de postes é um processo bastante recente e que se encontra em desenvolvimento. A caracterização formal dos postes requer um ensaio normalizado de acordo com a EN14229 (CEN,2010), como tal concebeu-se a máquina de ensaio respeitando e tornando-a o mais semelhante possível. No entanto, existem algumas diferenças provenientes de ajustes necessários, com o intuito de aperfeiçoar o processo aquando da realização dos ensaios.

Este ensaio permite avaliar o módulo de elasticidade simplificado de cada poste. Como este processo de classificação ainda se encontra numa fase inicial, realizaram-se ensaios experimentais segundo duas metodologias distintas, e calcularam-se vários módulos de elasticidade simplificados, variando as propriedades medidas fornecidas não só pela máquina, mas também pela classificação visual.

O Quadro 3.11 apresenta alguns resultados obtidos deste ensaio, tomando o módulo de elasticidade simplificado o valor médio de 7,9 GPa e 8,4 GPa para os postes novos e usados, respetivamente.

Quadro 3.11 – Valores do módulo de elasticidade simplificado recorrendo ao ensaio de carga estática

	Módulo de elasticidade simplificado (GPa)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	5,6	14,4	7,9	1,7
Postes Usados	5,4	11,7	8,4	1,8

3.4 Classificação de postes segundo a EN14229

3.4.1 Introdução

Neste capítulo, analisam-se duas propriedades mecânicas da espécie estudada, obtidas em conformidade com a EN14229 (CEN, 2010), não só ao nível do esquema de ensaio mas também ao nível de apresentação de resultados obtidos. Essas propriedades são o módulo de elasticidade e a resistência à Flexão, ensaiadas respeitando uma condição de apoio encastrada e sujeitas a um carregamento que origina esforços de flexão. A amostra total, que corresponde a 43 postes novos e 20 postes usados, foi submetida a ambos os ensaios mas a análise de resultados foi elaborada separadamente.

3.4.2 Esquema de montagem do Ensaio

O módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão são obtidos experimentalmente, adotando o disposto na EN14229 (CEN, 2010), apresentando apenas algumas diferenças impostas por necessidades de aquisição de dados exigidas pela norma.

Utilizando um empilhador, os postes foram colocados individualmente na posição de ensaio. Cada poste a ensaiar foi encastrado a 1,5m da base, simulando a sua posição de serviço, recorrendo a um sistema hidráulico que impede qualquer tipo de movimento na zona em causa. Este sistema hidráulico é constituído por blocos de madeira na superfície de contato, que ao apertar encaixam perfeitamente no poste sem o danificar (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Pormenor do encastramento dos postes nos ensaios do módulo de elasticidade estático e da resistência à flexão

A posição de ensaio é outro dos aspetos a respeitar, encontra-se diretamente relacionada com a curvatura que foi definida durante a classificação visual. A posição de ensaio foi marcada na base do poste, que corresponde à direção de aplicação da carga, submetendo as fibras da face exterior da curvatura a esforços de tração. Também em Vries, P. *et al.* (2006) refere que os postes circulares de madeira têm alguma curvatura inicial, identificando este aspeto como uma dificuldade relativa ao posicionamento do poste no ensaio, mas sem referências específicas à solução adotada.

A carga é aplicada a 150mm do topo do poste através de um cabo de aço posicionado perpendicularmente ao eixo longitudinal do poste. A fixação do cabo ao poste é conseguida através da utilização de um par de peças de madeira apertadas contra o poste e encaixadas numa estrutura metálica auxiliar. Tendo em conta a deformação existente no poste ao longo do ensaio, para a obtenção do módulo de elasticidade estático do poste é feita a medição dos deslocamentos na direção longitudinal e perpendicular ao poste (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Aplicação da carga durante o ensaio de resistência à flexão

Esta fase do exercício experimental requer material específico (Figura 3.15) como é o caso da célula de carga VETEK de 10 tf de capacidade que mede a carga a que o elemento é sujeito, o defletómetro TML SDP-200D e o defletómetro de fio TML DP-1000E que medem os deslocamentos impostos, e o Data Logger TDS-530 que trata da aquisição de dados.



Figura 3.15 – Material de ensaio (esquerda para a direita): defletómetro TML SDP-200D; defletómetro de fio TML DP-1000E; Data Logger TDS-530 (<http://tml.jp>); célula de carga VETEK de 10 tf

3.4.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de Elasticidade é uma propriedade mecânica que traduz a rigidez do material e resulta de uma relação entre tensões e deformações. Segundo a norma, o cálculo realiza-se respeitando a teoria da elasticidade, ou seja, as deformações impostas por tensões de valor reduzido são completamente recuperáveis quando se descarrega o poste.

Os ensaios realizaram-se tendo em conta o esquema de ensaio referido anteriormente e no caso do módulo de elasticidade, como está implícito na Norma Europeia EN14229, a carga deve ser aumentada constantemente até cerca de 30% da capacidade máxima prevista do poste. O

procedimento deve respeitar um intervalo de tempo de 90 ± 30 segundos e um mínimo de 30 medições força-deslocamento. A velocidade do ensaio foi programada, garantindo as condições impostas, para um deslocamento na direção perpendicular às fibras de 200mm, medido pelo defletómetro TML SDP-200D.

A equação (7) utilizou-se para o cálculo do módulo de elasticidade, segundo o Anexo C da EN14229 (CEN, 2010).

$$E = \frac{Q(l - l_g - l_q - (s_a - s_0))^3 d_q^3}{3I_q(t_a - t_0)d_g^3} \quad (7)$$

A elevada quantidade de dados retirados em cada ensaio, onde a cada leitura de carga está associada uma leitura de deformação, enaltece a necessidade da realização de uma otimização da equação (7) através do método dos mínimos quadrados, permitindo obter o melhor ajuste para o conjunto de dados (Equação (8)).

$$D = \frac{Q(l - l_g - l_q - (s_a - s_0))^3}{(t_a - t_0)} \quad (8)$$

Este ajuste consiste na determinação do declive (D) da reta força-deslocamento, o que posteriormente permite o cálculo do módulo de elasticidade através da equação (9).

$$E = D \frac{d_q^3}{3I_q d_g^3} \quad (9)$$

A Figura 3.16 e a Figura 3.17 apresentam as distribuições percentuais do módulo de elasticidade estático obtidos não só para os postes novos, mas também para os postes usados.

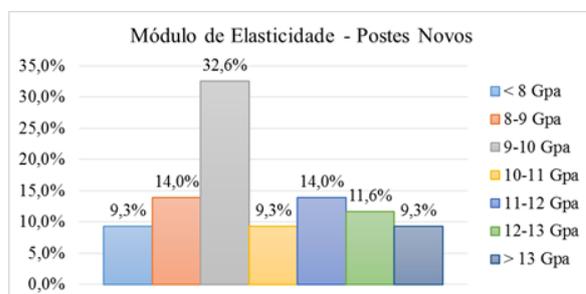


Figura 3.16 – Distribuição percentual do módulo de elasticidade estático (Postes Novos)

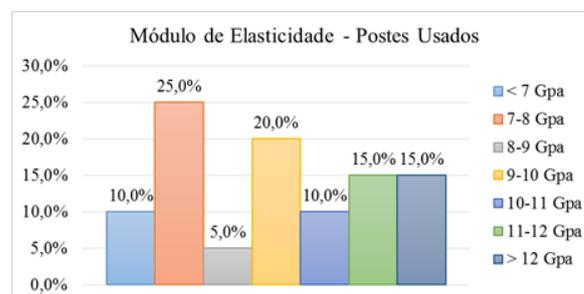


Figura 3.17 – Distribuição percentual do módulo de elasticidade estático (Postes Usados)

O módulo de elasticidade estático dos postes novos refere o intervalo de 9 GPa a 10 GPa como intervalo dominante com aproximadamente 33% dos postes ensaiados. Mas analisando os postes usados, repara-se que embora o intervalo dominante seja entre 7 GPa e 8 GPa, há uma quantidade da amostra considerável entre 9 GPa e 10 GPa. O valor médio obtido para o módulo de elasticidade dos postes novos e usados foi 10,5 GPa e 9,5 GPa, respetivamente (Quadro 3.12). Nota-se portanto uma quebra do módulo de elasticidade estático da amostra de postes retirados de serviço de aproximadamente 10%, no entanto a amostra de postes usados é relativamente reduzida.

Quadro 3.12 – Valores do módulo de elasticidade estático dos postes recorrendo ao ensaio disposto na EN14229 (CEN, 2010)

	Módulo de elasticidade estático (GPa)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	7,0	17,0	10,5	2,1
Postes Usados	5,5	13,2	9,5	2,1

3.4.4 Resistência à flexão

A resistência à flexão da madeira, do ponto de vista do dimensionamento, é uma das características mais importantes a determinar, visto ser através do seu valor característico que se procede ao dimensionamento. Assim, a resistência à flexão assume um papel importante no estudo das propriedades dos postes de madeira, uma vez que a abordagem incide na análise de elementos encastrados e sujeitos a esforços de flexão.

O esquema de ensaio utilizado para a determinação do módulo de elasticidade é semelhante ao usado para a resistência à flexão, iniciando-se o ensaio de resistência à flexão logo após a descarga do ensaio do módulo de elasticidade. A EN14229 (CEN, 2010), refere que o ensaio deve ocorrer com um aumento de carga constante, garantindo o procedimento num intervalo de tempo de 300 ± 120 segundos. A determinação desta característica relaciona-se com a medição da carga aplicada perpendicularmente ao poste, a 15cm do topo, e o registo do deslocamento induzido na direção paralela ao elemento, através da equação (10). O ensaio de resistência à flexão exige que o poste seja sujeito à sua capacidade máxima e, por conseguinte, levado à rotura.

$$f_m = \frac{32Q(l - l_{max} - l_q - (s_a - s_0))}{\pi d_{max}^3} \quad (10)$$

A Figura 3.18 e a Figura 3.19 apresentam as distribuições percentuais da resistência à flexão obtidos não só para os postes novos, mas também para os postes usados.

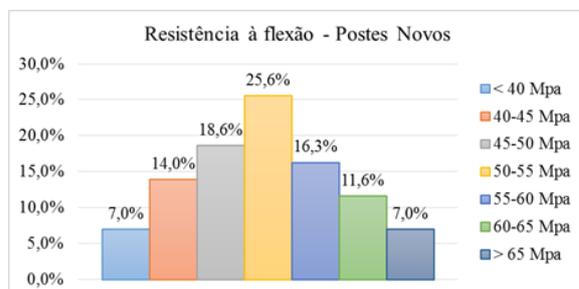


Figura 3.18 – Distribuição percentual da resistência à flexão (Postes Novos)

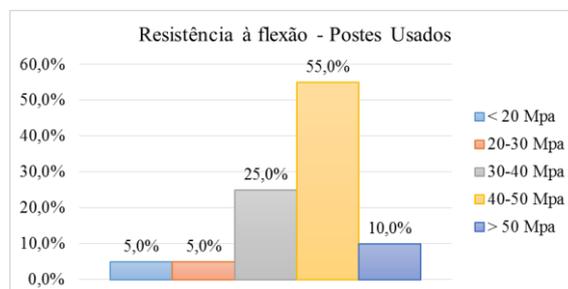


Figura 3.19 – Distribuição percentual da resistência à flexão (Postes Usados)

A resistência à flexão dos postes novos encontra-se, em aproximadamente 60% da amostra, balizada entre 45Mpa e 60Mpa, com um valor médio de 51,9 MPa. Por outro lado, 80% dos postes usados apresentam valores de resistência à flexão entre 30 MPa e 50 MPa, apresentando um valor médio de 40,7 MPa (Quadro 3.13).

Quadro 3.13 – Valores da resistência à flexão dos postes recorrendo ao ensaio disposto na EN14229 (CEN, 2010)

	Resistência à flexão (MPa)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
Postes Novos	30,3	77,2	51,9	8,9
Postes Usados	11,6	63,5	40,7	11,4

Também dos resultados da resistência à flexão se pode observar a redução das propriedades da amostra de postes novos para postes usados, o que dá a ideia da degradação das propriedades com o período de serviço. A norma adotada aborda também a necessidade de registar o tipo e a localização da rotura obtida após o ensaio. A presença de nós na zona da rotura foi um dos aspetos averiguados, constatando-se que em cerca de 86% e 70% dos casos existiam nós na localização da rotura nos postes novos e usados, respetivamente. A esmagadora maioria das roturas, quer em postes novos quer em postes usados, deu-se por tração (Figura 3.20), no entanto tornou-se possível observar, embora em poucos postes, roturas por compressão (Figura 3.21), concluindo-se que este tipo de rotura está associada à inexistência de nós. Contudo, em todas as roturas verificaram-se sinais de compressão das fibras do lado comprimido.



Figura 3.20 – Pormenor de roturas provocadas por tração



Figura 3.21 – Pormenor de roturas provocadas por compressão

Na amostra total de 63 postes as roturas localizaram-se praticamente todas em zonas próximas da linha terra, contudo convém relatar o caso de um poste usado que para além de romper no local expetável, rompeu também a aproximadamente 2 metros do topo do poste, ou seja, verificaram-se duas roturas simultâneas (Figura 3.22).



Figura 3.22 – Pormenor de dupla rotura verificada num dos postes usados

Relativamente à localização exata das roturas não só em postes novos (Figura 3.23), mas também em postes usados (Figura 3.24), não se declararam roturas abaixo da linha terra. Assim, a localização da rotura mediu-se a partir da distância à linha terra.

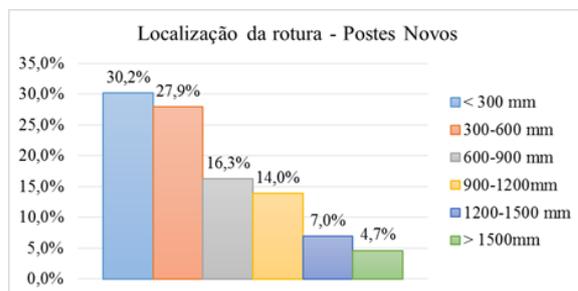


Figura 3.23 – Distribuição percentual da localização da rotura (Postes Novos)

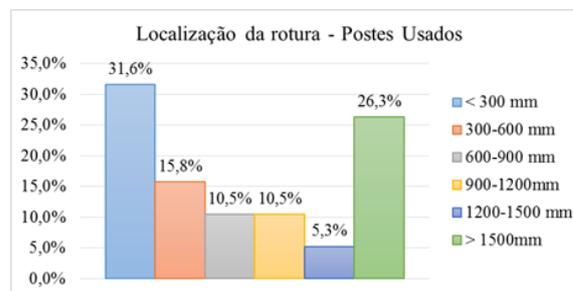


Figura 3.24 – Distribuição percentual da localização da rotura (Postes Usados)

Os postes novos apresentaram mais de 50% das roturas nos 60cm mais próximos da linha terra, por sua vez os postes usados apresentam um valor percentual bastante similar aos postes novos a 30cm da linha terra mas nota-se um elevado número de roturas a mais de 1,5m da linha terra, não ultrapassando os 2,3m. Num poste usado não foi possível localizar a rotura, logo neste aspeto a amostra refere-se a 19 postes.

3.5 Propriedades medidas em laboratório

3.5.1 Teor de água

O teor de água da madeira é uma característica condicionada pelas condições ambientais a que esta se encontra submetida. Este parâmetro influencia as propriedades físicas e mecânicas da madeira, na medida em que se relaciona com o ponto de saturação das fibras, uma vez que se por um lado acima desse valor as propriedades mantêm-se constantes, por outro quando o teor de água se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras a variabilidade das suas propriedades deixa de ser desprezável, de acordo com o Wood Handbook (USDA, 1999). Para o pinheiro bravo o ponto de saturação das fibras ronda os 24%, segundo a Ficha M2 (LNEC, 1997).

Relativamente ao estudo em causa, o teor de água foi calculado analisando rodela retiradas o mais próximo possível da zona de rotura e sem presença de nós. De seguida, levaram-se as rodela para o Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, onde se efetuaram dois processos distintos. As rodela relativas aos postes novos foram colocadas numa estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 3.25). Por sua vez, as rodela correspondentes aos postes usados foram colocadas numa sala climatizada (Figura 3.26), a uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar de 65%, visto que a colocação em estufa estaria inerente à propagação de gases tóxicos provenientes do tratamento dos postes, possibilitando a

determinação do teor de água de referência (12%). Como enuncia a EN 13183-1 (CEN, 2002), o tempo de secagem da peça depende da estabilização da massa.

Como tal, para os postes novos realizaram-se pesagens diariamente, dando como terminado o processo apenas quando a diferença entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%. Para os postes usados, visto que o processo de secagem foi mais demorado as pesagens foram efetuadas cerca de uma vez por semana.



Figura 3.25 – Processo de secagem das rodela próximas da zona de rotura (Postes Novos)



Figura 3.26 – Processo de secagem das rodela próximas da zona de rotura (Postes Usados)

O teor de água da madeira é definido como a relação percentual entre o peso da amostra antes da secagem e o peso seco da amostra (Equação (11):

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100 \quad (11)$$

Como o processo de secagem adotado para os postes usados possibilitou a avaliação do teor de água de referência (12%), efetuou-se um ajuste com o intuito de determinar a massa seca das rodela resolvendo-se a equação (11 em ordem a m_0 (Equação (12).

$$m_0 = \frac{100 m_{ref}}{w_{ref} + 100} \quad (12)$$

Onde m_0 , m_{ref} e w_{ref} representam a massa seca, massa medida com o teor de água de referência e o teor de água de referência, respetivamente. Sabendo a massa seca de cada rodela, determinou-se o teor de água dos postes usados, recorrendo à equação (11).

A Figura 3.27 apresenta os valores dos teores de água obtidos para os postes novos e para os postes usados.

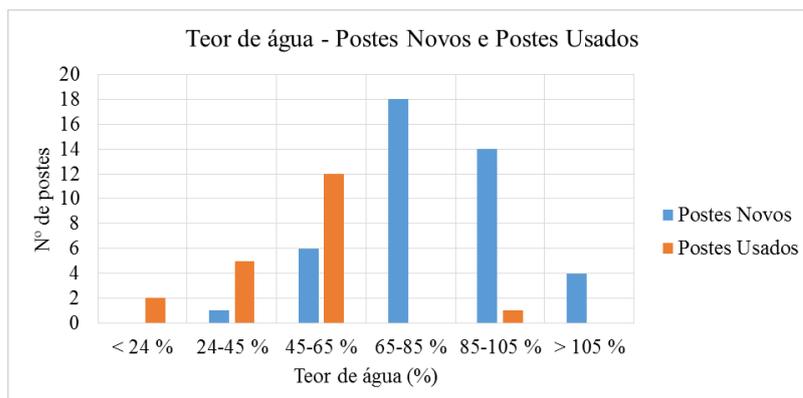


Figura 3.27 – Distribuição de frequências do teor de água dos postes novos e usados

A EN14229 (CEN, 2010) impõe que o teor de água dos postes esteja acima do ponto de saturação das fibras para que a fiabilidade dos ensaios não seja colocada em causa. Logo, uma vez que antes de realizar o ensaio de módulo de elasticidade e de resistência à flexão não há possibilidade de calcular o teor de água segundo o método supracitado, verificou-se esta característica para cada poste através de um humidímetro (Figura 3.28), esperando cerca de 10 segundos após a aplicação do aparelho em cada poste antes de registar o resultado. Segundo este aparelho, todos os postes selecionados estavam muito acima do ponto de saturação das fibras, apresentando um teor de água médio de 49,0% e de 57,8% para os postes novos e para os postes usados, respetivamente.



Figura 3.28 – Avaliação do teor de água recorrendo ao humidímetro

O objetivo da medição dos teores de água, principalmente no caso dos postes novos, consiste apenas em garantir que se encontra acima do ponto de saturação das fibras, visto que se trata de uma imposição da norma. Desta análise concluiu-se que todos os elementos estavam em condição saturada, informação equivalente à fornecida pelo humidímetro, medida antes do ensaio de resistência à flexão.

3.5.2 Massa volúmica

A massa volúmica é uma das características físicas mais importantes da madeira, visto que permite estabelecer boas correlações com as propriedades mecânicas, conduzindo à inclusão nas normas de classificação de madeira este fator condicionante.

Este parâmetro é definido como o quociente entre a massa e o volume, expresso em kg/m^3 (Equação (13)):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

Onde “m” e “V” representam a massa e o volume do elemento a analisar, respetivamente.

Normalmente a massa volúmica apresenta-se como valor médio, no entanto em casos cujas propriedades resistentes necessitem de ser determinadas, o valor característico torna-se importante para o cálculo.

O procedimento para a obtenção destes resultados foi executado em laboratório, estudando-se as rodela retiradas o mais próximo possível da rotura e sem presença de nós, após o ensaio de resistência à flexão. Primeiramente, retiraram-se três medições do diâmetro e da altura da rodela, utilizando o valor médio para o cálculo do volume da peça (Figura 3.29). Seguidamente, pesaram-se as rodela em condição saturada antes de prosseguir com o processo de secagem para a obtenção do teor de água (Figura 3.30).



Figura 3.29 – Medição do diâmetro e altura das rodela



Figura 3.30 – Pesagem das rodela

Já com todos os dados disponíveis e recorrendo à equação (13) calculou-se a massa volúmica de cada poste. Por fim, ajustaram-se os valores obtidos para um teor de água de 12%, determinando-se a massa volúmica nessas condições (Quadro 3.14).

Quadro 3.14 – Valores da massa volúmica dos postes em condição saturada e dos postes com teor de água de 12%

		Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio-Padrão
ρ sat (kg/m ³)	Postes Novos	646,3	1009,7	827,7	82,4
	Postes Usados	579,4	766,0	646,9	55,6
ρ 12% (kg/m ³)	Postes Novos	397,6	741,5	531,9	61,4
	Postes Usados	367,8	679,2	535,8	68,9

3.6 Tratamento estatístico de resultados

O dimensionamento de qualquer tipo de estrutura, independentemente do material utilizado, encontra-se relacionado com o valor de cálculo resistente do material. Esse valor obtém-se através do valor característico e é posteriormente minorado por coeficientes de segurança impostos pelos regulamentos.

Neste estudo, determinaram-se os valores característicos da resistência à flexão e da massa volúmica, segundo a EN14229 (CEN, 2010) e a EN384 (CEN, 2004), visto que são as únicas características com formulação estabelecida para o efeito. No caso do módulo de elasticidade, a norma refere que o valor médio obtido da amostra pode ser declarado como valor característico.

Relativamente à massa volúmica, a norma em causa refere que este valor deve ser obtido para um teor de água de 12%, portanto caso essa condição não se verifique torna-se necessário proceder a um ajuste. Como nenhum dos constituintes da amostra possuía 12% de teor água o ajuste efetuou-se em todos os postes, que consiste na diminuição de 0,5% da massa volúmica para cada ponto percentual existente entre a diferença do teor de água obtido e do teor de água de 12% exigido pela norma. De seguida, recorrendo às equações (14 e (15) calculou-se o respetivo valor característico.

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1,65s) \quad (14)$$

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j} \quad (15)$$

O valor característico da resistência à flexão requer dados como a média e o desvio-padrão dos resultados obtidos, determinando-se através das equações (16 e (17):

$$f_{m,05} = m(f_m) - 1,65 \times s(f_m) \quad (16)$$

$$f_{m,k} = k \times m(f_{m,05}) \quad (17)$$

Do Quadro 3.15 nota-se que o valor característico da resistência à flexão para os postes usados assume um valor relativamente baixo, quando comparado com o valor característico dos postes novos ou até os obtidos por Martins (2010) que obteve um valor característico para a resistência à flexão de 37,04 MPa. O facto de dois dos vinte ensaios correspondentes aos postes usados terem alcançado valores de resistência à flexão na ordem dos 11MPa e 22 MPa, devido a sinais claros de degradação, pode estar na base da justificação deste reduzido valor.

Quadro 3.15 – Valores característicos da massa volúmica e da resistência à flexão em postes novos e usados

Valores característicos		
	ρ (kg/m ³)	f_m (MPa)
Postes Novos	430,5	37,1
Postes Usados	422,1	21,8

A EN14229 (CEN, 2010) refere um método para eliminar valores reduzidos da amostra, no entanto como não existe qualquer normalização para postes usados, optou-se por considerar no cálculo do valor característico da resistência à flexão dos postes usados, os reduzidos resultados obtidos.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

O capítulo da análise de resultados, como o próprio nome indica, consiste numa análise, discussão e comparação de resultados não só entre os vários parâmetros abordados, mas também com estudos efetuados relacionados com o assunto.

A análise de resultados divide-se em quatro fases distintas que englobam os resultados obtidos da classificação visual, ensaio de vibração longitudinal, ensaio de carga estática e ensaios normalizados. Os resultados estão apresentados e discutidos por ordem cronológica em que ocorreram, sendo que em cada ensaio primeiramente correlacionam-se as propriedades com o módulo de elasticidade estático e, posteriormente, com a resistência à flexão. Todas as variáveis devem ser analisadas de modo a encontrar a solução mais desejável tendo em conta todas as condicionantes desta indústria, daí proceder-se a uma análise comparativa entre propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas do material. O objetivo passa por, recorrendo a um tratamento estatístico relativo a regressões lineares simples, correlacionar os resultados obtidos com o módulo de elasticidade estático e com a resistência à flexão. Uma vez que a amostra é constituída por postes novos e postes usados sujeitos a tratamento, apuraram-se separadamente os resultados em vez de se proceder a uma análise conjunta.

A fiabilidade da classificação dos postes é tanto maior quanto maior o valor da correlação entre as propriedades medidas. Por conseguinte, este capítulo mostra ainda uma descrição comparativa entre os parâmetros deste estudo e outros estudos realizados em Portugal e no estrangeiro.

4.2 Resultados provenientes dos ensaios

A caracterização visual dos postes de madeira pode ser um dos processos de classificação que envolve custos mais reduzidos visto que, como se pode verificar no capítulo 3, o material necessário não vai para além, por exemplo, de uma fita métrica e de um paquímetro. Por outro lado, a necessidade de pelo menos 2 funcionários especializados e o facto de este ser um processo relativamente moroso, dão origem a inconvenientes que num processo expedito e industrializado não são de todo desejáveis.

No conjunto de postes usados, a partir do qual foi efetuada a seleção da amostra a ensaiar, encontravam-se vários sinais de deterioração provenientes do período de serviço. Analogamente aos dados fornecidos pela Portugal Telecom, o efeito do pica-pau era o mais visível e preponderante nos elementos disponibilizados, localizando-se principalmente em zonas mais próximas do topo dos postes. Uma vez que, aquando da seleção dos postes usados já se tinham realizado os ensaios de resistência à flexão dos postes novos, tornou-se fácil prever a localização das roturas, situadas praticamente todas em zonas próximas à linha-terra, igualmente ao sucedido em Martins (2010) com 81% das roturas localizadas entre 1,5m e 2,5m da base do poste. Portanto, rejeitaram-se todos os postes que possuíssem efeitos de pica-pau, selecionando-se por sua vez alguns postes com sinais de deterioração entre a base do poste e uma posição ligeiramente superior à linha terra (Figura 4.1), uma vez que se trata da zona onde ocorrem as roturas, com o intuito de analisar a relação entre as propriedades mecânicas e a deterioração.

Analisando os postes mais danificados, como ilustrado na Figura 4.2 embora não se tenham selecionado todos, verifica-se que as suas propriedades mecânicas são claramente menores, sendo que em dois dos ensaios chegaram-se mesmo a atingir valores de resistência à flexão abaixo dos 25MPa.



Figura 4.1 – Pormenor da deterioração do poste usado junto à linha terra



Figura 4.2 – Deterioração dos postes usados disponíveis

Outro dos aspetos que se tentou avaliar foi o registo de alguma marcação existente (Figura 4.3). Em alguns casos conseguiram-se retirar informações como o comprimento do poste, siglas respetivas ao fabricante ou até mesmo o ano de produção. Identificaram-se quatro postes com datas de fabrico visíveis, correspondentes a 1981, 1983, 1992 e 2007. A Figura 4.4 apresenta a relação entre a data de fabrico dos postes identificados e o ensaio de resistência à flexão. Embora os postes identificados correspondam a três décadas diferentes, não se verifica um decréscimo da capacidade de carga nos postes mais velhos quando comparados com os postes mais recentes, tanto que o poste de 1983 foi o que apresentou maior capacidade de carga.

Relativamente ao poste de 1981, verificaram-se fortes sinais de deterioração junto à linha terra e concluiu-se que as suas propriedades mecânicas foram das menores registadas.



Figura 4.3 – Pormenor relativo à marcação de postes retirados de serviço

Em Vidor (2011) mencionou-se que a falta de um sistema de identificação dos postes foi um fator que condicionou a análise efetuada naquele estudo, ainda assim apenas 60% dos postes não possuía qualquer referência. Comparando com a presente amostra trata-se de uma percentagem bastante superior.

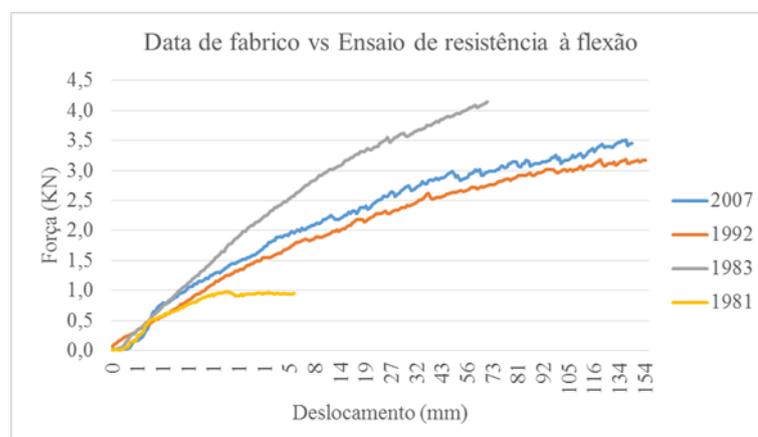


Figura 4.4 – Relação entre a data de fabrico e a resistência à flexão (Postes Usados)

Para além disso, verificou-se na amostra de postes usados que um dos elementos possuía uma cor bastante diferente dos restantes. Recorrendo a um solvente fornecido pela empresa, averiguou-se que o tratamento a que o poste tinha sido sujeito não foi corretamente aplicado ou absorvido pelo poste.

Quando o solvente entra em contato com a peça, ao assumir a cor azul significa que se está perante um poste submetido a tratamento. Como se pode verificar na Figura 4.5, o tratamento apenas é visível na zona mais superficial do poste e à medida que o solvente se aproxima do cerne perde a cor azulada e assume uma cor avermelhada, concluindo-se que este poste não foi alvo de tratamento eficaz.



Figura 4.5 – Verificação da eficácia do tratamento aplicado ao poste

O módulo de elasticidade estático assume-se como o parâmetro que melhor permite estimar a capacidade resistente à flexão de um poste de madeira em postes novos ($R=0,80$), à semelhança do que sucedeu em Martins (2010) que chegou a um valor idêntico correlacionando o módulo de elasticidade com a resistência à flexão ($R=0,83$). Como tal, a resistência a flexão e o módulo de elasticidade estático, determinados a partir da EN14229 (CEN, 2010), são os principais aspetos a serem comparados com as restantes características analisadas. Relativamente aos postes usados, o coeficiente de correlação ($R=0,64$) entre estas características é um pouco menor. A deterioração evidente de alguns postes, propositadamente seleccionados com o intuito de averiguar a influência que poderia existir nas propriedades mecânicas, pode ser uma das explicações para diferença verificada entre os postes novos e usados.

O Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 apresentam as correlações obtidas entre o módulo de elasticidade estático e as propriedades medidas na classificação visual, para os postes novos e para os postes usados, respetivamente.

Quadro 4.1 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e o módulo de elasticidade estático em postes novos

Classificação Visual - Postes Novos			
Diâmetro nominal LT	-0,47	Taxa de crescimento (Base)	0,31
Diâmetro nominal Q	0,18	Taxa de crescimento (Topo)	0,30
Adelgaçamento	-0,43	Ovalidade LT	0,44
Inclinação das fibras	-0,22	Ovalidade Q	0,03
Massa volúmica (saturada)	0,17	Massa volúmica (w=12%)	0,74

Quadro 4.2 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e o módulo de elasticidade estático em postes usados

Classificação Visual - Postes Usados			
Diâmetro nominal LT	-0,23	Taxa de crescimento (Base)	-0,08
Diâmetro nominal Q	-0,07	Taxa de crescimento (Topo)	0,04
Adelgaçamento	-0,10	Ovalidade LT	0,21
Inclinação das fibras	-0,16	Ovalidade Q	0,28
Massa volúmica (saturada)	-0,11	Massa volúmica (w=12%)	0,31

Das características medidas na classificação visual verifica-se que não há uma correlação eficiente com o módulo de elasticidade estático, à exceção da massa volúmica medida em laboratório com teor de água de 12% ($R=0,74$). Para além desta característica, relativamente aos postes novos, pode verificar-se que os parâmetros que fornecem melhores coeficientes de correlação são o diâmetro nominal na linha-terra ($R=-0,47$), o adelgaçamento ($R=-0,43$) e a ovalidade na linha-terra ($R=0,44$). Já a ovalidade medida no local de aplicação da carga foi a característica que apresentou menor coeficiente de correlação ($R=0,03$).

O Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 ilustram também a diminuição dos fatores de correlação dos postes novos para os usados, à exceção da ovalidade no ponto de aplicação da carga ($R=0,28$) e da massa volúmica medida em laboratório com teor de água de 12% ($R=0,31$) que, ainda assim, apresentam um valor desprezável. Os fatores inerentes ao período de serviço, como agentes climáticos ou deteriorantes, parecem ser uma justificação plausível para esta constatação.

Analisadas as correlações das características visuais como o módulo de elasticidade estático, importa também correlacionar as características visuais com a resistência à flexão, ilustradas no Quadro 4.3 e no Quadro 4.4.

Quadro 4.3 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e a resistência à flexão em postes novos

Classificação Visual - Postes Novos			
Diâmetro nominal LT	-0,37	Taxa de crescimento (Base)	0,32
Diâmetro nominal Q	0,45	Taxa de crescimento (Topo)	0,37
Adelgaçamento	-0,62	Ovalidade LT	0,41
Inclinação das fibras	-0,10	Ovalidade Q	-0,27
Massa volúmica (saturada)	0,19	Massa volúmica (w=12%)	0,70

Quadro 4.4 – Coeficientes de correlação entre as características visuais e a resistência à flexão em postes usados

Classificação Visual - Postes Usados			
Diâmetro nominal LT	-0,12	Taxa de crescimento (Base)	0,15
Diâmetro nominal Q	-0,37	Taxa de crescimento (Topo)	0,05
Adelgaçamento	0,26	Ovalidade LT	-0,05
Inclinação das fibras	-0,01	Ovalidade Q	0,56
Massa volúmica (saturada)	-0,23	Massa volúmica (w=12%)	0,05

Esta análise reforça a relevância da massa volúmica com teor de água de 12% como das mais importantes características físicas da madeira ($R=0,70$), pois permite obter boas correlações com a maioria das propriedades mecânicas da madeira (Cachim, 2014). No entanto, no caso dos postes usados os valores obtidos voltam a ser pouco significantes ($R=0,05$). Contudo, relativamente à massa volúmica com teor de água acima do ponto de saturação das fibras, ou seja em condição saturada, verificou-se que tanto em postes novos como em postes usados os coeficientes de correlação diminuíram em comparação à massa volúmica com teor de água de 12%, não só quando correlacionada com o módulo de elasticidade estático ($R=0,17$; $R=-0,11$), mas também com a resistência à flexão ($R=0,19$; $R=-0,23$).

Para além da massa volúmica com teor de água de 12%, o adelgaçamento ($R=-0,62$) foi a característica visual averiguada que permite prever a obtenção da resistência à flexão de um poste de uma forma mais eficaz. Por sua vez para postes usados, a ovalidade no ponto de aplicação da carga ($R=-0,56$) foi destacadamente a propriedade com melhor capacidade de estimar a resistência à flexão.

O Quadro 4.5 apresenta as correlações obtidas entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão, com o módulo de elasticidade simplificado.

Quadro 4.5 – Coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão com o módulo de elasticidade simplificado em postes novos e usados

Módulo de elasticidade simplificado (GPa)		
	Postes Novos	Postes Usados
Módulo de elasticidade estático	0,60	0,70
Resistência à flexão	0,44	0,62

Relativamente ao ensaio de carga estática, as correlações obtidas para os postes usados foram superiores aos postes novos, não só comparando o módulo de elasticidade simplificado com o módulo de elasticidade estático ($R=0,70$), mas também com a resistência à flexão ($R=0,62$). Verificou-se para os postes novos, um significativo aumento das correlações analisando as duas metodologias distintas adotadas e aplicando diferentes características no cálculo do módulo de elasticidade simplificado.

As propriedades dinâmicas correspondem a uma das fases da sequência de ensaio, portanto no Quadro 4.6 e no Quadro 4.7 ilustram-se as correlações dos parâmetros calculados com o módulo de elasticidade estático.

Quadro 4.6 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e o módulo de elasticidade estático em postes novos

Ensaio de Vibração Longitudinal - Postes Novos	
Frequência de vibração	0,74
MED (ρ laboratório)	0,81
MED (ρ aproximado)	0,56

Quadro 4.7 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e o módulo de elasticidade estático em postes usados

Ensaio de Vibração Longitudinal - Postes Usados	
Frequência de vibração	0,82
MED (ρ laboratório)	0,63
MED (ρ aproximado)	0,31

Como consta no Quadro 4.6 e no Quadro 4.7, determinaram-se três características dinâmicas: a frequência de vibração, o MED, calculado a partir da massa volúmica com teor de água acima do ponto de saturação das fibras obtida laboratorialmente, e o MED, calculado com a massa volúmica obtida através do método aproximado. Não se apresentaram correlações entre o MED, determinado com base na massa volúmica com teor de água de 12%, e o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão, pois comparando com o MED, calculado com base na massa volúmica saturada, as diferenças entre as correlações são insignificantes.

A frequência de vibração, demonstra um nível de fiabilidade muito aceitável relativamente à previsão do módulo de elasticidade estático dos postes. Esta informação parece relevante na medida em que, para os postes novos ($R=0,74$) vendidos para o mercado pode representar um processo rápido e expedito de classificação das propriedades mecânicas. Por sua vez, para os postes usados ($R=0,82$) pode representar um método de averiguação e levantamento das propriedades dos postes em serviço, diminuindo o risco de queda e, conseqüentemente, danos humanos e materiais.

O módulo de elasticidade dinâmico calculado através da massa volúmica saturada determinada em laboratório, quer em postes novos ($R=0,81$), quer em postes usados ($R=0,63$) fornece um nível de confiança superior ao módulo de elasticidade dinâmico calculado através da massa volúmica determinada pelo método aproximado, quando relacionada com o módulo de elasticidade estático. No entanto, este processo requer a extração de carotes de pequenas dimensões, tornando-o indesejável para fins de classificação em ambiente industrial.

No Quadro 4.8 e no Quadro 4.9, encontram-se dispostas as correlações obtidas entre as propriedades não destrutivas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão.

Quadro 4.8 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão em postes novos

Ensaio de Vibração Longitudinal - Postes Novos	
Frequência de vibração	0,59
MED (ρ laboratório)	0,66
MED (ρ aproximado)	0,33

Quadro 4.9 – Coeficientes de correlação entre propriedades dinâmicas provenientes do ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão em postes usados

Ensaio de Vibração Longitudinal - Postes Usados	
Frequência de vibração	0,67
MED (ρ laboratório)	0,49
MED (ρ aproximado)	0,44

Pode dizer-se que as conclusões retiradas, relativamente às correlações entre o ensaio de vibração longitudinal e a resistência à flexão, são idênticas às correlações com o módulo de elasticidade estático mas com nível de fiabilidade inferior. O módulo de elasticidade dinâmico calculado através da massa volúmica determinada em laboratório é o aspeto que fornece mais confiança para os postes novos ($R=0,66$), mas quer para os postes novos, quer para os postes usados, com base na resistência à flexão pode continuar a admitir-se que a frequência é o parâmetro indicado para classificar, ou averiguar o estado em serviço de postes de madeira.

4.3 Comparação das propriedades medidas com outros estudos e espécies

Comparando com estudos anteriores, Marto (2013) obteve melhores correlações para a inclinação das fibras ($R=-0,69$) e para a ovalidade na linha-terra ($R=0,52$) com o módulo de elasticidade estático. A inclinação das fibras neste estudo mostrou-se como uma característica que não apresenta correlação elevada ($R=-0,22$), à semelhança do que aconteceu em Martins (2010) ($R=-0,10$).

A massa volúmica com teor de água de 12% forneceu correlações bastante significativas à semelhança, por exemplo, de Martins (2010) e Morgado *et al.* (2008) que chegaram a coeficientes de correlação ($R=0,58$) e ($R=0,70$), respetivamente. O valor médio da massa volúmica dos postes novos determinado neste estudo ($531,9 \text{ kg/m}^3$), para um teor de água de 12%, é semelhante ao apresentado em Martins (2010) ($573,42 \text{ kg/m}^3$). Verificando as correlações entre propriedades mecânicas dos elementos ensaiados, Martins (2010) determinou o coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão de 0,83, enquanto que Morgado (2012) obteve o valor de 0,62 e 0,78 para as amostras da região Centro e Norte do país, respetivamente. No presente estudo, esta correlação ($R=0,80$) aproxima-se bastante à obtida em Martins (2010), o que seria de esperar pelo facto da metodologia do ensaio ser semelhante.

Vries, P. *et al.* (2006) concluíram que a taxa de crescimento ($R=0,56$) era o pior indicador para estimar a resistência à flexão de madeira circular. Ainda assim o valor determinado por estes autores é relativamente mais confiável que os determinados no presente estudo ($R=0,32$; $R=0,37$). A massa volúmica ($R=0,65$) foi a propriedade de previsão da resistência à flexão que apresentou melhores resultados neste estudo. No entanto, o facto de terem estudado madeira circular de diâmetros reduzidos poderá influenciar as conclusões.

Cerda e Wolfe (2003) calcularam o adelgaçamento e a massa volúmica para a espécie Chilean radiata pine, e obtiveram valores médios de 2,5% e 440kg/m^3 , respetivamente. De referir ainda que nesta investigação, à semelhança do presente estudo, as roturas deram-se praticamente todas em zonas com presença de nós, sendo que a 1m acima da linha terra todas as roturas se deram na presença de nós. Quanto aos ensaios de resistência à flexão e de módulo de elasticidade, os valores médios alcançados foram de 52MPa e 10,5GPa, respetivamente.

Em Morgado *et al.* (2008) a correlação entre a massa volúmica e a resistência à flexão assumiu um valor bastante aceitável ($R=0,70$) com valor médio de 536kg/m^3 , tratando-se da característica mais fiável para a previsão da resistência à flexão em toros de madeira.

Torrán, E.A. (2009) apresentou um valor médio da massa volúmica, para a amostra com postes de 8m de comprimento, de 682kg/m^3 e de 41% para o teor de água. Este autor determinou o adelgaçamento por 0,31m de comprimento, chegando a um valor de $6\text{mm}/0,31\text{m}$, superior ao valor máximo obtido neste estudo que corresponde a $13,8\text{mm}/\text{m}$. Quanto às propriedades mecânicas dos postes ensaiados, avaliaram-se os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão de 0,52 e 0,37 para a amostra de postes com 8m e 12m de comprimento, respetivamente.

Em Yin *et al.* (2004), as correlações mais fiáveis para prever o módulo de rotura das peças de madeira serrada alcançaram-se com o módulo de elasticidade dinâmico, calculado através do ensaio de vibração longitudinal, não só para toros verdes ($R=0,48$), mas também para madeira serrada secada ao ar livre ($R=0,68$). Vries, P. *et al.* (2006) ao correlacionarem o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através dos instrumentos Timber Grader MTG e GrindoSonic MK5, com a resistência à flexão ($R=0,77$) depararam-se com um resultado bastante aceitável, e facilmente exequível, de previsão desta propriedade mas para madeira circular de diâmetro reduzido, verificando-se exatamente o mesmo valor ($R=0,77$) nesta correlação em Morgado *et al.* (2008). Wang *et al.* (2001) ao correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através do ensaio de vibração longitudinal, com o módulo de elasticidade estático obtiveram coeficientes de correlação de 0,87 e 0,77 para as espécies Red pine e Jack pine, respetivamente.

Na Figura 4.6 apresentam-se valores médios de massa volúmica de madeira circular referentes a várias espécies.

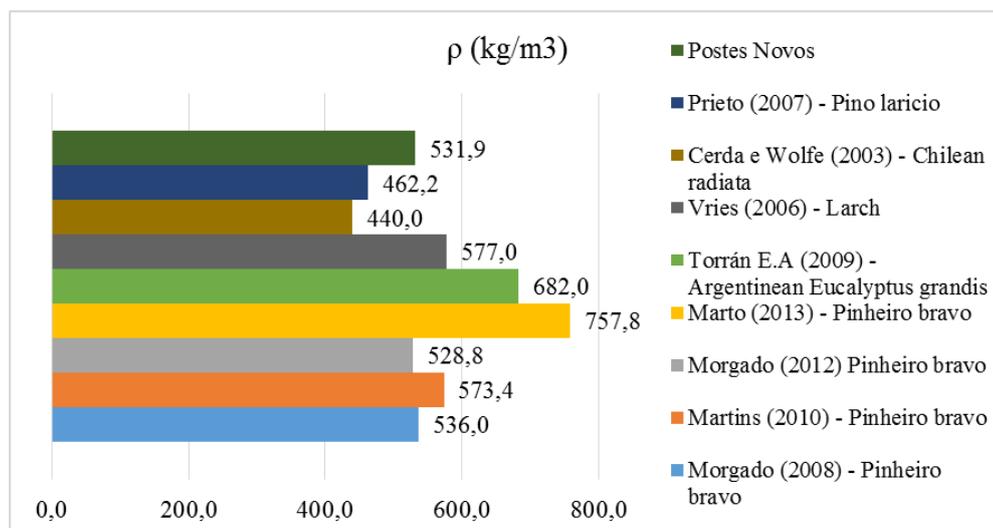


Figura 4.6 – Comparação de massas volúmicas de madeira de seção circular

A Figura 4.7 apresenta uma distribuição dos módulos de elasticidade obtidos nos estudos referenciados, verificando-se alguma discrepância entre os valores obtidos. As amostras dos estudos analisados variam entre postes de madeira e toros de madeira, com diferentes propriedades físicas, como os diâmetros, comprimentos ou teores de água. Tal facto poderá justificar esta discrepância de resultados. Repare-se que, igualmente ao sucedido na averiguação da resistência à flexão entre os estudos analisados, em Morgado *et al.* (2008) e Morgado (2012) o módulo de elasticidade é superior aos restantes módulos de elasticidade da mesma espécie, utilizando o autor elementos de ensaio do tipo toros de madeira circular.

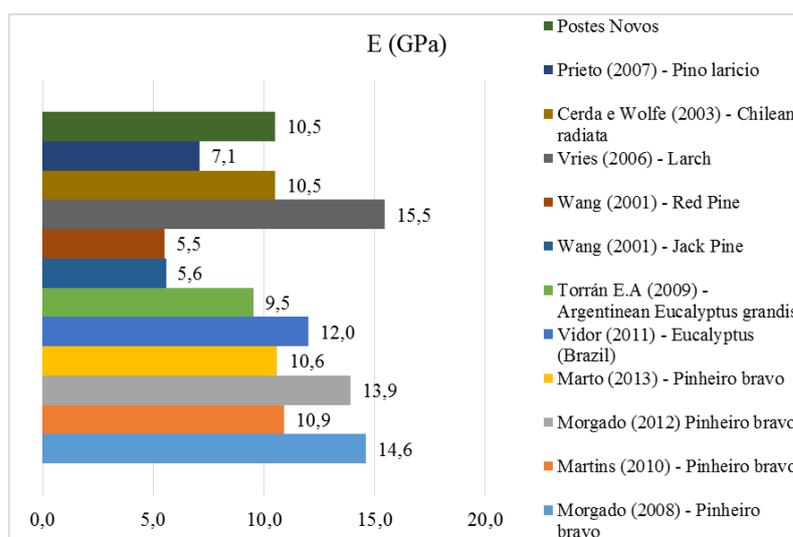


Figura 4.7 – Comparação de módulos de elasticidade de madeira de seção circular

A Figura 4.8 mostra os valores médios da resistência obtidos em vários estudos e espécies distintas, mas com valores relativamente parecidos. No entanto, em Morgado *et al.* (2008) e Morgado (2012) este valor foi claramente superior, mas os estudos em causa referem-se a toros de madeira circular ensaiados segundo uma condição de apoio simplesmente apoiada.

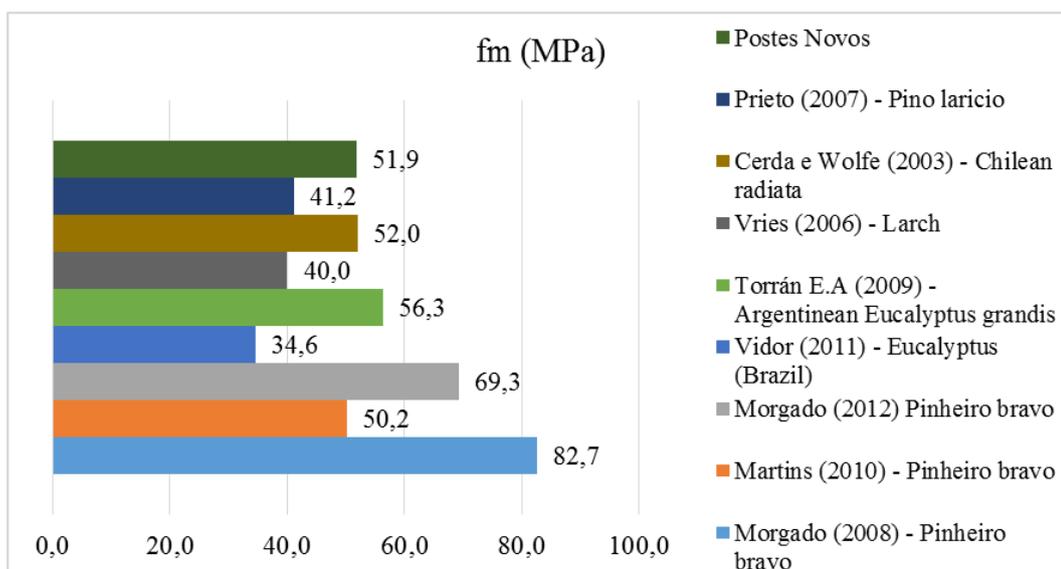


Figura 4.8 – Comparação de resistências à flexão de madeira de seção circular

A Figura 4.8 é bastante relevante na medida em que se compara uma propriedade fundamental, como é o caso da resistência à flexão, dos postes de madeira entre vários estudos. Relativamente à resistência à flexão em postes novos, para além do valor médio de 51,9MPa, obtiveram-se valores mínimos e máximos 30,3MPa e 77,2MPa.

5 CONCLUSÕES

Este estudo abordou diferentes metodologias que visam a determinação das propriedades visuais e mecânicas de madeira circular de Pinheiro bravo, mais concretamente de postes de madeira. O objetivo destas análises consistiu em alcançar uma forma de classificação deste material, correlacionando alguns dos parâmetros medidos. Selecionou-se a amostra que englobou postes novos e usados que foram classificados visualmente e ensaiados com vista à determinação do módulo de elasticidade estático e à resistência à flexão, com base na EN14229 (CEN,2010). Adicionalmente, efetuaram-se ensaios de flexão simplificada, com recurso a um mecanismo em desenvolvimento pela empresa, e ensaios de vibração longitudinal. Quando se investiga um determinado assunto, um trabalho enriquece-se quando comparado com estudos que já tenham sido feitos no mesmo campo, como tal, comparou-se os resultados obtidos neste estudo com os estudos apresentados na revisão bibliográfica.

O módulo de elasticidade estático, de entre todas as propriedades medidas, assumiu-se como a propriedade que melhor permite prever a resistência à flexão dos postes ($R=0,80$), daí a análise efetuada não só em função da resistência à flexão, mas também em função do módulo de elasticidade estático.

Relativamente aos resultados obtidos na classificação visual, quando correlacionados com o módulo de elasticidade estático, os postes novos apresentam algumas propriedades como o adelgaçamento ($R=-0,43$), a ovalidade na linha terra ($R=0,44$) e o diâmetro nominal na linha terra ($R=-0,47$), que mesmo sendo os melhores parâmetros, não permitem uma avaliação fiável do módulo de elasticidade estático. No mesmo sentido, nos postes usados também não se identifica nenhuma propriedade capaz desta função, sendo o melhor parâmetro a ovalidade no ponto de aplicação da carga ($R=0,28$). Por sua vez, correlacionando as características visuais com a resistência à flexão quer para os postes novos, quer para os postes usados os valores são ligeiramente superiores. Os postes novos e usados apresentam o adelgaçamento ($R=-0,62$) e a ovalidade no ponto de aplicação da carga ($R=0,56$), respetivamente, como os parâmetros que melhor permitem prever a resistência à flexão dos postes.

Quanto aos ensaios que permitiram o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, verifica-se que as correlações do módulo de elasticidade estático de postes novos com o módulo de elasticidade dinâmico determinado laboratorialmente ($R=0,81$) e a frequência de vibração ($R=0,74$) apresentam valores bastante satisfatórios. Por sua vez, os postes usados têm na

frequência de vibração ($R=0,82$) a possibilidade de implantação de uma metodologia de verificação do estado de conservação dos postes em serviço, uma vez que se trata de uma característica de fácil e rápida determinação, e que apenas necessita de um aparelho de medição e de um martelo. Relativamente às correlações com a resistência à flexão, como era de esperar, os valores assumem valores mais reduzidos, mas ainda assim com a frequência de vibração quer em postes novos ($R=0,59$), quer em postes usados ($R=0,67$) a assumir-se como um parâmetro razoável de previsão desta característica.

O ensaio de carga estática realizado através do mecanismo desenvolvido pela empresa, trata-se de uma metodologia que necessita de continuar a ser desenvolvida e de sofrer melhoramentos ao nível da medição de alguns parâmetros importantes para o cálculo do módulo de elasticidade. As correlações entre o módulo de elasticidade calculado com base nos valores fornecidos pela máquina quando comparada com o módulo de elasticidade estático e com a resistência à flexão, segundo a EN14229 (CEN,2010), assumem valores razoáveis mas que não oferecem a fiabilidade pretendida. No entanto, efetuou-se um ajuste em que se utilizaram algumas características, como os diâmetros, retirados com o paquímetro na fase da classificação visual. Assim, as correlações aumentaram consideravelmente alcançando-se resultados muito positivos.

A problemática relativa à classificação das propriedades mecânicas da madeira de seção circular, com aplicação em postes de linhas aéreas, é uma questão que deve ser analisada não só com o objetivo de tentar normalizar este mercado, mas também para que as empresas que necessitam deste material possam efetivamente otimizar o seu negócio, conhecendo o material que estão a adquirir.

5.1 Trabalho futuro

A classificação das propriedades mecânicas de madeira circular, mais concretamente de postes de madeira, trata-se de uma matéria que a nível nacional embora esteja a dar os primeiros passos, ainda tem muitos aspetos que merecem aprofundamento e reflexão. O registo de alguns acidentes que têm ocorrido, dão ênfase a esta problemática e torna-se cada vez mais importante não só prever a capacidade resistente na altura da implantação, mas também o estado de conservação em serviço destes elementos.

Por conseguinte, considera-se relevante a continuidade deste tipo de estudos em postes novos, aumentando a amostra analisada e, conseqüentemente, a credibilidade dos resultados para que se possa chegar a um método de classificação em processo industrial. O registo da localização e o estudo de várias proveniências dos postes de Pinheiro bravo ao nível do território nacional,

pode ser um outro aspeto a considerar com o objetivo de avaliar a variabilidade das propriedades mecânicas, uniformizando este produto.

Ao nível dos ensaios não destrutivos, devem ser levados a cabo estudos que permitam desenvolver métodos de ensaio que traduzam com fiabilidade o estado de conservação dos postes que se encontram em serviço, de maneira que se torne possível evitar a retirada prévia dos postes ou situações de insegurança pública.

A possibilidade de ensaiar postes que ainda não tenham sido retirados de serviço e que se conheça o ano de produção, poderia ser alvo de investigação para averiguar se o poste se encontrava em bom estado para a função a desempenhar.

Devido à situação atual da durabilidade dos postes sujeitos aos novos tratamentos preservadores, poderia proceder-se à análise de amostras de postes com diferentes tratamentos para avaliar a influência destes nas propriedades mecânicas.

Concluindo, seria de todo o interesse que as entidades envolvidas se debruçassem sobre a criação de uma rede de base de dados, através da qual a médio/longo prazo este tipo de estudos pudesse ser efetuado e viabilizado com maior facilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cachim, P. B. (2014). “Construção em Madeira – A Madeira como Material de Construção (2ª Edição)”. Publindústria, Porto.
- CEN (2010). “Structural timber – Wood poles for overhead lines”. EN 14229, Comité Européen de Normalization.
- CEN (2004), “Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density”. EN 384, Comité Européen de Normalization.
- CEN (2002), “Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method”. EN 13183-1, Comité Européen de Normalization.
- Cerda, G. e R. W. Wolfe (2003). “Bending strength of Chilean radiate pine poles”. Forest Products Journal, Vol.53, N°4, pp. 61-65.
- Clough, R. W. e Penzien, J.(1993), "Dynamics of structures," McGraw - Hill International Editions.
- ICNF (2013). “IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados Preliminares.”. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa.
- 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.
- Marto, M. R. M. (2013). “Avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas de postes de madeira com recurso a técnicas não destrutivas”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Matias, A. N. d. C. (1962). “O poste de madeira e os problemas que suscita”. Separata da Revista Agronómica – Vol. XLV – Tomos II e III.
-

- 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.
- Portugal Telecom (2010). "Documento Operacional - Regras a respeitar nos trabalhos em traçados aéreos – Verificação de postes instalados". Versão 2
- Prieto, E. 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, Nº506, pp. 87-95.
- Torrán E. A. et al. (2009). "Bending strength and Stiffness of Poles of Argentinean Eucalyptus grandis". *Maderas, Ciencia y Tecnología*, Vol.11, Nº1, pp. 71-84.
- USDA Forest Service. Forest Products Laboratory (USDA). 2010. Wood Handbook: "Wood as an Engineering Material". Forest Prod. Soc., Madison, WI, USA.
- Vidor, F. L. R. (2011). "Avaliação da vida útil de postes de madeira de eucalipto em serviço em redes de distribuição de energia elétrica". Tese de Doutoramento, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Vries, P. et al. (2006). "Development of a strength grading system of small diameter round wood." In WCTE 2006; 9th World Conference on Timber Engineering (pp. 1-8). Corvallis, Oregon.
- Wang, X. et al. (2001). "Several Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small-Diameter Logs." Research paper FPL-RP-600. USDA Forest Service.
- Yin, Y. et al. (2004). "Non-destructive evaluation of Chinese Fir plantation wood strength". In WCTE 2004; 8th World Conference on Timber Engineering (pp. 347-350). Lahti, Finland.
- TTT Products Limited (2012). "TTTtested – Proof tested New Zealand radiata pine poles". Tuakau, New Zealand.
-

ANEXO A – DADOS PORTUGAL TELECOM

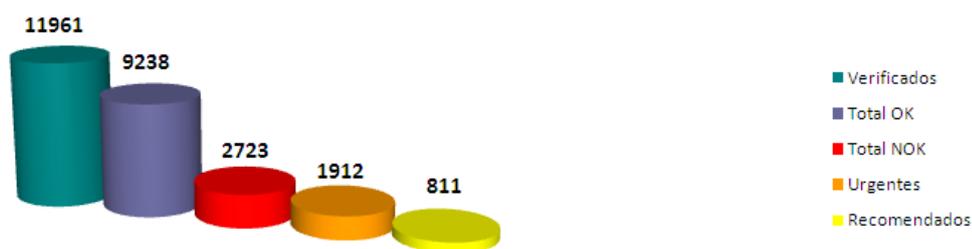


Figura A-1 – Dados da amostra recolhidos de postes em serviço



Figura A-2 – Estado da amostra de postes em serviço



Figura A-3 – Recomendação de substituição da amostra de postes em serviço

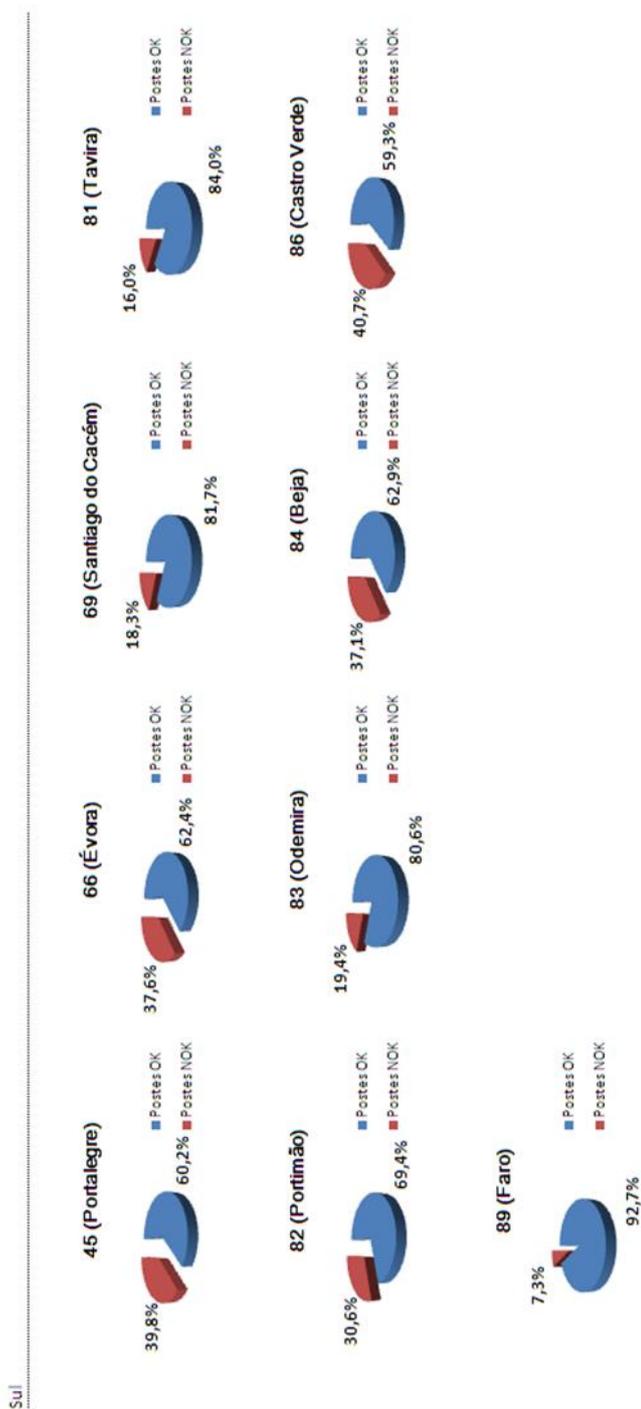


Figura A-4 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Sul do país

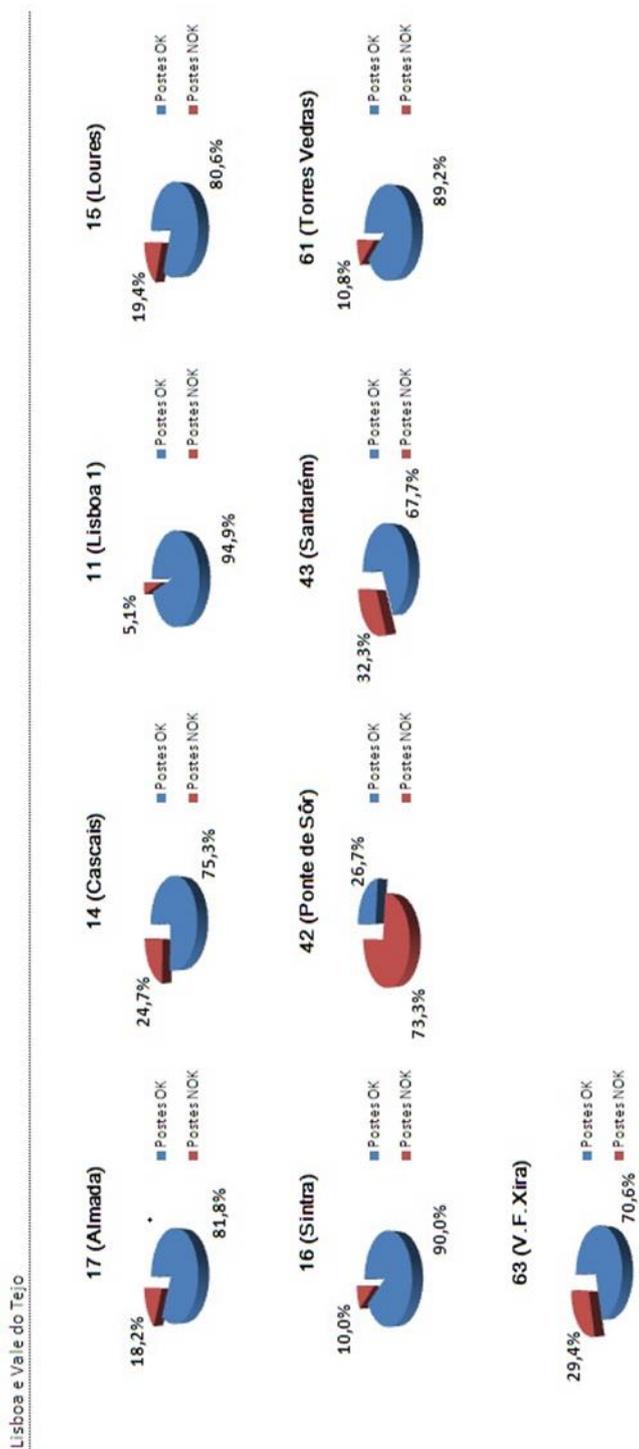


Figura A-5 – Estado da amostra de postes em serviço na zona de Lisboa e Vale do Tejo do país

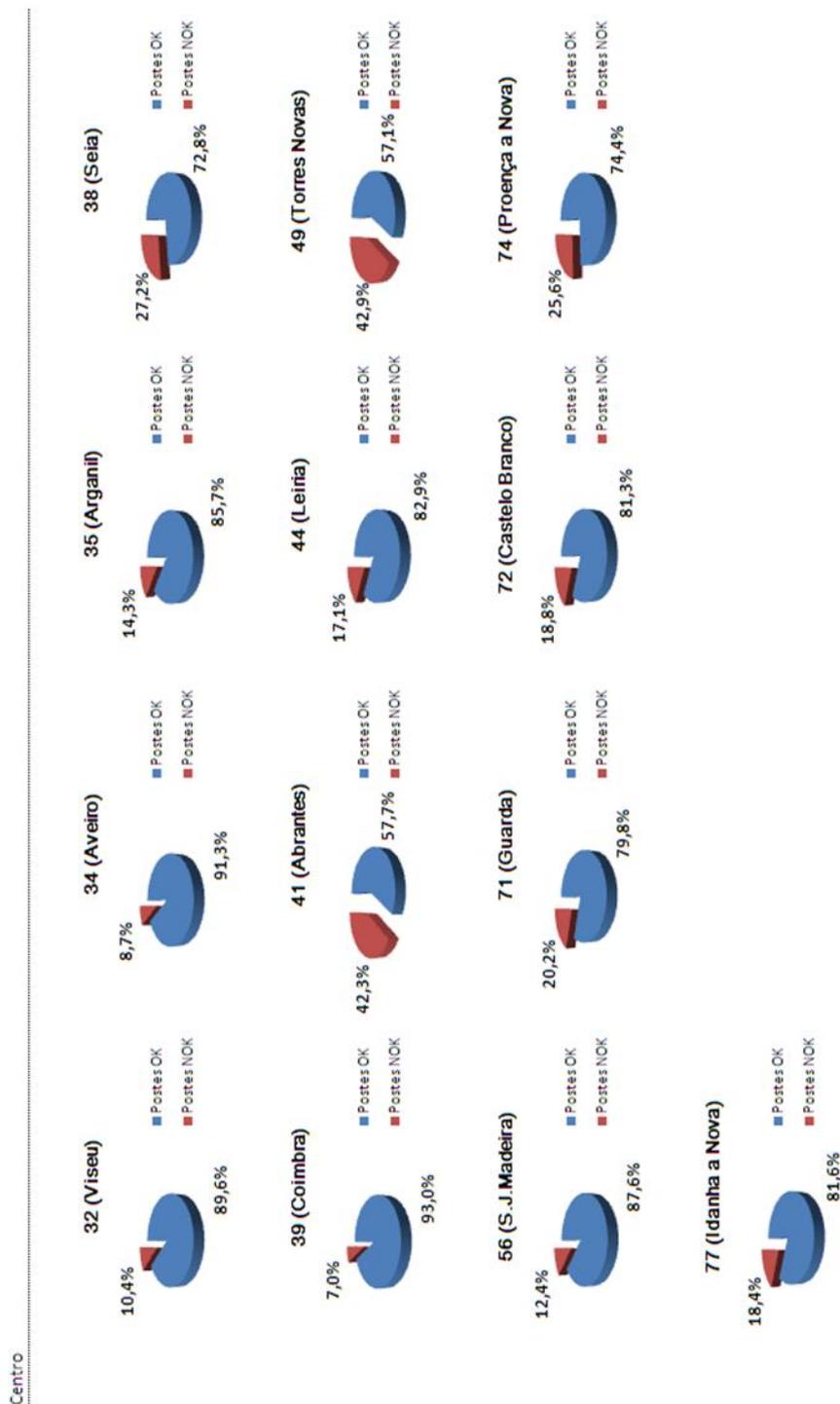


Figura A-6 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Centro do país

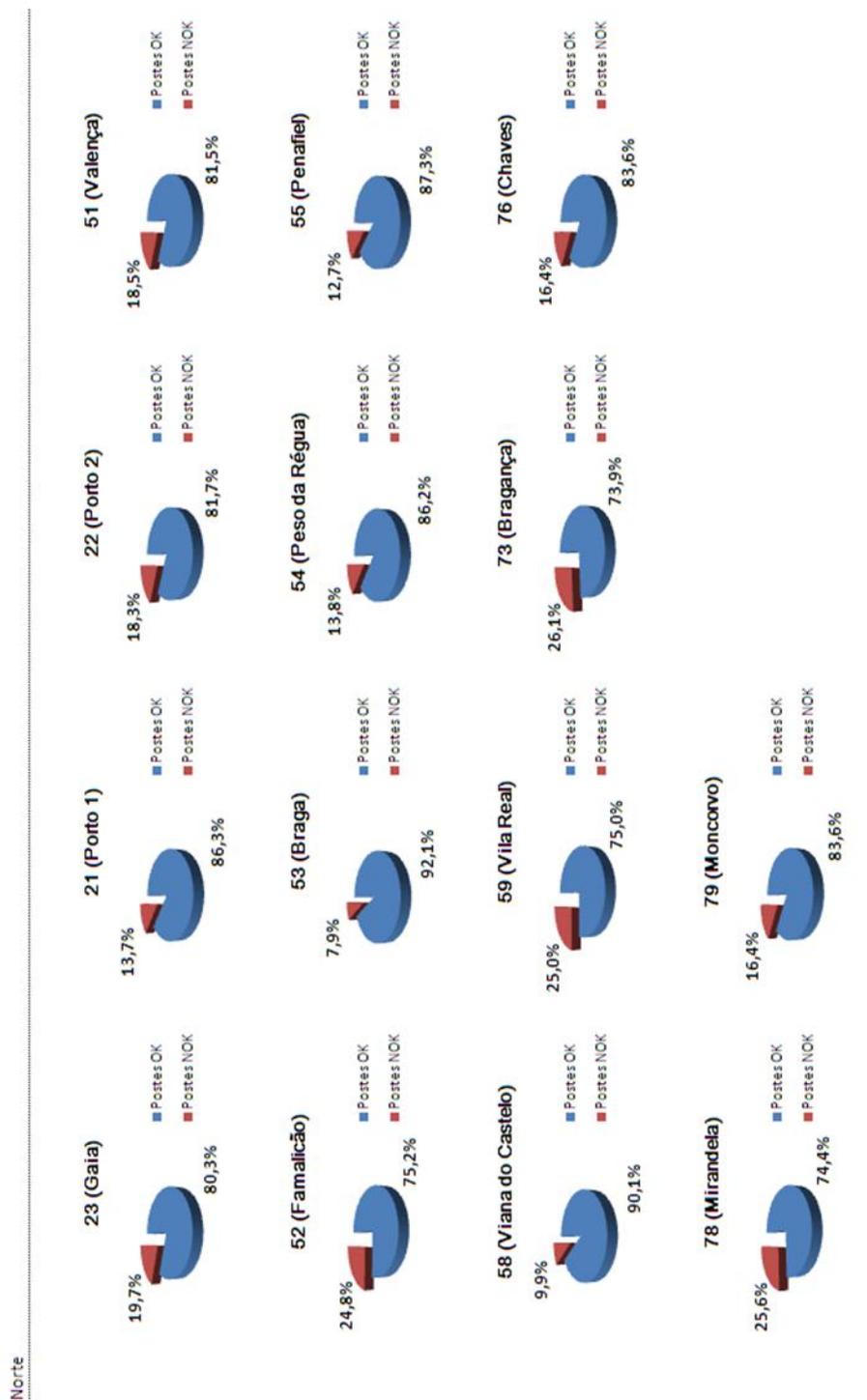


Figura A-7 – Estado da amostra de postes em serviço na zona Norte do país