



Carlos José Parreira da Cunha
Mestre em Engenharia Civil

Caracterização das propriedades de madeiras africanas, Câmbala e Sapelli

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor
em Engenharia Civil, Especialidade Estruturas

Orientador: Jorge Manuel Gonçalves Branco,
Professor Auxiliar, Escola de Engenharia / UMinho
Co-orientador: Luís Armando Canhoto Neves,
Professor Auxiliar, FCT/UNL



FAÇULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2017

Caracterização das propriedades de madeiras africanas, Câmbala e Sapelli

Copyright © 2017 por Carlos Cunha, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Knowing is not enough; we must apply.
Willing is not enough; we must do.*

Johann Wolfgang von Goethe

AGRADECIMENTOS

O momento em que atingimos uma meta é inevitavelmente um tempo de reflexão sobre o caminho percorrido. E dessa reflexão surge de imediato o ímpeto de agradecimento a todos quantos nos acompanharam nesse longo percurso. É a estes, que constituíram, em uníssono, a pedra angular neste trilho repleto de desafios, que colaboraram e incentivaram a realização da presente tese de doutoramento, que dedico as linhas que se seguem e expresso o meu agradecimento sincero.

Ao Professor Doutor Jorge Branco, meu orientador, pelos seus ensinamentos, por ter estado sempre presente e disponível para ouvir e conversar. Pelos seus conselhos, sugestões e entusiasmo, essenciais para chegar ao final desta jornada. Mas, acima de tudo, por acreditar na minha dedicação e capacidade.

Ao Professor Doutor Luís Neves, meu co-orientador que, apesar da distância geográfica, desde o primeiro minuto, se disponibilizou para me acompanhar e orientar. Pelas suas revisões e sugestões.

A todo o pessoal técnico e colaboradores do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e da empresa MT-Madeiras, que tornaram possível a realização dos trabalhos experimentais indispensáveis à realização desta dissertação.

À Associação e Universidade Jean Piaget de Angola, em especial ao seu presidente, o Dr. António Oliveira Cruz e ao seu reitor, o Professor Doutor Pedro Domingos Peterson, pelo tempo que me disponibilizaram para me dedicar à investigação.

Aos meus pais e irmão que, incessantemente, me procuraram motivar e encorajar.

E por fim, à minha esposa, por todos os sacrifícios e compreensão, mas, acima de tudo pelo exemplo de dedicação e perseverança.

RESUMO

Câmbala e Sapelli são duas espécies de madeiras tropicais africanas com possível utilização em estruturas. O escasso conhecimento científico generalizado das propriedades mecânicas de madeiras tropicais constitui uma limitação na sua utilização em elementos estruturais. A atual normalização europeia para a classificação mecânica das espécies é baseada em madeiras de resinosas, com implícita aceitação para as madeiras de folhosas. Por sua vez, o novo EUTR (European Union Timber Regulation) vem impor critérios de sustentabilidade na importação de madeiras tropicais, originando o aparecimento de novas espécies no mercado Europeu. Foi objetivo da presente dissertação a definição de modelos alternativos expeditos, de caracterização mecânica para espécies tropicais, baseados em provetes de pequenas dimensões.

Para cada espécie, prepararam-se mais de 400 provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, que foram submetidos a ensaios de ultrassons e de flexão, de acordo com as normas ISO 3131 e ISO 3133. Os resultados experimentais obtidos encontram-se nos intervalos previstos na bibliografia para as propriedades das espécies em estudo.

Procedeu-se, também, a uma campanha de ensaios à flexão em provetes de dimensões estruturais, segundo a norma EN 408, tendo-se extraído destes, provetes de pequenas dimensões e mesoprovetes, que foram ensaiados à flexão e à tração paralela às fibras, respectivamente.

Foram estudadas as possíveis correlações existentes entre as diferentes propriedades das madeiras, quer dentro da mesma campanha de cada ensaio, quer entre campanhas de ensaios.

Das correlações estudadas, entre as propriedades das diferentes campanhas, obtiveram-se valores significativos para a caracterização das madeiras, que serviram de base para a elaboração de novas propostas de modelos para a aferição das propriedades características de referência de madeiras tropicais.

Em conclusão, o presente estudo pretende potenciar o uso das novas madeiras tropicais em estruturas, ao determinar as principais propriedades mecânicas, através de modelos alternativos.

PALAVRAS-CHAVE:

madeira estrutural, Câmbala, Sapelli, caracterização mecânica, estabilidade dimensional.

ABSTRACT

Iroko and Sapele are two species of African hardwoods with potential use as structural timber. However, the general little scientific knowledge of tropical hardwoods properties constitutes a limitation in their use as structural materials. The current european standardization for mechanical classification of species, is based on softwoods with implicit acceptance for hardwoods. The new EUTR enforces sustainability criteria in the importation of tropical hardwoods, causing the occurrence of new species in the European market. Thus, the objective of this thesis is to define expeditious alternative models for mechanical characterization of tropical hardwoods, based on small free defects specimens.

Accordingly, for each species, above 400 small and free from defects specimens were prepared. These underwent ultrasound tests and static bending tests campaigns that were prepared according with ISO 3131 and ISO 3133 standards. These results were similar to the expected ranges for the properties of the species under study.

After this, a set of bending tests was performed on specimens of structural dimensions, following EN 408. From these specimens, small dimensions specimens and mesospecimens, were extracted and tested in bending and tension.

The possibilities of correlations between different timber properties were studied, within the same campaign and between campaigns.

From the correlations studied between the properties of the different campaigns, significant values were obtained for timber characterization that served as the basis for the elaboration of new models proposals to determine the hardwoods properties characteristic.

In conclusion, the present study aims to boosting the use of new tropical hardwoods in structural elements, determining the principal mechanical properties through alternative models.

KEYWORDS:

structural timber, Iroko, Sapele, mechanical characterization, dimensional stability

ÍNDICE

Índice de Figuras	XIX
Índice de Tabelas	XXIX
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos.....	XXXV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral	2
1.2 Âmbito da tese	3
1.3 Objetivos e limitações	6
1.4 Estrutura da tese	7
2. A FLORESTA TROPICAL AFRICANA E A EXPLORAÇÃO DAS SUAS MADEIRAS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS	11
2.1 Florestas tropicais	12
2.1.1 Enquadramento geral	12
2.1.2 Floresta Tropical Africana	15
2.1.3 A certificação florestal.....	21
2.2 Regulamentação para a importação de madeira tropical	32
2.2.1 Regulamentação Europeia	32
2.2.2 Legislação Portuguesa	37
2.3 A marcação CE e o compromisso europeu para produtos mais seguros	38
2.3.1 Conceito da marcação CE	38
2.3.2 Diretiva dos Produtos de Construção (DPC)	39
2.3.3 Regulamento dos Produtos de Construção (RPC).....	40
2.3.4 Procedimentos com vista à obtenção da marcação CE	40
2.3.4.1 <i>Normas Harmonizadas</i>	41
2.3.4.2 <i>Documento de Avaliação Europeu</i>	42

2.3.4.3	<i>Declaração de Desempenho</i>	43
2.3.4.4	<i>Simplificação de procedimentos</i>	44
2.3.4.5	<i>Pontos de Contacto, Organismos de Avaliação Técnica, Organismos Notificados, Autoridades Notificadoras e Autoridades de Fiscalização</i>	45
2.3.5	A marcação CE nos elementos estruturais em madeira maciça, de secção retangular	47
2.3	As espécies Câmbala e Sapelli	48
2.4.1	Câmbala	49
2.4.1.1	<i>Disseminação</i>	49
2.4.1.2	<i>Descrição da árvore</i>	50
2.4.1.3	<i>Usos e aplicações</i>	51
2.4.1.4	<i>Propriedades físicas e mecânicas da madeira</i>	52
2.4.1.5	<i>Mercado comercial</i>	53
2.4.1.6	<i>Exploração e sustentabilidade da espécie</i>	53
2.4.2	Sapelli	54
2.4.2.1	<i>Disseminação</i>	55
2.4.2.2	<i>Descrição da árvore</i>	55
2.4.2.3	<i>Usos e aplicações</i>	56
2.4.2.4	<i>Propriedades físicas e mecânicas da madeira</i>	56
2.4.2.5	<i>Mercado comercial</i>	57
2.4.2.6	<i>Exploração e sustentabilidade da espécie</i>	58
2.4.2	A semelhança entre as espécies estudadas	58
3	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS TROPICAIS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS	61
3.1	Caracterização e classificação das madeiras	62
3.1.1	Determinação das propriedades mecânicas da madeira	62
3.1.2	Determinação dos valores característicos para efeitos de cálculo	65
3.1.2.1	<i>Classes de Resistência</i>	67
3.1.2.2	<i>Classes de Qualidade</i>	68
3.1.3	Métodos de classificação de um elemento estrutural	70
3.1.3.1	<i>Classificação visual</i>	71
3.1.3.2	<i>Classificação mecânica</i>	72
3.2	Classificação das madeiras tropicais	74
3.2.1	Procedimento alternativo previsto na EN 384 (CEN, 2010)	81
3.2.2	A Classificação Visual segundo a BS 5756 (2007)	82
3.3	Estudos sobre métodos alternativos para a caracterização de madeiras tropicais	87
3.3.1	Abordagem genérica aos ensaios não destrutivos	87

3.3.2 Método dos Ultrassons	92
3.3.2.1 Estudos baseados no método de ultrassons.....	96
3.3.3 Estudos sobre madeiras tropicais.....	99
3.4 O teor em água na madeira	110
3.4.1 A presença da água na madeira.....	111
3.4.2 Evolução do teor em água na secagem da madeira	112
3.4.3 Retração da madeira	114
4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE PEQUENAS DIMENSÕES EM CÂMBALA E SAPELLI.....	117
4.1 Introdução.....	118
4.2 Metodologia	118
4.2.1 Determinação do teor em água e da massa volúmica.....	120
4.2.2 Ensaios com utilização de ultrassom.....	122
4.2.3 Ensaio à flexão em 3 pontos.....	123
4.3 Resultados da caracterização mecânica	127
4.3.1 Massa volúmica (ρ).....	127
4.3.2 Determinação da Tensão de Ruptura em Flexão (f_m).....	128
4.3.3 Determinação do Módulo de Elasticidade em Flexão (E_m).....	129
4.3.4 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_{din})	130
4.4 Correlações entre as propriedades.....	132
4.4.1 Procedimentos gerais para o estabelecimento das correlações	132
4.4.2 Defeitos em provetes não detetáveis a olho nu e erros na realização dos ensaios.....	133
4.4.2.1 Massa volúmica.....	134
4.4.2.2 Módulo de elasticidade (E_m) e tensão de ruptura em flexão (f_m).....	134
4.4.2.3 Velocidade de propagação do ultrassom	135
4.4.3 Eliminação de 5% dos resultados.....	137
4.5 Resultados das correlações estabelecidas.....	137
4.5.1 Correlação entre massa volúmica (ρ) com E_m e f_m	138
4.5.1.1 Correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m	138
4.5.1.2 Correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m	140
4.5.2 Correlação do E_m com f_m	142
4.5.3 Correlação da velocidade de ultrassom (v) com a massa volúmica (ρ)	145
4.5.4 Correlação da velocidade da propagação da onda de som (v) com E_m e f_m	145
4.5.4.1 Correlação da velocidade de propagação da onda de som (v) com E_m	145
4.5.4.2 Correlação da velocidade de propagação da onda de som (v) com f_m	146
4.5.5 Correlação da velocidade da propagação da som e massa volúmica com E_m e f_m	147
4.5.5.1 Correlação de E_{din} com E_m	147
4.5.5.2 Correlação de E_{din} com f_m	149

5. CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DE DIFERENTES ESCALAS E ENSAIOS	153
5.1 Introdução	154
5.2 Metodologia	154
5.2.1 Classificação visual das vigas.....	156
5.2.2 Ensaio à flexão em vigas	158
5.2.3 Ensaio realizado nos provetes de pequenas dimensões	161
5.2.4 Ensaio à tração paralela às fibras em mesoprovetes	162
5.3 Resultados experimentais	164
5.3.1 Resultados dos ensaios em vigas.....	165
5.3.2 Resultados dos ensaios em provetes de pequenas dimensões	166
5.3.3 Resultados dos ensaios em mesoprovetes	170
5.4 Correlação das propriedades em cada campanha de ensaios	171
5.4.1 Correlações obtidas nos ensaios das vigas.....	171
5.4.2 Correlações obtidas nos ensaios dos provetes de pequenas dimensões	175
5.4.2.1 Correlação do E_m com f_m	175
5.4.2.2 Correlação do E_{din} com E_m	177
5.4.2.3 Restantes correlações	179
5.4.3 Correlações obtidas nos ensaios dos mesoprovetes.....	180
5.5 Correlação dos resultados entre as diferentes campanhas de ensaios	180
5.5.1 Correlação entre vigas e provetes de pequenas dimensões	180
5.5.1.1 Correlações para a aferição da tensão de rotura à flexão (f_{mv})	180
5.5.1.2 Correlações para a aferição do módulo de elasticidade à flexão (E_{mv})	183
5.5.2 Ensaio em vigas e em mesoprovetes	186
5.6 Comparação de resultados com a campanha experimental de ensaios apresentada no Capítulo 4	186
5.6.1 Ensaio em vigas à escala real.....	186
5.6.2 Ensaio em provetes extraídos das vigas.....	187
5.6.2.1 Comparação dos resultados das amostras de Câmbala	187
5.6.2.2 Comparação dos resultados das amostras de Sapelli	190
6. ANÁLISE DE RESULTADOS E PROPOSTAS DE NOVOS MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS	195
6.1 Introdução	196
6.2 Análise dos resultados da campanha de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos	196
6.2.1 Análise dos valores das propriedades de referência	196
6.2.2 Análise das correlações entre as propriedades.....	199

6.3 Análise dos resultados das campanhas de ensaios em vigas	201
6.3.1 Análise dos valores das propriedades obtidas em cada campanha de ensaios	202
6.3.1.1 <i>Propriedades das vigas ensaiadas à flexão</i>	202
6.3.1.2 <i>Propriedades dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos extraídos das vigas</i>	204
6.3.1.3 <i>Propriedades dos mesoprovetes ensaiados à tração paralela às fibras, extraídos das vigas</i>	207
6.3.2 Correlação entre as propriedades das três campanhas de ensaios.....	208
6.3.2.1 <i>Correlações entre vigas e provetes de pequenas dimensões</i>	209
6.3.2.2 <i>Correlações entre vigas e mesoprovetes</i>	210
6.3.3 Comparação dos resultados das campanhas experimentais	211
6.4 Propostas de modelos de aferição dos valores característicos das propriedades de referência	212
6.4.1 Modelo baseado na análise de resultados de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos	213
6.4.1.1 <i>Determinação do valor característico do módulo de elasticidade à flexão</i>	215
6.4.1.2 <i>Determinação do valor característico da tensão de rotura à flexão</i>	218
6.4.1.3 <i>Aplicação dos modelos propostos a bases de dados de resultados de provetes de pequenas dimensões</i>	220
6.4.2 Modelo baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e provetes de dimensões estruturais	227
6.4.2.1 <i>Determinação do valor característico do módulo de elasticidade à flexão</i>	227
6.4.2.2 <i>Determinação do valor característico da tensão de rotura à flexão</i>	228
7. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	231
7.1 Pertinência para o estudo apresentado	231
7.2 Campanhas de ensaios dos Capítulos 4 e 5	232
7.2.1 Valores médios e característicos das propriedades de referência	233
7.2.2 Correlações entre propriedades	233
7.3 Resumo das propostas de modelos para a determinação dos valores característicos	235
7.4 Desenvolvimentos futuros	236
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	239
ANEXO A – ANEXOS CONSTANTES DO REGULAMENTO DOS PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO (RPC) – REGULAMENTO (UE) N.º 305/2011	265
A.1 Requisitos básicos das obras de construção	266
A.2 Procedimento de aprovação do Documento de Avaliação Europeu	268

A.3 Declaração de Desempenho	270
A.4 Gamas de produtos e requisitos aplicáveis aos OAT	272
A.5 Avaliação e verificação da regularidade do desempenho	275
ANEXO B – RESUMO DE ESTUDOS SOBRE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS	277
ANEXO C – RESULTADOS GRÁFICOS DOS ENSAIOS EM PROVETES DE PEQUENAS DIMENSÕES, ISENTOS DE DEFEITOS, SUJEITOS À FLEXÃO ESTÁTICA EM 3 PONTOS – CAPÍTULO 4	283
C.1 Provetes de Câmbala.....	284
C.2 Provetes de Sapelli	295
ANEXO D - CORRELAÇÕES POUCO SIGNIFICATIVAS ENTRE PROPRIEDADES AFERIDAS EM ENSAIOS DE PROVETES DE PEQUENAS DIMENSÕES	309
D.1 Propriedades de provetes de pequenas dimensões	309
D.1.1 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com a massa volúmica (ρ)	309
D.1.2 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m e f_m	311
<i>D.1.2.1 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m.....</i>	<i>311</i>
<i>D.1.2.2 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com f_m.....</i>	<i>313</i>
ANEXO E - CORRELAÇÕES POUCO SIGNIFICATIVAS ENTRE PROPRIEDADES AFERIDAS DAS CAMPANHAS DE ENSAIOS DESCRITAS NO CAPÍTULO 5	315
E.1 Propriedades de provetes de pequenas dimensões	315
E.1.1 Correlação da massa volúmica (ρ) com E_m e f_m	315
<i>E.1.1.1 Correlação da massa volúmica (ρ) com E_m</i>	<i>315</i>
<i>E.1.1.2 Correlação da massa volúmica (ρ) com f_m.....</i>	<i>317</i>
E.1.2 Correlação velocidade do ultrassom (v) com massa volúmica (ρ)	319
E.1.3 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m e f_m	321
<i>E.1.3.1 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m.....</i>	<i>321</i>
<i>E.1.3.2 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com f_m.....</i>	<i>322</i>
E.1.4 Correlação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) com f_m	324
E.2 Propriedades de mesoprovetes.....	326
E.2.1 Correlação do módulo de elasticidade à tração ($E_{t,0}$) com a tensão de rotura à tração ($f_{t,0}$), em mesoprovetes.....	326
E.3 Correlações entre vigas e mesoprovetes	326
E.3.1 Correlação para aferição das f_{mv} das vigas	326
E.3.2 Correlação para aferição dos E_{mv} das vigas.....	327

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Modelo esquemático da organização da dissertação.	9
Figura 2.1: Disseminação das florestas tropicais pelo mundo	12
Figura 2.2: Mapa da distribuição da floresta tropical africana (www7, 2017).....	16
Figura 2.3: Referência da norma europeia no Mandato M/112, para produtos de madeira estrutural.	47
Figura 2.4: Disseminação geográfica da Câmbala (www11, 2017).	50
Figura 2.5: Exemplo de árvores de Câmbala (www12, 2017) e das suas folhas (www13, 2017).	51
Figura 2.6: Disseminação geográfica da Sapelli (www11, 2017).	55
Figura 2.7: Exemplos de árvore (www14, 2017) e do seu tronco (www15, 2017).	56
Figura 3.1: Esquema representativo do ensaio de provetes segundo a norma EN 408 (CEN, 2012a).....	64
Figura 3.2: Efeito do número e do tamanho das amostras no coeficiente k_s (CEN, 2010).	66
Figura 3.3: Procedimentos para à classificação de um elemento estrutural (adaptado de Ravenshorst et al., 2004).....	70
Figura 3.4: Correlação entre os rácios de nós e as tensões de rotura à flexão: a) madeiras de resinosas; b) madeiras de folhosas (Ravenshorst et al., 2004).....	75
Figura 3.5: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensões de rotura à flexão: a) madeiras de resinosas; b) madeiras de folhosas (Ravenshorst et al., 2004).....	76
Figura 3.6: Método de medição de nós, de acordo com a BS 5756 (2007).	83
Figura 3.7: a) Desenho de um riscador; b)Medição da inclinação das fibras (CEN, 1997c).....	84
Figura 3.8: Esquema de medição dos descaios de uma secção (BS 5767, 2013).	85
Figura 3.9: Métodos de medição de empenos (BS 5756, 2007):	86

Figura 3.10: a) Equipamento Resistógrafo (Árvores & Pessoas, 2015) ; b)Gráfico obtido com Resistógrafo (NCREP, 2012):	88
Figura 3.11: a) Equipamento de Georradar; b) Exemplo de um radargrama (Júnior, 2006).	88
Figura 3.12: Esquema de funcionamento do método das vibrações induzidas (Júnior, 2006). .	89
Figura 3.13: Exemplo de uma aparelho Pilodyn (Importécnica, 2015).	90
Figura 3.14: a) Equipamento para ensaios de raio-x; b) Imagem de um ensaio por raios-gama (Júnior, 2006).	90
Figura 3.15: Método dos ecos	93
Figura 3.16: Método de transmissão	94
Figura 3.17: Componentes do aparelho Sylvatest.....	96
Figura 3.18: Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão, para a população constituída por todas as espécies (cinza), e pela espécie Karri (preto) (Ravenshorst et al. 2004).	102
Figura 3.19: Protótipo do equipamento TNO Mobile Grader (Ravenshorst et al., 2004).	102
Figura 3.20: Exemplo de gráfico de resposta de vibrações naturais transversais de um provete (Mvogo et al., 2011).	104
Figura 3.21: Resultados das campanhas de ensaios não destrutivos, de análises dos modos de vibração naturais da madeira (Mvogo et al., 2011), e da flexão estática segundo o CIRAD (Gérard, 2004).	104
Figura 3.22: Valores característicos para as amostras em madeira de Cumaru (Ravenshorst et al., 2013).	105
Figura 3.23: Relação entre os valores médios das tensões de rotura à flexão obtidas em provetes de pequenas dimensões (eixo horizontal), e os valores característicos obtido em provetes de dimensão estrutural (eixo vertical) (Ravenshorst et al., 2013).	107
Figura 3.24: Relação entre os módulo de elasticidade dinâmicos e as resistências à flexão para as amostras de Massaranduba (Ravenshorst et al., 2013).	107
Figura 3.25: Fases de evaporação da água na madeira (LNEC, 1997).	112
Figura 3.26: Curvas da humidade de equilíbrio da madeira (Carvalho, 1996).	113
Figura 3.27: Diagrama de retração (NP-615, 1973).	115
Figura 3.28: Sorção da madeira; Fenómeno de histerese (Carvalho, 1996).	116
Figura 4.1: Provette tipo. a) Câmbala, b) Sapelli.	119
Figura 4.2: Câmara climática (Fitoclíma walk-in) usada para o acondicionamento dos provetes.	120
Figura 4.3: Balança utilizada para as pesagens dos provetes e das suas amostras.	121
Figura 4.4: Equipamento de ultrassom PROCEQ – Ultrasonic Testing-Tico.	122
Figura 4.5: Ensaio à flexão em 3 pontos. a) Esquema de ensaio; b) Exemplo de provete a ser ensaiado.....	124

Figura 4.6: Curva experimental força-deformação do ensaio à flexão de um provete de Câmbala (C019).....	126
Figura 4.7: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	138
Figura 4.8: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	138
Figura 4.9: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).....	139
Figura 4.10: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	139
Figura 4.11: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	140
Figura 4.12: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	141
Figura 4.13: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	141
Figura 4.14: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	142
Figura 4.15: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	143
Figura 4.16: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	143
Figura 4.17: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).....	144
Figura 4.18: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	144
Figura 4.19: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	147
Figura 4.20: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	148
Figura 4.21: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).....	148
Figura 4.22: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	149

Figura 4.23: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , em correção do teor em água (1ª Fase).	150
Figura 4.24: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	150
Figura 4.25: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	150
Figura 4.26: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	151
Figura 5.1: Modelo de proveniência dos provetes de pequenas dimensões após ensaio à flexão das vigas à escala real.	155
Figura 5.2: Esquema de ensaio à flexão de vigas à escala estrutural (CEN, 2012a).	158
Figura 5.3: Exemplo de um ensaio à flexão de uma viga.	159
Figura 5.4: Diagrama força-deformação para o intervalo da quantificação do módulo de elasticidade (CEN, 2012a).	160
Figura 5.5: Mesoproteve tipo utilizado nos ensaios à tração paralela às fibras.	163
Figura 5.6: Equipamento utilizado na realização dos ensaios de tração em mesoprovetes.	164
Figura 5.7: Correlação entre o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,l12}$) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.	172
Figura 5.8: Correlação entre o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.	172
Figura 5.9: Correlação entre o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,l12}$) e o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$), após correção do teor em água para 12%.	172
Figura 5.10: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.	173
Figura 5.11: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,l12}$), após correção do teor em água para 12%.	173
Figura 5.12: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$), após correção do teor em água para 12%.	174
Figura 5.13: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	175
Figura 5.14: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	176
Figura 5.15: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	176
Figura 5.16: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	176

Figura 5.17: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	177
Figura 5.18: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	178
Figura 5.19: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	178
Figura 5.20: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	178
Figura 5.21: Correlação entre a tensão de rotura à flexão dos provetes extraídos das vigas (f_{mp}) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).	181
Figura 5.22: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão dos provetes extraídos das vigas (E_{mp}) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).	181
Figura 5.23: Correlação entre a massa volúmica (ρ) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).	181
Figura 5.24: Correlação entre a velocidade de ultrassom (v) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).	182
Figura 5.25: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão dos provetes extraídos das vigas (E_{mp}), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).	184
Figura 5.26: Correlação entre a massa volúmica determinada em provetes de pequenas dimensões (ρ), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).	184
Figura 5.27: Correlação entre a velocidade de ultrassom determinada em provetes de pequenas dimensões (v), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).	185
Figura 5.28: Histogramas para a espécie de Câmbala, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas massas volúmicas.	188
Figura 5.29: Histogramas para a espécie de Câmbala, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas tensões de rotura à flexão.	188
Figura 5.30: Histogramas para a espécie de Câmbala, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5, em função dos módulos de elasticidade à flexão.	188
Figura 5.31: Correlação entre a massa volúmica e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.	189
Figura 5.32: Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.	189

Figura 5.33: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.	189
Figura 5.34: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas massas volúmicas.	190
Figura 5.35: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas tensões de rotura à flexão.....	191
Figura 5.36: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função dos módulos de elasticidade à flexão.....	191
Figura 5.37: Correlação entre a massa volúmica e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos ..	191
Figura 5.38: Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.....	192
Figura 5.39: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.	192
Figura 6.1: Correlação entre os valores médios da tensão de rotura em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, com os respetivos valores característicos obtidos segundo a EN 384 (CEN, 2010) Lanvin et al. (2009).	223
Figura 6.2: Correlação entre os valores médios das tensões de rotura à flexão de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, e os respetivos valores correspondentes ao percentil 5%.	224
Figura D.1: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, sem correção do teor em água (1ª Fase).	309
Figura D.2: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	310
Figura D.3: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	310
Figura D.4: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	310

Figura D.5: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).....	311
Figura D.6: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	312
Figura D.7: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	312
Figura D.8: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	312
Figura D.9: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).....	313
Figura D.10: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	313
Figura D.11: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	314
Figura D.12: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	314
Figura E.1: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	315
Figura E.2: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	316
Figura E.3: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).....	316
Figura E.4: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	316
Figura E.5: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	317
Figura E.6: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).....	317
Figura E.7: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).....	318
Figura E.8: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).....	318
Figura E.9: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, sem correção do teor em água (1ª Fase).	319

Figura E.10: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	319
Figura E.11: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	319
Figura E.12: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	320
Figura E.13: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	321
Figura E.14: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	321
Figura E.15: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	321
Figura E.16: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	322
Figura E.17: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	322
Figura E.18: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	323
Figura E.19: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	323
Figura E.20: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	323
Figura E.21: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).	324
Figura E.22: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).	324
Figura E.23: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).	325
Figura E.24: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).	325
Figura E.25: Correlação entre o módulo de elasticidade à tração no sentido das fibras ($E_{t,0}$), e a tensão de rotura à tração no sentido das fibras ($f_{t,0}$).	326

Figura E.26: Correlação entre a tensão de rotura à tração nos mesoprovetes ($f_{t,0}$) e a tensão de rotura à flexão das viga (f_{mv}).....	326
Figura E.27: Correlação entre o módulo de elasticidade à tração dos mesoprovetes ($E_{t,0}$) e o módulo de elasticidade à flexão das viga (E_{mv}).....	327

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Dados da floresta primária dos países africanos (www2, 2016).	18
Tabela 2.2: Variação do volume de madeira em zonas de florestas e não floresta,	19
Tabela 2.3: Variação do volume de madeira das florestas e outras terras de alguns países. ...	20
Tabela 2.4: Espécies de árvores mais frequentes na floresta do Congo (x 1.000.000 m3).	20
Tabela 2.5: Área de floresta certificada a nível mundial, segundo os modelos FSC e PEFC (FSC, 2012; PEFC, 2012; FAO, 2010).....	30
Tabela 2.6: Variação percentual da distribuição de floresta certificada no mundo (FAO, 2012).31	
Tabela 2.7: Correspondência entre os Anexos (A, B, C e D) do Regulamento (CE) n.º 338/97 do Conselho, e os Anexo I, II e III da CITES (www9, 2016).	35
Tabela 2.8: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da Câmbala (<i>Milicia excelsa</i>) para um teor em água de 12% (Tsoumis, 1991; LNEC, 1997).	52
Tabela 2.9: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da Sapelli (<i>Entandrophragma cylindricum</i>) para um teor em água de 12% (CIRAD, 2003; PROTA, 2008).	57
Tabela 2.10: Comparação entre as propriedades de referência entre as espécies de Câmbala (<i>Milicia excelsa</i>) e Sapelli (<i>Entandrophragma cylindricum</i>) para um teor em água de 12% (Tsoumis, 1991; LNEC, 1997; CIRAD, 2003; PROTA, 2008).	59
Tabela 3.1: Classes de Resistência previstas pela EN 338 (CEN, 2009a) para as madeiras de resinosas.	68
Tabela 3.2: Classes de Resistência previstas pela EN 338 (CEN, 2009a) para as madeiras de folhosas.	68
Tabela 3.3: Características a avaliar e respectivos limites atribuídos pelas normas de classificação visual britânica (BS 5756, 2007), francesa (NF B 52-001-1, 2011) e holandesa (NEN 5493, 2011) (adaptado de Gard et al., 2013).	80
Tabela 3.4: Máximos admissíveis no comprimento de fissuras num elemento de madeira.....	84

Tabela 3.5: Valores máximos admissíveis para o empeno em peças com mais de 2 metros de comprimentoa (adaptado de CEN, 2016).	86
Tabela 3.6: Resumo dos métodos de ensaio não destrutivos para inspeção de estruturas de madeira (adaptado de Machado, 2003).	91
Tabela 3.7: Critério de escolha da técnica não-destrutiva a utilizar, em função do objetivo de inspeção (Júnior, 2006).	92
Tabela 3.8: Resumo da pesquisa sobre a aplicação de UPV na análise não destrutiva de madeira (adaptado de Oliveira, 2012).	97
Tabela 3.9: Estudos recentes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através de do ultrassom, e o módulo de elasticidade à flexão estático.	98
Tabela 3.10: Propriedades mecânicas da espécie de Cumaru (<i>Dypterix odorata</i>): a) Resultados dos provetes de dimensões estruturais e de pequenas dimensões; b) Resultados dos provetes de pequenas dimensões; c) Valores correspondentes ao percentil 5% das amostras (Ravenshorts et al., 2010).	101
Tabela 3.11: Classificação das madeiras em função do seu coeficiente de retração volumétrico α_v (Carvalho, 1966).	115
Tabela 4.1: Campanha experimental realizada.	119
Tabela 4.2: Divisão da amostra total, em grupos delimitados pelo peso,	125
Tabela 4.3: Valores da massa volúmica dos provetes antes e após	128
Tabela 4.4: Valores da tensão de rotura em flexão dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.	129
Tabela 4.5: Valores do módulo de elasticidade em flexão dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.	130
Tabela 4.6: Valores da velocidade de propagação da onda ultrassónica ao longo dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.	131
Tabela 4.7: Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.	131
Tabela 4.8: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m	140
Tabela 4.9: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m	142
Tabela 4.10: Resumo da correlação entre E_m e f_m	144
Tabela 4.11: Resumo da correlação entre E_{din} e E_m	149
Tabela 4.12: Resumo da correlação entre E_{din} e f_m	151
Tabela 5.1: Número de provetes por campanha de ensaios.	156
Tabela 5.2: Limites permitidos para as classes de resistência, para os elementos estruturais em madeira de folhosa tropical (BS 5756, 2007).	157
Tabela 5.3: Divisão das amostras de provetes de pequenas dimensões	162
Tabela 5.4: Resultados da campanhas de ensaios de vigas.	165

Tabela 5.5: Resultados das campanhas de ensaios de vigas corrigidos para um teor em água de 12%.....	166
Tabela 5.6: Massa volúmica dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.....	167
Tabela 5.7: Velocidade do ultrassom em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.....	167
Tabela 5.8: E_{din} em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.....	168
Tabela 5.9: f_m em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.....	169
Tabela 5.10: E_m em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água de 12%.....	169
Tabela 5.11: Valores médios de $f_{t,0}$ em mesoprovetes por viga.....	170
Tabela 5.12: Valores finais de $f_{t,0}$ e $E_{t,0}$ das amostras de mesoprovetes.....	171
Tabela 5.13: Resumo das correlações estabelecidas entre as propriedades aferidas das vigas.....	174
Tabela 5.14: Resumo da correlação entre E_m e f_m em provetes extraídos das vigas.....	177
Tabela 5.15: Resumo da correlação entre E_{din} e E_m em provetes extraídos das vigas.....	179
Tabela 5.16: Expressões para as correlações entre propriedades dos provetes de pequenas dimensões extraídos das vigas exceptuando as correlações de E_m com f_m e E_{din} com E_m	179
Tabela 5.17: Resultados das tensões de rotura à flexão por viga (f_{mv}), e das médias das tensões de rotura dos provetes de pequenas dimensões (f_{mp}), por viga.....	183
Tabela 5.18: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão por viga (E_{mv}), e das médias dos módulos de elasticidade dos provetes de pequenas dimensões (E_{mp}), por viga.....	185
Tabela 5.19: Comparação de resultados das tensão de rotura à flexão das amostras de provetes de pequenas dimensões ensaiados no Cap. 4 (f_{mp12} e E_{mp12}), com as amostras de vigas ensaiadas no Cap. 5 ($f_{mv12}^{a)}$ e f_{mp12}).....	187
Tabela 5.20: Comparação de resultados da Câmbala, das campanhas de ensaios realizadas nos Capítulos 4 e 5, para aferição da massa volúmica (ρ_{12} e ρ_{p12}), da tensão de rotura à flexão (f_{m12} e f_{mp12}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_{m12} e E_{mp12}), obtidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.....	190
Tabela 5.21: Comparação de resultados da Sapelli, das campanhas de ensaios realizadas nos Capítulos 4 e 5, para aferição da massa volúmica (ρ_{12} e ρ_{p12}), da tensão de rotura à flexão (f_{m12} e f_{mp12}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_{m12} e E_{mp12}), obtidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.....	193
Tabela 6.1: Valores finais das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, das amostras de provetes de pequenas dimensões, do Capítulo 4.....	197

Tabela 6.2: Comparação dos valores das propriedades de referência obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões, ensaiadas no Capítulo 4, com valores da bibliografia da área.....	198
Tabela 6.3: Valores característicos das propriedades de referência, obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões do capítulo 4.	199
Tabela 6.4: Expressões de correlação entre as propriedades obtidas das campanhas de ensaios das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 4, correspondentes à 2ª Fase.....	200
Tabela 6.5: Resumo dos valores de r^2 para as diferentes fases das correlações entre as propriedades, obtidas das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 4.	201
Tabela 6.6: Valores finais das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, das amostras de provetes de pequenas dimensões, do Capítulo 5.	204
Tabela 6.7: Comparação dos valores das propriedades de referência obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões, ensaiadas no Capítulo 5, com valores da bibliografia da área.....	205
Tabela 6.8: Valores característicos das propriedades de referência, obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões do capítulo 5.	206
Tabela 6.9: Resumo dos valores de r^2 para as diferentes fases das correlações entre as propriedades, obtidas das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 5.	207
Tabela 6.10: Expressões de correlação entre as tensões de rotura à tração paralelas às fibras ($f_{t,0}$).....	208
Tabela 6.11: Valores médios das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, obtidos a partir dos ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5.	213
Tabela 6.12: Valores característicos obtidos a partir de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5, utilizando as regras previstos para provetes de dimensão estrutural segundo a EN 384 (CEN, 2010).....	213
Tabela 6.13: Resumo dos valores dos coeficientes de determinação para as correlações estabelecidas entre as propriedades das espécies, obtidas dos ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, nos Capítulos 4 e 5.....	214
Tabela 6.14: Valores médios de E_m e E_{din} , das espécies de Câmbala e Sapelli, nos Capítulos 4 e 5.....	217
Tabela 6.15: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos dos módulos de elasticidade à flexão, segundo proposta de Hugh (2010), e segundo a expressão proposta no presente trabalho.	218
Tabela 6.16: Resumo dos valores característicos para a tensão de rotura à flexão, obtidos através da expressão proposta por Lanvin et al. (2009).....	218

Tabela 6.17: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo proposta de Lanvin et al. (2009), e segundo a expressão proposta no presente trabalho.	220
Tabela 6.18: Resumo dos valores médios e dos respetivos coeficientes de variação, para as velocidades de propagação das ondas ultrassónicas, nos ensaios de provetes de pequenas dimensões.	221
Tabela 6.19: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão, às espécies classificadas na EN 1912 (CEN, 2012b).	222
Tabela 6.20: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão, às espécies classificadas por Lavin et al. (2009).	222
Tabela 6.21: Valores médios e do percentil 5%, das tensões de rotura à flexão em provetes de pequenas dimensões, dos Capítulos 4 e 5.	224
Tabela 6.22: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos da tensão de rotura à flexão, às espécies classificadas na EN 1912 (CEN, 2012b).	225
Tabela 6.23: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos da tensão de rotura à flexão, às espécies classificadas por Lavin et al. (2009).	226
Tabela 6.24: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo expressão proposta no presente trabalho, baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e de dimensões estruturais.	228
Tabela 6.25: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo expressão proposta no presente trabalho, baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e de dimensões estruturais.	229
Tabela 7.1: Modelos propostos para a determinação das propriedades características de referência, a partir de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, e de uma pequena amostra de provetes ensaiados segundo a EN 408 (CEN, 2012a).	236
Tabela D.1: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e massa volúmica (ρ).	311
Tabela D.2: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e E_m	313
Tabela D.3: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e f_m	314
Tabela E.1: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m em provetes extraídos.	317
Tabela E.2: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m em provetes extraídos.	318
Tabela E.3: Resumo da correlação entre velocidade de ultrassom (v) e massa volúmica (ρ) em provetes extraídos.	320
Tabela E.4: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e E_m em provetes extraídos.	322
Tabela E.5: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e f_m em provetes extraídos.	324

Tabela E.6: Resumo da correlação entre E_{din} e f_m em provetes extraídos.....	325
Tabela E.7: Resultados das tensões de rotura à flexão por viga (f_{mv}), e das médias das tensões de rotura à tração dos mesoprovetes ($f_{t,o}$), por viga.	327
Tabela E.8: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão por viga (E_{mv}), e das médias dos módulos de elasticidade à tração dos mesoprovetes (E_{mp}), por viga.	328

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS TÉCNICOS

Maiúsculas latinas

C	• constante dinâmica	G	• módulo de distorção
$C.V.$	• coeficiente de variação	M	• ensaios à tração em mesoprovetes extraídos das vigas
E_{din}	• módulo de elasticidade dinâmico	Max	• valor máximo da amostra
E_{din12}	• módulo de elasticidade dinâmico para um teor em água de 12%	Min	• valor mínimo da amostra
E_m	• módulo de elasticidade à flexão	$P3p$	• ensaios à flexão em 3 pontos em provetes extraídos das vigas
E_{m12}	• módulo de elasticidade à flexão para um teor em água de 12%	PSF	• ponto de saturação das fibras
$E_{m,g}$	• valor global do módulo de elasticidade à flexão	V	• volume do provete
$E_{m,g}$	• valor global do módulo de elasticidade à flexão	V_1	• volume do provete saturado
$E_{m,k}$	• valor característico do módulo de elasticidade à flexão	V_2	• volume do provete seco ao ar
E_{mp}	• módulo de elasticidade à flexão em provetes de pequenas dimensões	V_3	• volume do provete seco em estufa
E_{mv}	• módulo de elasticidade à flexão em vigas	$V4p$	• ensaios à flexão em 4 pontos de vigas
$E_{t,0}$	• módulo de elasticidade à tração na direção das fibras	V_w	• volume do provete com teor em água w
F_1	• 10% da força máxima aplicada	W	• módulo de flexão da secção transversal
F_2	• 40% da força máxima aplicada		
F_{max}	• força máxima aplicada		

Minúsculas latinas

a	• distância entre o local de carregamento e o apoio mais próximo no ensaio à flexão
-----	---

b	• base da secção transversal do provete	n	• número de provetes
b_w	• base da secção transversal do provete com teor em água w	m_w	• massa do provete para um teor
f_m	• tensão de rotura à flexão	r^2	• coeficiente de determinação
f_{m12}	• tensão de rotura à flexão para um teor em água de 12%	t	• tempo de percurso da onda ultrassónica
$f_{m,k}$	• valor característico da tensão de rotura à flexão	v	• velocidade de propagação da onda ultrassónica
f_{mp}	• tensão de rotura à flexão em provetes	v_{12}	• velocidade de propagação da onda ultrassónica com um teor em água de 12%
f_{mv}	• tensão de rotura à flexão em vigas	w	• teor em água da madeira
f_{mw}	• tensão de rotura à flexão para um teor em água w	w_1	• deformada provocada por F_1
$f_{t,0}$	• tensão de rotura à tração paralela às fibras	w_2	• deformada provocada por F_2
f_{05}	• tensão de rotura à tração paralela às fibras correspondente ao percentil 5% da amostra		
h	• altura da secção transversal do provete		
h_w	• altura da secção transversal do provete para um teor em água w		
k	• coeficiente de volumetria		
l	• comprimento do provete		
l_1	• dimensão numa dada direcção, do provete saturado		
l_2	• dimensão numa dada direcção, do provete seco ao ar		
l_3	• dimensão numa dada direcção, do provete seco na estufa		
l_m	• afastamento entre os apoios no ensaio à flexão		
l_w	• comprimento do provete para um teor em água w		
m_1	• massa do provete antes da secagem		
m_2	• massa do provete anidro		

Maiúsculas gregas

ρ	• massa volúmica
ρ_k	• valor característico da massa volúmica
ρ_w	• massa volúmica ao teor em água de w
ρ_{12}	• massa volúmica ao teor em água de 12%
ρ_{05}	• massa volúmica correspondente ao percentil 5% da amostra

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

—

RESUMO: De uma forma geral, as madeiras de folhosas, e em especial as tropicais, apresentam melhores características mecânicas que as madeiras de resinosas. No entanto, os requisitos para a caracterização mecânica das madeiras, descritos pela atual normalização europeia, juntamente com a legislação para a importação de espécies tropicais para a Europa, tornaram-se fatores relevantes que comprometem a possibilidade do uso destas madeiras como material estrutural. Desta forma, a sua ampla aplicação permanece na utilização como material para revestimentos. Com base neste enquadramento, é definido o âmbito da tese e os objetivos que se propõem atingir com o presente estudo.

1.1 Enquadramento geral

Desde os primórdios da humanidade que a madeira tem sido um material aproveitado pelo homem para o desempenho das mais diferentes funções. Inicialmente, usada para o fabrico de utensílios e ferramentas, foi empregue na construção civil na conceção de elementos de função estrutural e acabamentos. Mais tarde, o seu uso diversificou-se por todas as áreas da indústria, desde a sua utilização como material maciço na construção naval, passando pela sua transformação em derivados como são os casos dos folheados, dos contraplacados, dos aglomerados e do papel. Todos eles com uma variada panóplia de aplicações.

Dentro da construção civil, a madeira tem um papel fundamental, quer no uso de elementos de carpintaria quer de marcenaria. De entre estas duas áreas, é possível destacar o fabrico de portas, guardas, rodapés, janelas, soalhos, etc. Para além destes produtos, a nível estrutural, a madeira pode ser transformada em vigas e pilares para a construção de coberturas, pavimentos, pavilhões, passadiços, entre outros.

Mecanicamente, comparando a madeira com os principais materiais em uso para elementos estruturais, o aço e o betão, esta apresenta-se como um material com excelente comportamento na relação massa volúmica/resistência quando os esforços são orientados na direção das suas fibras. Tem também um excelente comportamento como isolante térmico e acústico. Na relação com o fogo, ao contrário do aço que, com o aumento da temperatura, vai perdendo a rigidez e consequentemente a resistência e do betão que se vai desagregando ao perder as ligações internas entre os seus diferentes constituintes, na madeira, as camadas exteriores vão sendo consumidas pelo fogo, carbonizando-as até uma profundidade de cerca de 2 cm. À medida que a camada carbonizada vai ganhando espessura, passa a funcionar como proteção do núcleo do elemento estrutural, permitindo, aos elementos mais robustos, manter grande parte das suas capacidades resistentes (Branco, 2003).

No universo das madeiras, atendendo à sua constituição anatómica, podemos encontrar dois grandes grupos: o grupo das madeiras de resinosas e o grupo das madeiras de folhosas. Não sendo o âmbito do presente estudo analisar as diferenças anatómicas entre os dois grupos, importa referir que as madeiras de resinosas se podem encontrar essencialmente em climas temperados e frios, enquanto que as madeiras de folhosas, apesar de também existirem em climas temperados, apresentam um maior desenvolvimento em zonas subtropicais, tropicais e equatoriais (www1, 2017).

A beleza natural e o elevado valor comercial das madeiras tropicais fazem com que, normalmente, sejam utilizadas para revestimentos, móveis, vedações, etc. (Gard et al., 2013). São

também muito requisitadas quando se exigem elevados níveis de durabilidade e de capacidade de resistência mecânica, nomeadamente em pontes, comportas, obras portuárias, postes de amarrações, diques, estacas prancha, etc. (Kuilen et al. 2005.) Usam-se ainda em estruturas em contacto direto com o solo, situações nas quais as madeiras de resinosas rapidamente se deteriorariam sem a aplicação prévia de tratamentos químicos (Kuilen et al., 2002). Recentemente, estudos realizados na Holanda, desenvolveram a possibilidade da aplicação de madeiras tropicais em railes para autoestradas e em vigas laminadas para estruturas de telhados (Kuilen, 2013).

Apesar dos elevados níveis de biodiversidade das florestas tropicais, que permitem uma vasta panóplia de espécies de madeiras, o mercado comercial tem demonstrado interesse num número muito reduzido destas espécies (Sarre et al. 2013). Esta opção tem tido implicações diretas no risco da sustentabilidade destas espécies, em determinadas zonas do globo, tal como da própria floresta tropical em que se inserem. Nesse sentido, tem-se procurado valorizar novas espécies, considerando-se que o seu uso permitirá uma exploração mais diversificada, reduzindo o impacto sobre as espécies mais procuradas, permitindo uma maior sustentabilidade da própria floresta tropical (Sarre et al. 2013).

1.2 Âmbito da tese

O facto da importação de madeiras tropicais de florestas que não sejam geridas de forma sustentável, ter sido proibida para o mercado europeu através da aplicação do novo Regulamento da Madeira e seus derivados (European Union Timber Regulation, EUTR, 2010), faz com que todo o mercado de transação de madeiras tropicais sofra uma transformação. Deste modo, nos países exportadores de madeira, surgiu a necessidade de ir ao encontro das novas exigências legais. Estas exigências tiveram implicação direta na promoção e desenvolvimento de procedimentos de gestão sustentável para as florestas tropicais. Cerca de 1 milhão de metros cúbicos de madeira tropical serrada, entra todos os anos na Europa, sendo os seus principais importadores a Bélgica e a Holanda, que acabam por atuar como distribuidores no mercado europeu (Gard et al., 2013).

Antes da implementação do novo EUTR, desde meados do século passado que a Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES) tem vindo a desenvolver esforços para o controlo no abate e comercialização de espécies tropicais. Nesse sentido, importadores, distribuidores e comerciantes, começaram a exigir comprovativos que atestassem da legalidade da proveniência das madeiras a comercializar. Estas exigências fize-

ram com que, nas últimas décadas, várias “novas espécies” tropicais, tenham chegado ao mercado Europeu, provenientes de florestas geridas de forma sustentável (Ravenshorst et al. 2013). Cerca de 80% destas espécies pertence ao grupo das “espécies menos conhecidas”, traduzindo-se no desconhecimento das suas características mecânicas para os mercados comerciais (Gard et al., 2013).

Estas madeiras chegam ao mercado europeu em lotes, debaixo de um nome comercial extremamente volátil de zona para zona, e em pequenas quantidades por espécie. Esta realidade torna a aplicação das atuais normas europeias, para o conhecimento das respetivas características mecânicas, praticamente inviável. Nesse sentido, o aprofundar de conhecimentos relativos aos processos de aferição das capacidades resistentes das madeiras tropicais, para efeitos de cálculo e dimensionamento, tornou-se extremamente relevante (Kuilen et al., 2007).

Com a crescente globalização, o acesso a madeiras de todo o mundo está cada vez mais facilitado, provocando alterações no mercado comercial. Do ponto de vista da valorização das espécies tropicais menos conhecidas, nomeadamente da possibilidade de aplicação destas madeiras em elementos estruturais, existe a necessidade de se conhecerem as suas propriedades físicas e mecânicas para a respetiva classificação. O seu conhecimento permitirá a otimização da matéria prima, reduzindo a quantidade de madeira utilizada, consequentemente, beneficiando o próprio ambiente (Kuilen et al., 2005).

A classificação das madeiras tropicais, por norma, é feita após a sua entrada no mercado europeu, levantando dois grandes desafios. O primeiro prende-se com a identificação das próprias espécies, uma vez que estas, após serradas, e dentro do mesmo género, apresentam características visuais extremamente difíceis de diferenciar (Ravenshorst et al., 2013; Gard et al., 2013). Também os seus nomes comerciais mais comuns, normalmente imputados pela indústria de um país, não seguem nenhum procedimento específico de atribuição, sendo geralmente designados por comerciantes individuais.

O segundo desafio está relacionado com o atestar da proveniência das madeiras. Resultado dos processos de abate, transformação e transporte das madeiras até aos mercados comerciais, torna-se difícil aferir, com exatidão, a origem destas madeiras (Gard et al., 2013). Este aspecto tem vindo a ser ultrapassado com a implementação de procedimentos de certificação das madeiras.

Relativamente à caracterização mecânica das espécies, esta pode ser realizada por diferentes métodos, dependendo do país ou zona em questão. Estes métodos podem ser baseados em ensaios de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, ou em provetes de dimensão estrutural. Apesar dos provetes de pequenas dimensões permitirem a realização de um maior

número de ensaios, fica a questão de se saber como é que os seus resultados poderão ser relacionados com os valores característicos de resistência das madeiras, para posterior aplicação no dimensionamento de elementos estruturais (Ravenshorst et al., 2010).

A determinação das propriedades de referência de espécies de folhosas tropicais, partindo de provetes de pequenas dimensões, é uma prática muito comum nos países fora da Europa, fundamentando a grande maioria da base de dados das suas características mecânicas.

Atualmente, os procedimentos de caracterização mecânica implementados pela normalização europeia para a determinação da resistência das madeiras, nomeadamente através da norma EN 408 (CEN, 2012a), são realizados através de ensaios em provetes de dimensão estrutural, e focados essencialmente em madeiras de resinosas, com a implícita aceitação de que os mesmos serão válidos para as madeiras de folhosas tropicais (Kuilen, 2007). Porém, segundo a norma EN 384 (CEN, 2010), para a determinação dessas mesmas propriedades, existe a necessidade de serem realizadas extensas campanhas de ensaios, com implicações ambientais (Jamil et al., 2013)

Para o crescente número de espécies tropicais que vão chegando ao mercado europeu, o conhecimento das suas características mecânicas, através dos procedimentos previstos na normalização europeia, torna-se pouco viável, quer pela quantidade de amostras necessárias à dimensão estrutural, quer pelo seu custo, quer ainda pela dificuldade de definição das populações das espécies a caracterizar (Ravenshorst et al., 2010). Lanvin et al. (2009) refere ainda a impossibilidade de as campanhas de ensaios se realizarem num tempo oportuno, que permita a utilização da marcação CE, para efeitos de comercialização no mercado único europeu. Para fazer uso destas madeiras, de forma económica, os procedimentos de caracterização deverão ser otimizados (Kuilen et al., 2007).

Têm sido realizados vários estudos que procuram desenvolver procedimentos de caracterização mecânica baseados em métodos não destrutivos, concretamente, através do uso de ultrassons ou das frequências naturais de vibração das madeiras. De uma forma geral, para madeiras de folhosas tropicais, têm-se conseguido resultados encorajadores, que fizeram com que fossem apresentados modelos alternativos para a caracterização destas espécies.

São também largamente estudadas as possíveis correlações entre as propriedades mecânicas de provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais. Estes estudos justificam-se pela enorme base de dados existentes de propriedades mecânicas de espécies tropicais, aferidas através de ensaios em provetes de pequenas dimensões. Só na Malásia, podem ser encontradas mais de 3000 espécies. Este número torna praticamente impossível a realização de ensaios, à escala estrutural, para todas elas (Wong, 1982).

1.3 Objetivos e limitações

Com o presente trabalho pretende-se, acima de tudo, desenvolver um modelo expedito de determinação das propriedades físicas e mecânicas de lotes de espécies de madeiras folhosas tropicais, de modo a potenciar o seu uso em elementos estruturais. Pelos motivos apresentados na secção anterior, pretende-se que o procedimento se baseie na caracterização através de ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos, através dos quais se possam obter as respetivas propriedades mecânicas, deduzindo-se os valores característicos e a respetiva Classe de Resistência da amostra. O facto de se optar por provetes de pequenas dimensões, em detrimento do uso de provetes de dimensão estrutural, previstos na norma EN 408 (CEN, 2012a), tem, à partida, como vantagens evidentes, o fator económico e a trabalhabilidade das amostras. Para além disso, a realidade atual da importação de madeiras tropicais, relativamente às quantidades, por espécie, com a mesma origem, torna-se num fator fortemente limitativo para a aplicação da normalização europeia.

Para atingir os objetivos delineados, procurou estudar-se duas espécies tropicais com vasta aplicação no mercado europeu. Uma vez que a norma EN 384 (CEN, 2010), no seu ponto 6, prevê um método alternativo com recurso ao ensaio de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, complementados com o conhecimento das propriedades mecânicas de espécies semelhantes, em provetes de dimensões estruturais, pretendeu-se que fosse expectável que as propriedades físicas e mecânicas das espécies a estudar fossem semelhantes. Entendeu-se ainda ser relevante que pelo menos uma das espécies estivesse caracterizada mecanicamente pelas normas europeias, para que assim pudesse servir de referência para os valores a obter.

Desta forma, optou-se por escolher a espécie de Câmbala (*Milicia excelsa*), classificada mecanicamente como sendo uma espécie da Classe de Resistência D40, pela norma EN 1912 (CEN, 2012b), e que tem ampla aplicação na construção civil, em especial nos países africanos. Foi também escolhida a espécie de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) uma vez que, à semelhança da espécie de Câmbala, pode ser encontrada nos países da África intertropical, estando também classificada com a Classe de Resistência D40, a partir da EN 1912 (CEN, 2012b).

Enquadrado com os objetivos do trabalho e baseadas nos resultados obtidos, são apresentadas propostas de modelos para a classificação de espécies tropicais .

1.4 Estrutura da tese

Tendo por base o âmbito do presente estudo, definido anteriormente, optou-se por estruturar a presente tese em sete capítulos fundamentais.

No Capítulo 1, são definidos os objetivos da tese, enquadrando-os na nova realidade comercial do mercado europeu de madeiras e na finalidade de utilização das espécies tropicais, sabendo-se das dificuldades inerentes de aplicação da atual normalização europeia para a caracterização mecânica destas espécies.

No Capítulo 2, enquadrado com os objetivos definidos no Capítulo 1, é realizado um estudo de conhecimento geral da realidade das florestas tropicais, em especial das florestas da África Central, local de proveniência das amostras. É feita uma abordagem genérica à gestão e sustentabilidade das florestas tropicais e à sua implicação na exploração de madeiras. É abordada a nova regulamentação europeia, em que são analisados os aspetos legais da comercialização das madeiras tropicais e seus derivados. Dentro do mercado europeu, é analisada a importância e exigências da marcação CE para a livre circulação dos produtos de construção, em especial, nos produtos de madeira. Por fim, é feito um levantamento da realidade das espécies estudadas, do reconhecimento dos seus habitats, da disseminação e sustentabilidade das espécies, dos usos e aproveitamentos dos seus espécimes ou parte deles, da descrição física e mecânica das suas madeiras, e dos enquadramentos nos mercados comerciais.

No Capítulo 3, são abordados os procedimentos de caracterização das propriedades físicas e mecânicas das madeiras, em especial das espécies de folhosas tropicais, na atual normalização europeia, e a classificação das espécies. É feito um enquadramento com os métodos não destrutivos mais comuns, com relevância para o método de ultrassons, utilizado no presente estudo. São referenciados e analisados estudos de outros autores que, orientados pelos mesmos objetivos, apresentam propostas alternativas à normalização europeia para a classificação de espécies tropicais de folhosas. Por fim, é apresentada uma abordagem à estabilidade dimensional das madeiras, nomeadamente, à influencia do teor em água nas mesmas.

No Capítulo 4, são descritos e apresentados os resultados dos procedimentos de ensaios de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, para a caracterização física e mecânica das espécies. São ainda correlacionadas as características obtidas, de modo a estudar a viabilidade de determinação das propriedades mecânicas, através de procedimentos não destrutivos e semi-destrutivos, concretamente, através de ensaios à flexão e de ultrassom.

No Capítulo 5, são caracterizados provetes de dimensão estrutural, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012a). Após os ensaios à flexão, até à rotura, dos referidos provetes, são extraídos provetes prismáticos de pequenas dimensões, isentos de defeitos, e mesoprovetes. Os novos provetes são caracterizados mecanicamente e correlacionadas as suas características com as obtidas a partir dos provetes de dimensão estrutural. Neste capítulo, pretende estudar-se as correlações entre as propriedades aferidas por diferentes campanhas de ensaios, de modo a poderem analisar-se tendências que ajudem a prever os valores característicos das amostras de provetes de dimensões estruturais, partindo de provetes de pequenas dimensões.

No Capítulo 6, são avaliados os resultados obtidos da caracterização mecânica das amostras ensaiadas nos Capítulos 4 e 5, começando-se por estabelecer comparações com outros estudos realizados com as mesmas espécies. São avaliadas as possíveis correlações entre as diferentes propriedades. Primeiramente, as correlações são analisadas dentro das mesmas campanhas de ensaios, quer do Capítulo 4, quer do Capítulo 5, para, posteriormente, se procurarem correlações e similaridades de resultados entre as campanhas de ensaios dos dois capítulos. Por fim, através dos resultados obtidos, pretende apresentar-se modelos alternativos ao proposto pela normalização europeia, para a aferição dos valores característicos das propriedades de referência para efeitos de cálculo.

Por fim, no Capítulo 7, tendo por base os objetivos do presente estudo, são apresentadas as conclusões gerais, baseadas nas diferentes campanhas de ensaios realizadas ao longo da tese. São ainda propostos novos projetos para desenvolvimentos futuros.

A tese termina com a apresentação das Referências Bibliográficas utilizadas ao longo do texto e com uma secção de Anexos onde são congregados os documentos mais relevantes constantes do Regulamento dos Produtos de Construção, enumerados os estudos de outros autores, apresentados os resultados das campanhas de ensaios e os resultados das análises de correlações menos significativas, abordadas nos Capítulos 4 e 5.

Na Figura 1.1 é apresentado um fluxograma da estrutura do presente trabalho.

<p>Capítulo 1</p> <p>Introdução</p>	<p>Contextualização e justificação para o trabalho desenvolvido</p>
<p>Capítulo 2</p> <p>A floresta tropical africana e a exploração das suas madeiras para aplicações estruturais</p>	<p>Conhecimento geral sobre as florestas tropicais, a sua sustentabilidade, e o compromisso europeu para esta realidade. Conceito de produtos com marcação CE. É dado enfoque às espécies analisadas, Câmbala e Sapelli.</p>
<p>Capítulo 3</p> <p>Classificação e caracterização das madeiras tropicais para aplicações estruturais</p>	<p>Enquadramento com os procedimentos gerais de classificação das madeiras. Enfoque sobre as madeiras tropicais, incluindo estudos realizados sobre as mesmas.</p>
<p>Capítulo 4</p> <p>Avaliação experimental de elementos de pequenas dimensões de Câmbala e Sapelli</p>	<p>Capítulo 5</p> <p>Correlação entre propriedades de diferentes escalas e ensaios</p>
<p>Procedimentos desenvolvidos nas diferentes campanhas de ensaios e respectivos resultados</p>	
<p>Capítulo 6</p> <p>Análise de resultados e propostas de novos modelos de classificação de madeiras tropicais</p>	<p>Apresentação de modelos alternativos à normalização europeia, para a classificação de espécies tropicais, baseados nas campanhas de ensaios realizadas.</p>
<p>Capítulo 7</p> <p>Conclusões e futuros desenvolvimentos</p>	

Figure 1.1: Modelo esquemático da organização da tese.

Capítulo 2

A FLORESTA TROPICAL AFRICANA E A EXPLORAÇÃO DAS SUAS MADEIRAS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

RESUMO: No presente capítulo é feito um enquadramento geral da realidade atual da floresta tropical africana. É abordada a problemática da desflorestação e da gestão sustentável das florestas tropicais e é feito um enquadramento com a legislação europeia, relativamente à importação de madeira e seus derivados. É apresentado, sucintamente, o novo regulamento europeu de comercialização de produtos de construção e a respetiva marcação CE. Especificamente, são abordados os elementos estruturais em madeira. Por fim, são analisadas as espécies de Câmbala e Sapelli em diversas vertentes, designadamente, os seus habitats naturais, as suas características físicas e mecânicas, os seus usos e aproveitamentos, os respetivos valores comerciais e a sustentabilidade de cada espécie.

2.1 Florestas tropicais

2.1.1 Enquadramento geral

As florestas ocupam cerca de 30% da área emersa do planeta, pouco mais de 4 mil milhões de hectares, apresentando uma enorme variedade percentual de ocupação entre as diferentes zonas do globo. Desempenham um papel fulcral para a vida humana devido às suas capacidades de providenciarem produtos e serviços cruciais de conservação e mitigação das mudanças climáticas, da regulação das águas e das chuvas do planeta, com influência direta nas explorações agrícolas de todo o mundo e na prevenção da erosão dos solos. Têm também relevância social, económica, política e cultural em muitas comunidades, promovendo a empregabilidade e contribuindo para as economias locais e nacionais (Mansur et al., 2013).

As florestas tropicais localizam-se entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, aproximadamente entre as latitudes 23,26° para norte e para sul, permitindo o seu crescimento e desenvolvimento nas regiões da África Central, sul da Ásia, norte da Austrália, América do Sul e Central, e em muitas ilhas dos oceanos Índico e Pacífico. A Figura 2.1 apresenta a localização das florestas tropicais pelo mundo.

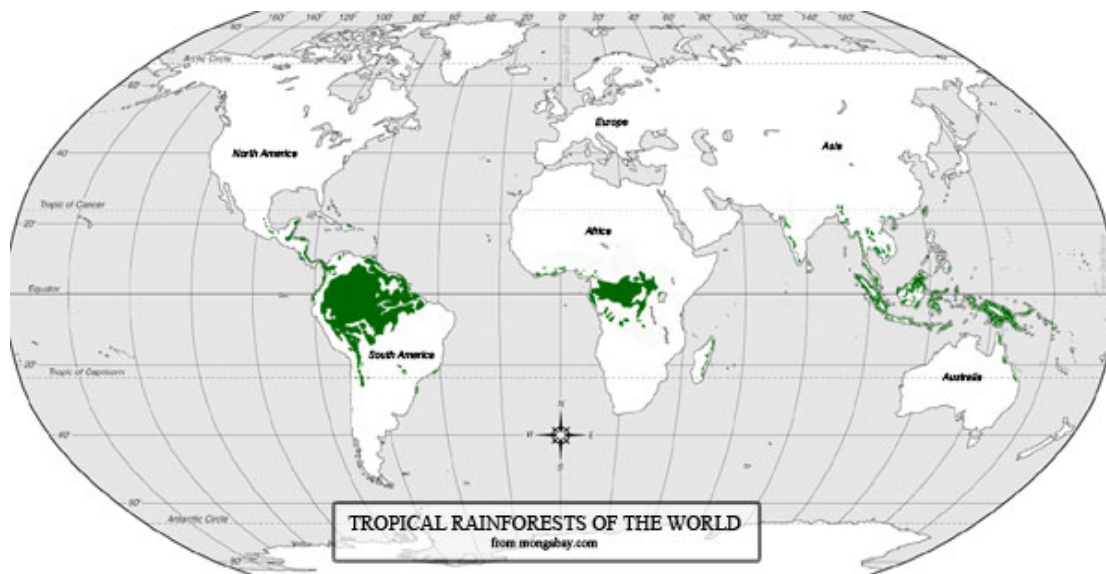


Figura 2.1: Disseminação das florestas tropicais pelo mundo (www2, 2016).

Estas zonas do globo caracterizam-se por uma forte e constante intensidade da luz solar durante todo o ano, originando um clima quente e estável entre os 20 e os 35 °C e pela elevada precipitação, ao longo do ano, ultrapassando os 200 cm (wwf.panda.org, acedido em 10 de março de 2015).

As florestas tropicais produzem cerca de 40% do oxigênio do planeta e oferecem uma diversidade de plantas com função medicinal, capazes de promover cerca de 25% dos produtos medicinais (www3, 2017). Juntamente com as restantes florestas, retêm cerca de 300 bilhões de toneladas de carbono, aproximadamente 40 vezes as emissões de gases de combustíveis fósseis provocadores do efeito de estufa (www4, 2016).

Estas florestas apresentam um elevado nível de biodiversidade, exibindo um dossel por camadas de ramos e folhas que se formam devido ao curto espaço existente entre as diversas árvores. São florestas que evoluíram ao longo de milênios, tornando-se num dos maiores celeiros de diversidade natural no planeta (www4, 2016). Estima-se que sejam o habitat e sustento de metade das espécies de fauna e flora de todo o planeta (www3, 2017), e a proveniência de entre 40 e 75% das espécies existentes (www5, 2007).

Um único hectare de floresta tropical contém para cima de 100 espécies de árvores. Um corolário da alta diversidade é o facto de árvores da mesma espécie subsistirem em baixas densidades, existindo menos de uma árvore de determinada espécie por hectare, cobrindo, muitas vezes, amplas áreas geográficas, podendo ter grandes tamanhos populacionais absolutos em grandes escalas espaciais (Zimmerman et al., 2012; Primack et al., 1992; Poorter et al., 1996; Pitman et al., 1999).

Devido à diversidade do tipo de sementes e do comportamento dos animais na sua dispersão, os padrões de disseminação de sementes variam amplamente. É por isso provável que a diversidade de animais que se alimentam de frutos e sementes das árvores das florestas tropicais influencie fortemente a sua distribuição espacial (Zimmerman et al., 2012). Além disso, a regeneração das florestas tropicais é conhecida por ser conduzida pela dinâmica de perturbação em pequena escala e pela ocorrência aleatória de clareiras (Denslow, 1987). As arborizações podem ser classificadas em função de um gradiente de dependência da existência de clareiras. Começando nas de rápido crescimento, seguem-se as arborizações dependentes da luz, as intolerantes às sombras, as que requerem sol, ao longo de toda a vida, para um crescimento lento, e, por fim, as madeiras de florestas primárias tolerantes à sombra, que podem sobreviver muitos anos na sombra total, sob o dossel (Sist et al., 2003; Vieira et al., 2005; Herault et al. 2010).

A fragmentação da crosta terrestre causada por processos geológicos, tais como vulcanismos e alterações climáticas ocorridas no passado, foi também identificada como tendo um papel fundamental na condução de espécies (Sahney, 2010).

As árvores de florestas tropicais são, geralmente, de grande porte, comparativamente com as árvores de florestas temperadas, têm troncos fortes e bases constituídas por diversos contra-

fortes, de forma a ganharem estabilidade (www6, 2017). As taxas de crescimento do diâmetro das árvores variam significativamente entre e dentro das espécies, em relação à idade, estação, condições climáticas e outras. A maioria das espécies tropicais de madeira tem taxas de crescimento e de regeneração claramente mais baixas que as espécies originárias de florestas não tropicais (Dauber et al., 2005, Vieira et al., 2005, Valle et al., 2007, Herault et al. 2010).

Um fator relevante na dificuldade de regeneração das espécies prende-se com as elevadas taxas de mortalidade na germinação e nos rebentos em florestas naturais, especialmente para as espécies não originárias, que exigem luz solar e cuja germinação não tolera sombra (Hall, 2008). Muitas espécies de madeira tropical, de alto valor comercial, pertencem a este grupo. Este padrão de escassez juvenil reflete a natureza complexa e arriscada de reprodução de árvores em ambientes de alta biodiversidade (Zimmerman et al., 2012).

No entanto, a ação humana de destruição florestal é suspeita de ser uma das maiores causas de extinção de espécies. As florestas tropicais, pela qualidade das suas madeiras, ou simplesmente pelo avanço da agricultura realizada pelas populações nativas, sofreu uma enorme destruição, reduzindo drasticamente a sua área de ocupação, ao longo do século XX.

Por todo o mundo, a desflorestação, por meio de abate de árvores, incêndios ou degradação florestal, é responsável por cerca de $15 \pm 3\%$ das emissões globais de CO_2 produzidas pela ação humana (Malhi, 2010), provocando o aumento do efeito de estufa comprometendo a biodiversidade e o desenvolvimento sustentável das florestas e da sua exploração. Globalmente, as taxas de desflorestação, no início do século XXI, eram de cerca de 5,4 milhões de hectares por ano (Hansen et al., 2008). A maior desflorestação é praticada em áreas tropicais, onde existe uma grande demanda para terras agrícolas. Em áreas temperadas e boreais, a desflorestação deve-se, essencialmente, as pressões da exploração da própria madeira (Pearce et al., 2003).

O impacto direto da atividade madeireira sobre a biodiversidade animal nos trópicos varia amplamente, estando dependente de diferentes combinações e de vários fatores, incluindo da filogenia, do nicho ecológico, da intensidade e proximidade do abate das árvores, da extensão de floresta intocada, do grau de fragmentação, etc. No entanto, este impacto perde significado em comparação com os seus impactos secundários, que seguem num curso bem documentado, terminando na destruição da biodiversidade da floresta natural. Vêm da construção de estradas, da fixação de novas gentes, da caça, do esgotamento dos recursos de madeira, da transformação de solos para atividade agrícola, ou por incêndios que têm origem em florestas já degradadas (Cochrane, 2003; Asner et al., 2006; Karsenty et al., 2006; Zhang et al., 2006; Laporte et al., 2007; Nawir et al., 2007; Hall, 2008; Matricardi et al., 2010).

Estudos recentes demonstram que as estradas construídas propositadamente para a exploração madeireira representam 38% da totalidade das estradas da África Central, estando essa taxa continuamente a aumentar na região (Laporte et al., 2007).

O abate seletivo de espécies, praticado nas florestas tropicais (abordado na secção 2.2), catalisa ainda a colonização de espécies não pioneiras e o uso associado de fogo. A sinergia entre os dois procedimentos promulga o fogo em florestas tropicais degradadas pela exploração madeireira (Cochrane, 2003; Nawir et al., 2007; Matricardi et al., 2010).

A Forest Resources Assessment (FRA) estima que, a nível global, a partir de meados da década de 70 do século passado, até ao início do novo século, as florestas do planeta tenham perdido cerca de 13 milhões de hectares por ano (FAO, 2010). Apesar da desflorestação continuar em taxas alarmantes, nos últimos anos, tem-se verificado um decréscimo em vários países, particularmente em países com floresta tropical.

2.1.2 Floresta Tropical Africana

Estima-se que a floresta tropical africana cubra uma área aproximada de 2 milhões de km². Com cerca de 89,3% da totalidade da floresta tropical africana, a floresta da bacia do rio Congo é a segunda maior floresta tropical do planeta, a seguir à floresta Amazónica. Trata-se de uma floresta largamente intocável, mas lentamente consumida pelo crescimento das populações nativas e pelos interesses da indústria da madeira. É especialmente densa ao longo de 1,5 milhões de km², espalhados maioritariamente pela República Democrática do Congo (RDC), por grande parte do República do Congo, pelo sudeste dos Camarões, pelo sul da República Centro Africana, Gabão e Guiné Equatorial (www6, 2017).

A restante floresta tropical africana, partindo da bacia do rio Congo, estende-se pela costa atlântica até ao Senegal, denominada por floresta tropical da África Ocidental, com cerca de 6% da área total da floresta tropical africana. Está também presente na ilha de Madagáscar, com cerca de 2,4%, e na África Oriental, com cerca de 2,2%. Em termos da sua distribuição pelos países africanos, 53,6% da floresta encontra-se na República Democrática do Congo, 11,2% no Gabão, 10,4% na República do Congo e 10% nos Camarões. Os restantes 14,8% distribuem-se por diversos países (Mayaux et al., 2013). A Figura 2.2 apresenta o mapa da distribuição da floresta tropical africana.



Figura 2.2: Mapa da distribuição da floresta tropical africana (www7, 2017).

As florestas tropicais africanas são caracterizadas pela baixa diversidade vegetal, comparativamente com as florestas tropicais Amazônica e Asiática, estando estas sujeitas a climas semelhantes. A influência, no passado, de alterações climáticas e da atividade humana na região, poderão ser as causas desta característica díspar (Parmentier I et al., 2007). A pluviosidade de grande parte da floresta tropical Africana situa-se perto do limiar inferior para a viabilidade da floresta tropical (Malhi et al., 2004; Zelazowsky et al., 2011), fazendo com que pequenas mudanças na sua intensidade possam causar alterações de larga escala na biodiversidade da floresta. À semelhança das restantes florestas tropicais, as florestas tropicais africanas, são essencialmente primárias, caracterizadas pelo seu denso dossel, normalmente em várias camadas.

Curiosamente, e sem existir uma explicação evidente e consensual, as árvores da floresta tropical africana apresentam um diâmetro médio do troco relativamente menor aos das restantes florestas tropicais, mas também com menor variabilidade de dimensões, traduzindo-se em menor quantidade de árvores pequenas (Malhi et al., 2013).

Relativamente à floresta tropical da África Ocidental, especialmente a faixa costeira que se estende desde os Camarões até ao Senegal, podemos afirmar que, para além dos fatores que levaram à sua desflorestação, similares aos das restantes florestas tropicais, a facilidade de acesso por via marítima para o transporte de troncos fez com que sofresse a maior taxa de devastação de floresta tropical primária de todo o mundo (www7, 2017).

Quanto à África Central existe uma maior dificuldade na aferição das taxas de desflorestação, muito por causa da falta de capacidade de recolha de dados, mas também pelo modelo de desflorestação que se caracteriza por ser primário de baixa escala e de subsistência dos agricultores e das populações nativas (Malhi et al., 2013).

Em 2013, Mayaux et al., apresentou um novo modelo de análise da desflorestação da floresta tropical africana, definido em dois intervalos de 10 anos, compreendidos entre 1990-2000 e 2000-2010, analisados com base em imagens de arquivo de satélite de alta resolução (Landsat), disponibilizadas para consulta. Segundo este modelo, estima-se que a taxa de desflorestação da floresta tropical africana tenha sido de 0,59 milhões de hectares por ano, para a primeira década, e curiosamente menor para a segunda década, rondando os 0,29 milhões de hectares por ano. Este último valor apresenta-se 4 vezes inferior, em termos absolutos, em relação à floresta tropical da América Latina (Eva et al., 2012), e entre três a quatro vezes inferior à taxa de desflorestação da floresta tropical asiática (FAO, 2012). Malhi et al. (2013), estima que, de uma forma geral, muito da floresta tropical africana mantenha uma taxa baixa de desflorestação, representando cerca de 11% da desflorestação global.

Para as curiosas baixas taxas de desflorestação, em especial da África Central, Rudel (2013) encontra a explicação em dois fatores. Um primeiro, assente no facto de as populações nativas passarem automaticamente de um mundo rural e extremamente pobre, para as áreas urbanas, (com taxas de 3,7% ao ano entre 2000 e 2005), sem passarem pelo período da industrialização, onde a energia doméstica é baseada essencialmente no consumo da própria madeira e dos seus derivados. E um segundo aspeto, considerado o mais relevante, o facto de quase todos os países por onde a floresta da bacia do rio Congo se estende, e onde encontramos quase 90% da floresta tropical africana, terem extração de petróleo e de outros minerais industriais, provocando explosões económicas, tornando a agricultura e a madeira em recursos menos competitivos.

Outro aspeto característico no abate de árvores da floresta tropical africana é o de ser seletivo, quer em relação a uma espécie, quer mesmo de uma determinada árvore em especial, ao contrário do que sucede nas regiões temperadas, em que as florestas são de baixa diversidade de espécies, ou mesmo de uma só espécie, e em que o abate é realizado cortando todas as árvores de uma área delimitada. Apesar da elevada diversidade de espécies da floresta tropical africana, tipicamente, apenas uma ou duas espécies são abatidas por hectare, fazendo pouco sentido desflorestar uma zona remota e de difícil acesso aos mercados comerciais (Gourlet-Fleury, 2013). Comparativamente, na floresta tropical do sudeste asiático, o abate realiza-se sobre 10 a 20 espécies de árvores por hectare, provocando um maior impacto de desflorestação. A diferença entre as duas florestas coloca a questão de até que ponto um abate seletivo

de uma ou várias espécies poderá ser sustentável para a reabilitação da floresta tropical (Rice et al., 1997; Putz et al., 2012).

A Tabela 2.1, apresenta a variação da floresta primária africana, por país.

Tabela 2.1: Dados da floresta primária dos países africanos (www2, 2016).

País	Área Total de Terra	Cobertura Total da Floresta 2005		Cobertura Primária da Floresta 2005		Desflorestação Total 1990-2005	Perda de Flor. Primária 1990-2005
	(1000 x km ²)	(1000 x km ²)	Área de Terra % total	(1000 x km ²)	Área de Terra % total	Cobertura Florestal % de 1990	Cob. Flor. Primária % de 1990
Angola	1246,7	591,04	47,4	-	n/a	-3,1%	n/a
Benim	112,62	23,51	21,3	-	n/a	-29,2%	n/a
Burkina Faso	274,2	67,94	29	-	n/a	-5,0%	n/a
Burundi	27,83	1,52	5,9	-	n/a	-47,4%	n/a
Camarões	475,44	212,45	45,6	-	n/a	-13,4%	n/a
RC Africana	622,98	227,55	36,5	-	n/a	-1,9%	n/a
Congo	342	224,71	65,8	74,64	21,8	-1,1%	-1,1
C do Marfim	322,46	104,05	32,7	6,25	1,9	1,8%	n/a
RD Congo	2344,86	1336,1	58,9	-	n/a	-4,9%	n/a
Guiné-Eq.	28,05	16,32	58,2	-	n/a	-12,3%	n/a
Gabão	267,67	217,75	84,5	-	n/a	-0,7%	n/a
Gâmbia	11,3	4,71	41,7	-	n/a	6,6%	n/a
Gana	238,54	55,17	24,2	3,53	1,5	-25,9%	n/a
Guiné	245,86	67,24	27,4	0,63	0,3	-9,2%	n/a
Guiné-Bissau	36,12	20,72	73,7	9,4	26,0	-6,5%	n/a
Quênia	580,37	35,22	6,2	7,04	1,2	-5,0%	-5,1
Libéria	111,37	31,54	32,7	1,29	1,2	-22,3%	n/a
Madagáscar	587,04	128,38	22,1	103,47	17,6	-6,2%	-1,5
Malawi	118,48	34,02	36,2	11,32	9,6	-12,7%	-34,5
Maurícias	2,04	0,37	18,2	-	0,0	-5,1%	n/a
Moçambique	801,59	192,62	24,6	-	n/a	-3,7%	n/a
Níger	1267	12,66	1	2,2	0,2	-34,9%	n/a
Nigéria	923,77	110,89	12,2	3,26	0,4	-35,7%	-79,0
Reunião	2,51	84	33,6	0,55	21,9	-3,4%	n/a
Ruanda	26,34	4,8	19,5	-	0,0	50,9%	n/a
ST Príncipe	0,96	0,27	28,4	0,12	12,5	0,0%	n/a
Senegal	196,72	86,73	45	15,98	8,1	-7,2%	-9,2
Seicheles	0,45	0,4	88,9	0,02	4,4	0,0%	n/a
Serra Leoa	71,74	27,54	38,5	-	n/a	-9,5%	n/a
Somália	637,66	71,31	11,4	-	n/a	-13,9%	n/a
Sudão	2505,81	675,46	28,4	135,09	5,4	-11,6%	-11,6
Tanzânia	945,09	352,57	39,9	-	n/a	-14,9%	n/a
Togo	56,79	3,86	7,1	-	n/a	-43,6%	n/a
Uganda	241,04	36,27	18,4	-	n/a	-26,3%	n/a
Zâmbia	752,61	424,52	57,1	-	n/a	-13,6%	n/a
Zimbabwe	390,75	175,4	45,3	-	n/a	-21,1%	n/a

Procurando diligenciar a conservação dos recursos madeireiros, na última década do século passado, a maioria dos países da África central redefiniu as suas leis florestais, de modo a promover a gestão sustentável das suas florestas (Nasi et al., 2012). Para além disso, a pequena rede de trilhos para o transporte de madeira, devido à relativa baixa pressão de exploração, associada à baixa densidade populacional, são fatores que não provocam as condições críticas para a desflorestação, a não ser em torno de algumas concessões na Rep. Dem. do Congo (Malhi et al., 2013). Mayaux et al. (2013) e Rudel (2013) também não encontraram evidências de correspondência entre a exploração da madeira na África central e a subsequente desflorestação, tanto em escalas nacionais como locais. A Tabela 2.2 apresenta a variação do volume da madeira dos países da bacia do rio Congo.

Tabela 2.2: Variação do volume de madeira em zonas de florestas e não floresta, dos países da bacia do rio Congo.

País	Volume de madeira em crescimento (x 1.000.000 m ³)	Floresta			Outras terras		
		1990	2000	2005	1990	2000	2005
Congo	Zonas florestais e outras terras	4603	4568	4551	485	482	480
	Para efeitos comerciais	1381	1370	1365	145	144	144
Camarões	Zonas florestais e outras terras	1517	1381	1313	--	--	--
	Para efeitos comerciais	195	154	133	--	--	--
Rep. Centro Africana	Zonas florestais e outras terras	3875	3825	3801	--	--	--
	Para efeitos comerciais	--	--	--	--	--	--
Tanzânia	Zonas florestais e outras terras	1493	1346	1264	224	106	48
	Para efeitos comerciais	1089	980	926	--	--	--
RD Congo	Zonas florestais e outras terras	32430	31202	30833	--	--	--
	Para efeitos comerciais	--	--	--	--	--	--
Angola	Zonas florestais e outras terras	2364	2315	2291	--	--	--
	Para efeitos comerciais	28	27	26	--	--	--
Ruanda	Zonas florestais e outras terras	70	35	88	7	1	2
	Para efeitos comerciais	64	31	84	--	--	--
Burundi	Zonas florestais e outras terras	--	--	--	--	--	--
	Para efeitos comerciais	--	--	--	--	--	--
TOTAL	Zonas florestais e outras terras	46352	44672	44141	716	589	530
	Para efeitos comerciais	2757	2562	2534	145	144	144
	Zonas florestais e outras terras (var %)	--	-3,6%	-1,2%	--	-17,7%	-10,0%
	Para efeitos comerciais (var %)	--	-7,1%	-1,1%	--	-0,7%	0,0%

FAO (2005) Global Forest Resources Assessment.

Para efeito de comparação, a Tabela 2.3, apresenta o volume de madeira abatido em dois países de floresta tropical da África Ocidental, Gana e Costa do Marfim, e dois países da África Oriental, Uganda e Moçambique.

Tabela 2.3: Variação do volume de madeira das florestas e outras terras de alguns países.

País	Volume de madeira em crescimento (x 1.000.000 m ³)	Floresta			Outras terras		
		1990	2000	2005	1990	2000	2005
Gana	Zonas florestais e outras terras	423	352	321	--	--	--
	Para efeitos comerciais	230	189	171	--	--	--
Costa do Marfim	Zonas florestais e outras terras	2588	2618	2683	--	--	--
	Para efeitos comerciais	510	522	533	--	--	--
TOTAL (%)	Zonas florestais e outras terras (var %)	--	-1,4%	1,1%	--	--	--
	Para efeitos comerciais (var %)	--	-3,9%	-1,0%	--	--	--
Uganda	Zonas florestais e outras terras	212	175	156	10	9	8
	Para efeitos comerciais	32	27	23	--	--	--
Moçambique	Zonas florestais e outras terras	515	502	496	772	754	745
	Para efeitos comerciais	110	72	71	--	--	--
TOTAL (%)	Zonas florestais e outras terras (var %)	--	-6,9%	-3,7%	--	-2,3%	-1,2%
	Para efeitos comerciais (var %)	--	-30,3%	-5,1%	--	--	--

FAO (2005) Global Forest Resources Assessment.

Pode constatar-se que, apesar de não representarem a totalidade das zonas africanas em que se inserem, o volume de abate entre 2000 e 2005 nos países da África Ocidental é também muito próximo de zero. Porém, não se pode esquecer que estes países perderam já a grande maioria das suas florestas. O mesmo se verifica com os países da África Oriental que, apesar disso, continuam a apresentar percentagens de redução de madeira preocupantes.

Por fim, e dado que as espécies analisadas provêm especificamente da República do Congo, é apresentada a Tabela 2.4, na qual são enumeradas as 10 espécies mais comuns do país e as respetivas variações de volume das madeiras existentes nas suas florestas.

Tabela 2.4: Espécies de árvores mais frequentes na floresta do Congo (x 1.000.000 m³).

Nome Científico	Floresta	
	1990	2000
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	196	194
<i>Terminalia superba</i>	159	158
<i>Staudtia spitata</i>	95	94
<i>Erythrophleum ivorense</i>	79	79
<i>Triplochiton scleroxylon</i>	70	69
<i>Entandrophragma candollei</i>	64	64
<i>Pterocarpus soyauxii</i>	52	52
<i>Lophira alata</i>	44	44
<i>Melicia excelsa</i>	41	41
<i>Entandrophragma utile</i>	32	32
<i>Restantes</i>	3769	3740
Total	4603	4568
	var.	-0,76%

FAO (2005) Global Forest Resources Assessment.

Verifica-se que, de uma forma geral, a variação de volume de madeira nas florestas da República do Congo, é insignificante.

2.1.3 A certificação florestal

Segundo a Food and Agriculture Organization (FAO, 2010), 2,18 mil milhões de hectares de floresta, em todo o mundo, são definidos com capacidade de gerar produtos para múltiplos usos. No entanto, estimativas recentes, baseadas nos procedimentos de certificação, indicam que apenas 19% desta área se pode considerar gerida de forma sustentável, sendo este valor ainda mais baixo para as florestas tropicais (Sarre et al., 2013; Mansur et al., 2013).

A medição e monitorização da extensão e qualidade dos recursos florestais é um dos principais pilares da gestão florestal sustentável (GFS) (Mansur et al., 2013). Porém, a Forest Resources Assessment (FRA), em 2010, concluiu que apenas 45 países de todo o mundo foram capazes de avaliar a área de floresta, através de inventários florestais nacionais. Para além destes, 84 países fizeram-no através de controlo remoto, com recurso a imagens de idade e qualidade altamente variáveis (FAO, 2010; Mansur et al., 2013).

De uma forma geral, torna-se extremamente complicado, com os dados atuais, afirmar com precisão, qual a variabilidade efetiva das áreas florestais, ao longo das últimas décadas e, acima de tudo, qual a variabilidade em termos de disseminação de cada espécie por essas mesmas áreas. Estas dificuldades acentuam-se no caso das florestas primárias tropicais, caracterizadas pela sua vasta heterogeneidade. A necessidade de se protegerem as florestas é imperativa, sendo fulcral o desenvolvimento de projetos de estudo que visem conhecer profundamente as variáveis envolvidas na sustentabilidade das próprias florestas e, em especial, das florestas tropicais, onde o conhecimento científico é ainda muito parco. Nesse sentido, surgiu o conceito de “Gestão Florestal Sustentável” (GFS) que, apesar de parecer relativamente antigo (Schmithüsen, 2013), apenas aparece na publicação de 1990 da International Tropical Timber Organization (ITTO), *Guidelines for the sustainable management of natural tropical forests*; emergindo, em paralelo, com o termo “desenvolvimento sustentável”, definido pela World Commission on Environment and Development (1987), como sendo o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir as suas próprias necessidades.

Segundo Sarre et al. (2013), colocando o conceito de GFS em prática, uma unidade de gestão de determinada floresta é extremamente exigente, devido à definição de objetivos num meio de múltiplos intervenientes, com condições ambientais, económicas e sociais dinâmicas e com

conhecimentos ecológicos insuficientes. A GFS torna-se ainda mais complexa quando aplicada a grande escala, nomeadamente a níveis nacionais.

Em 2007, vários membros do Fórum das Nações Unidas para as Florestas (UNFF) concordaram em não considerar a GFS um instrumento juridicamente vinculativo para todos os tipos de florestas, mas, antes, uma declaração de intenções de referência para a gestão florestal, baseada em sete elementos temáticos: extensão dos recursos florestais; diversidade biológica das florestas; saúde e vitalidade das florestas; funções produtivas dos recursos florestais; funções de proteção dos recursos florestais; funções socioeconómicas das florestas; e enquadramento jurídico, político e institucional. Em conjunto, estes elementos servem de base de suporte para avaliação da certificação florestal, resumindo-se a 4 dimensões: ambiental, económica, social e cultural (Sarre et al. 2013). Desta forma, a base de uma gestão florestal sustentável consistirá no consenso social, tendo por referência as 4 dimensões (Brown et al., 2005), ao contrário do conceito inicial da gestão florestal sustentável, que se baseava na sustentabilidade do fornecimento da madeira (Schmithüsen, 2013).

De uma forma geral, é objetivo da GFS atender às 4 dimensões referidas, procurando manter os níveis de armazenamento de carbono, a biodiversidade, a qualidade da água proveniente das florestas, as heranças culturais, a subsistência das populações que delas dependem, a manutenção do fornecimento de produtos e a manutenção das paisagens (Sarre et al. 2013), atendendo ao processo evolutivo das mudanças sociais, dos mercados, das indústrias e das próprias florestas (Nasi, 2013).

Na ausência de um tratado global sobre as florestas, a UNFF, com a aprovação da Assembleia Geral da ONU, criou o NLBI (Non-legally Binding Instrument on All Types of Forests), tornando-o no organismo internacional encarregue de obter um consenso sobre a política florestal internacional. Atualmente, o NLBI representa o mais forte consenso internacional para a definição da GFS, considerando-a de forma holística, como sendo o conjunto de procedimentos a desenvolver, de forma a manter a total integridade ecológica de uma floresta (Zimmerman et al., 2012).

A nível mundial, e segundo os modelos de certificação dominantes, modelo da Forest Stewardship Council (FSC) e da Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC), estima-se estarem certificados aproximadamente 415 milhões de hectares, cerca de 10% dos 4030 milhões de hectares de floresta existentes no planeta (FAO, 2010). De acordo com o NLBI, também a Forest Stewardship Council (FSC), principal entidade certificadora autónoma da GFS nos trópicos, adota uma abordagem holística (FSC, 2002).

O facto da certificação florestal ser um indicador de uma gestão sustentável da floresta, não é unânime na comunidade internacional. Auld et al. (2008), observaram, com ceticismo, a possibilidade da certificação poder ajudar a atingir as metas de conservação da floresta, ao nível da paisagem. Segundo Zimmerman et al. (2012), a uma escala industrial, a GFS é suscetível de conduzir à degradação e desvalorização das florestas tropicais, de uma forma generalizada.

Blaser et al. (2011), numa análise a 33 países possuidores de floresta tropical, correspondente a 85% da totalidade das florestas tropicais e a aproximadamente 35% das florestas em todo o mundo, estimaram que, em 2010, existiam cerca de 53,3 milhões de hectares de floresta tropical gerida de forma sustentável. Destes, cerca de 30,6 milhões de hectares de floresta serão de produção e 22,7 milhões de hectares de proteção. Constataram ainda que a gestão florestal sustentável está menos desenvolvida nas florestas tropicais do que nas florestas de zonas temperadas.

Existem vários fatores que afetam e ajudam a explicar a reduzida implementação de sistemas de gestão florestal sustentável nas regiões dos trópicos, começando, desde logo, pela ausência de um conhecimento profundo dos ecossistemas tropicais, resultante do facto do principal interesse dos mercados estar focado na madeira tropical, em detrimento da aprendizagem sobre a gestão sustentável das florestas. Problemas de extrema pobreza das populações nativas, a procura por terrenos agrícolas, os conflitos étnicos e outras questões sociais, foram também identificados como sendo fatores relevantes para a fraca implementação dos sistemas de gestão. Para além destes, foram focados, nos artigos de 1987 e 1989 de Westoboy e de 1989 de Poore et al., a corrupção e a legislação vaga destes países, nomeadamente no que diz respeito aos direitos de acesso e utilização dos seus recursos naturais. Appanah (2013), considerou, também a procura pelo lucro fácil uma das principais razões para a baixa aplicabilidade da gestão florestal sustentável, especificamente no sudeste asiático. Os elevados custos na transação da madeira, associados à ineficiência e à corrupção das instituições, reduziram ainda mais os proveitos da atividade. Também o baixo valor relativo da maioria das madeiras tropicais e o reduzido número de espécies comercializadas tornam a gestão florestal sustentável ainda menos competitiva. Este facto levanta questões sobre a possibilidade das florestas tropicais poderem manter os ecossistemas naturais, ao mesmo tempo que se realiza o abate seletivo de árvores cujas espécies têm um elevado valor comercial em madeira (Nasi et al., 2009).

Quando o abate é realizado com baixa intensidade, geralmente considerado abaixo de 5 árvores por hectare para as florestas tropicais, eventualmente, poder-se-á recuperar muito da estrutura e composição de espécies da floresta, excetuando, geralmente, as espécies de madeira abatidas (Struhsaker, 1997; Sist et al., 2002, Ter Steege et al., 2002; Hall et al., 2003, Sist et al., 2007). A recuperação estará naturalmente dependente da regeneração das espécies, que acabam por ter características bastante aleatórias, começando pela dependência direta dos

animais para a polinização e dispersão de sementes, especialmente de insetos, aves, morcegos e outros mamíferos (Howe et al., 2000; Anitha et al., 2010; Zimmerman et al., 2012).

Douglas et al. (2010) sugerem o estabelecimento de ligações entre o capital de financiamento, os sistemas de gestão florestal e as interações humanas em curso, de modo a elevar a dinâmica de sustentabilidade, tornando a sua gestão mais rentável. Segundo Zimmerman et al. (2012), as técnicas mínimas necessárias para abordar a sustentabilidade ecológica violam diretamente as perspectivas de rentabilidade financeira, sugerindo que a implementação generalizada das técnicas de GFS, sendo subsidiadas pela REDD+ (entidade Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), poderiam abrandar o processo de degradação e desflorestação, mantendo o valor comercial das florestas tropicais para a produção de madeira.

Estudos recentes demonstram que a exploração de madeiras tropicais, mesmo sendo de florestas que usam técnicas de gestão sustentável, põe em causa quantidades significativas de carbono, levando décadas a conseguir-se que a madeira rejuvenesça com a capacidade de armazenamento de dióxido de carbono semelhante. Estes resultados reclamam por propostas para a redução de emissões de dióxido de carbono, através da redução da desflorestação e da degradação das florestas tropicais (Zimmerman et al., 2012).

O facto das espécies tropicais serem genérica e maioritariamente de crescimento lento, de difícil disseminação das suas sementes e dependentes da atividade e da diversidade animal para a sua reprodução/disseminação, são fatores que levaram Pitman et al. (1999) a concluir que, muito provavelmente, serão necessárias grandes extensões de área florestal tropical intacta para manter as populações de árvores sustentável. A juntar a estes factos, Schulze (2008) faz também referência ao diminuto conhecimento em relação às características ecológicas das madeiras tropicais para a sua gestão, concretamente, das suas taxas de crescimento, dos requisitos de germinação, dos animais polinizadores e dispersores das espécies e das preferências edáficas (Freitas et al., 2008; Grogan et al., 2008).

A exploração convencional de madeira transformou grande parte das florestas do sudeste asiático e grandes extensões da floresta primária latino-americana em florestas secundárias degradadas ou, mais frequentemente, em terrenos para a agricultura. Este processo de transformação de solos, que começa com a exploração da madeira com maior valor comercial, está também a ocorrer nas florestas tropicais da região da África Central (Karsenty et al., 2006; Zhang et al., 2006; Laporte et al., 2007; Hall, 2008; Zimmerman et al., 2012). O abate seletivo de árvores começa pelas espécies mais valiosas, até se esgotar o recurso. Após consumir-se todo o recurso, passa-se para o abate das árvores com valor económico imediatamente a seguir e assim sucessivamente, até chegar ao ponto em que o valor da terra passa a ser mais orientado para a agricultura ou pecuária, em detrimento da silvicultura (Asner et al., 2006; Karsenty et al.,

2006; Laporte et al., 2007; Hall, 2008). Desta forma, o denominado abate seletivo acaba por se transformar num abate generalizado e intensivo da floresta tropical.

De uma forma geral, as reservas de madeira das florestas africanas serão comparáveis às das florestas das Américas Central e do Sul, sendo que a densidade de distribuição das madeiras de elevado valor comercial será bastante menor do que nas florestas do Sudeste Asiático. O abate nas florestas africanas e amazônicas ocorre em ondas, seguindo um previsível e bem documentado ciclo: a) uma ou duas espécies de madeira de elevado valor comercial para exportação destinam-se a pagar o arranjo de caminhos para o interior da floresta, a pontos inicialmente inacessíveis, onde essas espécies são abatidas de forma seletiva; b) em poucos anos, a população fronteira segue estes caminhos, construindo serrações e consolidando infraestrutura; c) o custo dos transportes decresce, permitindo aos madeireiros reentrar e abater as espécies seguintes de maior valor comercial (Kammesheidt et al., 2001; Blundell et al., 2003; Karsenty et al., 2006; Zhang et al., 2006; Hall, 2008; Matricardi et al. 2010). Desta forma, haverá necessidade de implementar legislação/procedimentos que impeçam que este ciclo se desenvolva infinitamente até à extinção das florestas.

A gravidade do impacto direto da atividade madeireira nas florestas tropicais está ligada ao abate intensivo, que é medido pelo número de troncos ou metros cúbicos extraídos por hectare. Quanto maior for a intensidade de abate, maior é o dano no dossel da floresta e nas árvores residuais, incluindo nas mais jovens, até ao ponto em que as árvores não pioneiras de floresta primária já não se poderão desenvolver (Struhsaker, 1997; Sist et al., 2002; Van Gardingen et al., 2006; Anitha et al., 2010). A literatura limitada sobre a polinização das árvores tropicais, a troca de material genético e o sucesso reprodutivo, em diferentes densidades de árvores adultas, sugere que deve haver uma densidade abaixo da qual todas as espécies de árvores enfrentam a extinção local (Degen et al., 2006). Zimmerman et al. (2012), Struhsaker (1997) e Sist et al. (2003) concluíram que para conter o crescimento sufocante de vegetação pioneira, evitando riscos de incêndio e promovendo o recrutamento de árvores pioneiras, a regra de ouro passará por evitar que as clareiras individuais não ultrapassem os 500 m², e não excedam 10% da área do dossel, e que 85% de uma área terrestre de suporte deva ser preservada.

Como referido, o abate seletivo não leva apenas à morte as próprias árvores abatidas, mas eleva, consideravelmente, as taxas de mortalidade das árvores residuais. Nesse sentido, desenvolveram-se estudos de forma a reduzir o impacto do efeito do abate das árvores, procurando preservar o máximo possível da integridade ecológica, incluindo a proteção no semeio e dos rebentos de novas árvores e das árvores mais jovens que, em teoria, formarão a nova população de árvores para abate. Os métodos desenvolvidos são conhecidos coletivamente por RIL (redução do impacto do abate de árvores), tendo apresentado uma eficácia em todo o

mundo, capaz de reduzir os danos colaterais para o suporte residual entre 20% a 50% (Zimmerman et al., 2012; Putz et al., 2008).

Segundo Putz et al. (2008), a implementação de técnicas de RIL nas florestas tropicais, poderá reduzir, em média, 30% das emissões de carbono, relativamente ao abate de madeira convencional. No entanto, a intensidade e os ciclos de abate são os fatores com maior preponderância na redução da capacidade de armazenamento de carbono nas florestas, sendo que, mesmo com a aplicação generalizada de procedimentos RIL, a exploração madeireira industrial provocará a emissão de quantidades substanciais de CO₂, demorando décadas para que se consiga que as florestas tenham capacidade para as voltar a armazenar (Blanc et al., 2009; Koltunov et al., 2009, Huang et al., 2010).

Os procedimentos da GFS estão dependentes de orientações governamentais baseadas nos ciclos de corte, nos diâmetros mínimos do tronco para abate, na intensidade de abate e taxas de semeio de árvores por unidades de área, em combinação com técnicas comprovadas de redução dos danos causados durante as operações de exploração florestal. Técnicas de silvicultura, que podem melhorar a abundância e aumento do diâmetro das árvores juvenis, ainda não estão incluídas na GFS (Zimmerman et al., 2012).

Os governos dos países dos trópicos, com a preocupação de protegerem as suas florestas, desenvolveram legislação, de modo a que seja implementada em conjunto com procedimentos de redução do impacto do abate de árvores (RIL), procurando desta forma que a indústria de exploração da madeira tropical se torne sustentável. Porém, Zimmerman et al. (2012) referem que, apesar destes esforços, unanimemente os estudos realizados sobre a aplicação de regulamentação governamental, mesmo que associada a procedimentos RIL, levam ao esgotamento, ou mesmo à extinção dos recursos florestais da maior parte das espécies de madeira, dentro de três ciclos de corte (Alder et al., 2000; Huth et al., 2001; Van Gardingen et al., 2003; Dauber et al., 2005; Gourlet-Fleury et al., 2005; Sist et al., 2007; Valle et al., 2007; Freitas et al., 2008; Forshed et al., 2008; Grogan et al., 2008; Peña-Claros et al., 2008; Sebben et al., 2008; Guitet et al., 2009; Kukkonen et al., 2009). Estudos têm clarificado que, prevalecendo sobre protocolos de GFS de florestas tropicais: (a) os ciclos de rotação mínima, tipicamente 25-35 anos, deverão ser de pelo menos o dobro; (b) os diâmetros mínimos do tronco das árvores para abate, na maioria das vezes de 50 centímetros de DAP (diâmetro ao nível do peito), são muito pequenos para preservar a reprodução adequada das populações de árvores adultas e para o controlo da intensidade de abate; (c) a intensidade de abate de árvores por unidade de área, cerca de oito árvores por hectare, é um valor muito alto, levando a que muitas vezes, na vegetação residual, se provoque um vazio na regeneração da população de árvores abatidas, provocado pelo crescimento desmesurado da vegetação pioneira, com propensão para o desencadear de incêndios, especialmente em regiões que tenham estações secas (Zimmerman

et al., 2012). Diferentes estudos, esclareceram ainda que o diâmetro mínimo de abate e as regras comerciais de retenção, não podem ser conciliadas com diferenças marcantes na história de vida da espécie da madeira e com a necessidade de uma gestão adaptável a sistemas de espécies específicos e a populações de árvores locais, com taxas de crescimento e densidades relativas (Poorter et al., 1996; Sist et al., 2003; Dauber et al., 2005; Freitas et al., 2008; Sebben et al., 2008; Herault et al., 2010)

Para além dos estudos e aspetos legais acabados de referir, diversos investigadores têm-se debruçado sobre a possibilidade de, através da silvicultura nas florestas tropicais naturais, se obter crescimentos acelerados das espécies e, conseqüente, aumento da produção de madeira (Kuusipalo et al., 1997; Yasman, 1998; Sist et al., 2003; Peña-Claros et al., 2008; Guitet et al., 2009). Nesse sentido, a silvicultura nos trópicos tem sido orientada de forma a maximizar o acesso à luz e a nutrientes para as árvores de alto valor madeireiro, para as suas sementes e rebentos, diminuindo a competitividade de outras árvores e vegetação (Graaf et al., 1999, Peña-Claros et al., 2008, Herault et al., 2010). No entanto, os modelos de silvicultura desenvolvidos para as florestas tropicais estão por provar. Nos locais onde se aplicaram estes procedimentos, após o abate de árvores, nomeadamente na Indonésia e na Malásia, não se conseguiu atingir o objetivo da sustentabilidade da madeira ou da conservação da floresta (Kuusipalo et al., 1997; Yasman, 1998; Hall et al., 2003, Sist et al., 2003; Nawir et al., 2007). Pesquisas recentes indicaram um potencial de recuperação das populações de árvores comerciais após a GFS no abate de árvores, por meio do enriquecimento no plantio de embriões vegetais em pequenas clareiras (Kuusipalo et al., 1997; Park et al., 2005; Grogan et al., 2008; Hall, 2008; Schulze, 2008; Doucet et al., 2009).

Alguns autores referem que, com as atuais orientações de GFS, as florestas tropicais deixam de se regenerar naturalmente, sendo substituídas, em grande parte, por espécies de árvores de baixo valor comercial, enquanto as espécies de madeira densa e de alto valor comercial tendem para o declínio populacional (Kuusipalo et al., 1997; Hall et al., 2003; Park et al., 2005; Valle et al., 2007; Schulze, 2008).

Os modelos de certificação florestal apareceram como resultado das preocupações generalizadas com a desflorestação crescente, em especial das florestas tropicais, e como forma de orientação para uma gestão florestal sustentável.

A certificação florestal é um sistema voluntário que procura transmitir aos consumidores, em geral, uma garantia de produto, baseada na preocupação com a sustentabilidade florestal. Nesse sentido, os modelos de certificação assentam na hipótese dos consumidores preferirem produtos de origem, ambientalmente, sustentável, criando, assim, incentivos para que as companhias procurem adotar modelos sustentáveis de exploração de madeiras. Ao contrário das

abordagens comuns de sustentabilidade florestal, o grande fator motivacional para a sua adoção baseia-se na procura do mercado por produtos de origem sustentável (McGinley et al., 2011). Espera-se que esta tendência de consumo crie um efeito de alavancagem de incentivos, para que as empresas se motivem na adoção de práticas amigas do ambiente.

Os sistemas de certificação florestal são baseados no mercado não regulado (ou seja, voluntário), procurando procedimentos de promoção da utilização sustentável dos recursos florestais. Nesse sentido, o seu sucesso depende da promessa de vantagens económicas para estimular a sua adoção por parte da indústria. As vantagens económicas podem ter origem em três fatores: (1) na crescente procura do mercado por produtos certificados; (2) na capacidade dos produtores em cobrar prémios de preços no certificado ou nos produtos; (3) nos benefícios de criar o acesso a mercados atrativos nacionais ou internacionais (Espinoza et al., 2012).

A certificação florestal é um modelo que procura promover a sustentabilidade florestal nas suas várias vertentes: ambiental, económica, social e cultural (Bowyer, 2008; Hansen et al., 2006). Em 1992, surge o primeiro sistema de certificação florestal com carácter internacional, o Forest Stewardship Council (FSC, 2013), formado por várias das principais organizações ambientais não-governamentais (ONG's) e comerciantes internacionais (Nussbaum et al., 2005; Van Kooten et al., 2005). Em 1999, proprietários de pequenas florestas europeias fundaram o sistema Program for the Endorsement of Forest Certification (PEFC, 2013). O PEFC é uma organização que apoia 29 sistemas nacionais de certificação florestal em 28 países (Espinoza et al., 2013).

Para além dos modelos FSC e PEFC que, hoje em dia, mantêm um lugar de relevo na formação da certificação florestal, a nível mundial, uma vez que são os dois modelos responsáveis pela certificação da maioria da área florestal em todo o mundo, através de sistemas autónomos, foram sendo desenvolvidos outros sistemas de certificação que acabaram por ter maior relevo ao nível dos respetivos países de origem. Entre estes, na América do Norte, podemos destacar a American Tree Farm System, lançada em 1941 nos Estados Unidos (ATFS, 2010); a Sustainable Forest Initiative, lançada também nos Estados Unidos, em 1994 (SFI, 2011); e o modelo Canadian Standards Association, fundada em 1996 (CSA, 2011). Sublinhar ainda que o sistema PEFC inclui também os sistemas ATFS, SFI e o CSA (PEFC, 2013).

Para além dos sistemas da América do Norte, outros países desenvolveram os seus próprios sistemas de certificação, como são o caso do sistema indonésio Lembaga Ekolabel Indonesia (LEI, 2011), do Programa Brasileiro de Certificação Florestal (CERFLOR, 2011), do sistema malaio, Malaysian Timber Certification Council (MTCC, 2006) e do Sistema Chileno de Certificación de Manejo Forestal Sustentable (CERTFOR, 2011). Estes sistemas nacionais foram desenvolvidos com base em outras normas e orientações. Por exemplo, os sistemas da Malá-

sia (MTCC) e do Brasil (CERFLOR) são baseados nos critérios da Organização Internacional de Madeiras Tropicais (ITTO, 2011), enquanto o sistema indonésio (LEI) incorpora critérios da ITTO e da FSC (Perera et al., 2006).

Do total de 4,03 mil milhões de hectares de florestas em todo o mundo (FAO 2010), ao longo dos últimos 20 anos de certificação, cerca de 10%, aproximadamente 415 milhões de hectares da área florestal global é certificada, dos quais, apenas 2%, aproximadamente 81 milhões de hectares são referentes a florestas tropicais. Dos cerca de 10%, a certificação foi realizada essencialmente através dos sistemas FSC, em 174 milhões de hectares e PEFC, em cerca de 242 milhões de hectares (FSC, 2013; PEFC, 2013). A Tabela 2.5, apresenta a distribuição mundial de área florestal certificada, segundo os dois modelos dominantes (FSC e PEFC), referentes a novembro de 2012.

Importa referir que os dados apresentados são considerados como sendo bastante conservadores, uma vez que, por motivos de custo da própria certificação, por falta de exigência de alguns mercados comerciais, e porque as certificações se focam essencialmente na produção de madeira, leva a que a mesma não seja solicitada por uma extensa parte dos seus proprietários, apesar destes desenvolverem modelos próprios de sustentabilidade. Na realidade, algumas florestas têm sido geridas, ao longo de mais de 100 anos, com resultados positivos, possíveis de constatar nos dias de hoje (Küchli, 2013), apesar de não o serem de acordo com os critérios e regras atuais de GFS.

Destes valores, pode-se constatar que, apesar do objetivo principal dos sistemas de certificação incidir sobre o controlo e gestão das florestas tropicais, a sua incidência sobre estas continua a ser muito diminuta. Na realidade, enquanto se conseguiu que apenas 2% das florestas certificadas fossem tropicais, durante este período, segundo Espinoza et al. (2013), foram perdidos 283 milhões de hectares em desflorestação.

Verifica-se que a grande incidência da aplicação dos sistemas de certificação florestal acaba por refletir-se em florestas das zonas temperadas e boreais, zonas em que os países, anteriormente ao aparecimento dos sistemas de certificação FSC e PEFC, já apresentavam preocupações com a sustentabilidade das suas florestas, levando-os a implementar modelos para esse fim (Howe et al., 2012).

Tabela 2.5: Área de floresta certificada a nível mundial, segundo os modelos FSC e PEFC (FSC, 2012; PEFC, 2012; FAO, 2010).

País	Área de floresta (x1000 ha) certificada por:		Área total de floresta certificada (x1000 ha)	Área total de floresta (x1000 ha)	% de área de floresta certificada
	FSC	PEFC			
África do Sul	1552	0	1552	9241	16,8%
Argentina	305	0	305	29400	1,0%
Austrália	895	10100	10995	149300	7,4%
Belize	170	0	170	1393	12,2%
Bolívia	1270	0	1270	57196	2,2%
Brasil	7200	1230	8430	519522	1,6%
Camarões	728	0	728	19916	3,7%
Canadá	54300	109000	163300	310134	52,7%
Chile	508	1910	2418	16231	14,9%
China	2520	0	2520	206861	1,2%
Colômbia	94	0	94	60499	0,2%
Congo	2480	0	2480	22411	11,1%
Coreia do Sul	371	0	371	6222	6,0%
Costa Rica	41	0	41	2605	1,6%
Equador	54	0	54	9865	0,5%
Estados Unidos	14100	35300	49400	304022	16,2%
Europa	72900	83500	156400	998370	15,7%
Gabão	1879	0	1879	22000	8,5%
Gana	2	0	2	4940	0,0%
Guatemala	502	0	502	3657	13,7%
Honduras	153	0	153	5192	2,9%
Ilhas Salomão	64	0	64	2213	2,9%
Índia	40	0	40	68434	0,1%
Indonésia	1450	0	1450	94432	1,5%
Japão	397	0	397	24976	1,6%
Lao	83	0	83	15751	0,5%
Madagáscar	1	0	1	12553	0,0%
Malásia	504	4590	5094	20456	24,9%
México	601	0	601	64802	0,9%
Moçambique	5	0	5	39022	0,0%
Namíbia	275	0	275	7290	3,8%
Nepal	14	0	14	3636	0,4%
Nicarágua	22	0	22	3114	0,7%
Nova Zelândia	1452	0	1452	8269	17,6%
Panamá	14	0	14	3251	0,4%
Papua Nova Guiné	33	0	33	28726	0,1%
Paraguai	19	0	19	17582	0,1%
Peru	818	0	818	67992	1,2%
Quênia	1	0	1	3467	0,0%
Sri Lanka	32	0	32	1860	1,7%
Suíça	80	0	80	563	14,2%
Suriname	89	0	89	14785	0,6%
Tailândia	24	0	24	18972	0,1%
Tanzânia	113	0	113	33428	0,3%
Turquia	95	0	95	11334	0,8%
Uganda	107	0	107	2988	3,6%
Uruguai	836	0	836	1744	47,9%
Venezuela	140	0	140	46275	0,3%
Vietname	45	0	45	13797	0,3%
TOTAL	169378	245630	415008	3390689	12,2%

Da totalidade da área florestal certificada, os países da União Europeia e da América do Norte representam mais de 75% (FAO, 2012). A Tabela 2.6 apresenta o resumo da variação do percentual de distribuição de floresta certificada, nas várias zonas do globo.

Tabela 2.6: Variação percentual da distribuição de floresta certificada no mundo (FAO, 2012).

Região	% distribuição		
	2010	2011	2012
América do Norte	56,0	53,6	51,3
Europa Ocidental	23,8	22,8	24,7
CIS*	8,4	11,8	12,3
Oceânia	3,3	3,3	3,4
África	2,0	2,0	1,9
América Latina	4,0	4,3	3,8
Ásia	2,4	2,2	2,5

*Commonwealth of Independent States (CIS) é uma organização regional que inclui ex-Repúblicas Soviéticas

De uma forma geral, Espinoza et al. (2013), concluíram existirem três principais fatores que influenciam o sucesso da implementação dos sistemas de certificação: 1) as medidas de apoio adotados pelos governos, quer a nível legislativo, quer financeiro; 2) o enquadramento regulamentar; 3) o financiamento internacional e o apoio técnico para o desenvolvimento dos sistemas de certificação. Também a aplicação de uma legislação florestal forte, que aumente o custo de extração ilegal de madeira, é largamente considerado como facilitador para os requisitos de certificação (Ebeling et al., 2009).

Podendo funcionar também como fator influenciador de implementação de sistemas de gestão florestal, acresce o facto de a União Europeia ter vindo a implementar controlos mais rigorosos, na entrada de madeiras no seu mercado comercial, através da aplicação de nova legislação, nomeadamente do Plano de Ação FLEGT (Forest Law Enforcement, Governance and Trade), que será abordado na secção 2.3.1 e que visa eliminar a madeira abatida de forma ilegal dos mercados europeus.

Espinoza et al. (2013) concluíram ainda que os benefícios da aplicação dos sistemas de certificação se poderiam resumir em três pontos: 1) na melhoria do nível de vida das comunidades dependentes da exploração da madeira e das respetivas condições de trabalho; 2) na melhoria da imagem do sector florestal, combatendo a imagem de oportunismo sobre um sector supostamente pouco regulado ou pouco fiscalizado, que levou aos crescentes impactos negativos sobre o ambiente, através das desflorestações; 3) na melhoria da regulação dos mercados, conseguindo-se um mercado mais estável para os produtos certificados.

Por fim, constatando que, em alguns países, a área de floresta certificada tem vindo a diminuir, ao contrário do desejável, o referido autor apresentou duas razões que poderiam explicar este fenómeno: 1) a insegurança no registo de propriedade da terra a certificar em determinados países; 2) a falta de mercado para produtos oriundos de explorações florestais certificadas, que

se nota em determinadas zonas do globo, em especial, após a crise financeira em 2008. Para além destes, são também abordados os elevados custos relativos à solicitação de sistemas internacionais de certificação. Nesse sentido, o autor entende que o uso sustentável das florestas poderá ser desenvolvido através da criação de sistemas de certificação nacionais menos dispendiosos e de acesso facilitado para aqueles que não têm a capacidade financeira para a certificação internacional.

2.2 Regulamentação para a importação de madeira tropical

Apesar da dificuldade em se calcular, com exatidão, o volume de negócio do abate ilegal de árvores, estima-se que a sua exploração contribua em mais de 50% da desflorestação tropical e que o seu comércio represente 30% do comércio de madeira global. Em termos monetários, estima-se que os abates ilegais de árvores resultem em perdas de € 7.000.000.000 por ano para os operadores legítimos, a nível local e Europeu, para além da desflorestação, perda de biodiversidade, aumento das emissões de gases de efeito estufa e ameaça à subsistência das comunidades locais (www8, 2016).

A União Europeia foi o maior consumidor mundial de madeira e seus derivados, com cerca de 2 036 milhões de m³ em 2007, dos quais 25% são importados. Em 2011, a UE foi responsável por 35% (€ 37.800.000.000) do comércio global de produtos de madeira primários (www8, 2016).

O elevado volume de importação de madeira, não só por parte da UE, mas também dos Estados Unidos, Japão e, nos últimos anos, da China, associado à escassez de legislação apropriada para a exploração da mesma nos países exportadores, fez com que o negócio de exportação de madeiras tropicais se tornasse extremamente lucrativo, levando à devastação de milhões de km² de floresta por todo o mundo.

2.2.1 Regulamentação Europeia

Tendo em conta todas as implicações inerentes ao comércio da madeira e seus derivados, resultantes do abate ilegal de árvores, os Membros do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu aprovaram, em 20 de outubro de 2010, o Regulamento (UE) n.º 995/2010, que fixa as obrigações dos operadores que colocam no mercado madeira e derivados de madeira (EUTR).

O EUTR acabou por ser implementado em março de 2013, certificando a origem das madeiras, de forma a reduzir/eliminar a comercialização proveniente de abate ilegal de árvores.

Pepke et al. (2013), referem que, no primeiro ano de implementação do EUTR, foram registados impactos positivos, dos quais se poderá destacar a consciencialização sobre a situação desastrosa resultante da exploração da madeira ilegal. Outros aspetos positivos mencionados foram o de os exportadores de madeira tropical passarem a documentar a legalidade das suas exportações e de os importadores da UE estabelecerem sistemas de diligência. Apesar dos aspetos positivos mencionados, existem ainda diversos países, entre os quais a China, que exportam produtos de produção primária e secundária de madeira folhosa tropical para a Europa, em que, na maioria das vezes, não apresentam documentação de fácil leitura, quanto à sua origem e legalidade.

A 21 de maio de 2003, a Comunicação da Comissão “A aplicação da legislação, a governação e o comércio no sector florestal (FLEGT): Proposta de um plano de ação da UE”, do qual o EUTR faz parte, apresentou uma série de medidas de apoio a nível internacional, tendo por base a gestão sustentável das florestas, através do comércio da madeira e dos seus derivados. O Plano de Ação FLEGT foi um avanço no reconhecimento das responsabilidades comuns dos países produtores e dos países consumidores na exploração de madeira ilegal e no seu comércio.

De forma resumida e explicada por Pepke et al. (2013), o Plano de Ação FLEGT centra-se em sete grandes áreas: 1) no apoio aos países exportadores, incluindo ações de promoção de soluções equitativas para o problema da exploração de madeira ilegal; 2) no desenvolvimento de atividades de promoção do comércio de madeira legal, incluindo ações a desenvolver de implementação de acordos de parceria voluntária entre a UE e os países exportadores de madeira; 3) na promoção de políticas de contratos públicos, incluindo ações de orientação para as entidades adjudicantes sobre como lidar com a legalidade, ao especificar a madeira em processos de contratação; 4) no apoio a iniciativas do sector privado, incluindo medidas para encorajar as iniciativas do mesmo, para a boa prática no sector florestal, incluindo a utilização de códigos de conduta voluntária para as empresas privadas obterem madeira legal; 5) em salvaguardas para financiamento e investimento, incluindo medidas de encorajamento dos bancos e instituições financeiras que investem no sector florestal para desenvolverem procedimentos de cuidados devidos, aquando da concessão de créditos; 6) na utilização de instrumentos legislativos ou na adoção de nova legislação em vigor para apoiar o Plano FLEGT, incluindo o EUTR; 7) e no enfrentar do problema da madeira de conflito.

Com o intuito de controlar a proveniência da madeira importada e comercializada no espaço europeu, a União Europeia tem realizado acordos com países exportadores de madeira (“paí-

ses parceiros”), denominados por “Acordos de Parceria Voluntária” (“APV FLEGT”), estabelecendo obrigações legais e vinculativas de regulação do comércio da madeira, dando origem, a 20 de dezembro de 2005, ao “Regulamento (CE) n.º 2173/2005 do Conselho, relativo ao estabelecimento de um regime de licenciamento para a importação da madeira para a Comunidade Europeia (FLEGT)”. Através deste regulamento, a União Europeia procura fomentar reformas de governação, destinadas a desenvolver a cooperação multilateral, identificando a necessidade de criação de um regime de licenciamento para garantir que apenas entrem produtos de madeira legalmente obtidos, nos termos da legislação nacional do país produtor. Nesse sentido, o Regulamento n.º 2173/2005, também denominado por Regime de Licenciamento FLEGT, apenas aplicável à importação de madeira e seus derivados de países parceiros, prevê a criação de 3 anexos. No Anexo I, encontram-se enumerados os países parceiros e que, para tal, tiveram de instituir todos os controlos necessários para emitir licenças para todos os produtos do Anexo II. No Anexo II, são apresentados todos os produtos de madeira passíveis de licenciamento, segundo o regime FLEGT, independentemente do país parceiro. No Anexo III constam os produtos de madeira cobertos pelo regime de licenciamento FLEGT, destinados a serem comercializados apenas por determinados países parceiros.

Todos os anos, até 30 de abril, de acordo com o Artigo 8.º do Regime de Licenciamento FLEGT, são elaborados relatórios que devem incluir, nomeadamente, as quantidades de produtos importadas por cada Estado-Membro, o número de licenças FLEGT recebidas e o número de casos e quantidades de produtos de madeira envolvidos, exportados de países parceiros sem emissão de licença FLEGT.

Relativamente às espécies a serem comercializadas, em março de 1973, com o objetivo de garantir a preservação de espécies de fauna e flora selvagens do risco de exploração insustentável, devido ao comércio internacional, foi criada a Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Fauna e da Flora Selvagens Ameaçadas de Extinção (CITES). Portugal ratificou o nomeado acordo em 1980 através do Decreto n.º 50/80 do Diário da República n.º 168, Série I de 1980-07-23. Todas as Partes da CITES (países signatários da Convenção) partilham o quadro legal e os mecanismos de procedimento comuns com que regulamentam o comércio internacional das espécies listadas nos Anexos da CITES. Segundo a Convenção, mais de 30 000 espécies de animais e plantas são divididas em 3 graus de proteção e listados num dos três denominados Anexos da CITES.

Inicialmente, apenas Estados poderiam fazer parte da CITES. Em 1983, foi permitida a adesão de Organizações Regionais de Integração Económica (ORIE), que permitiria a entrada em plenas funções da União Europeia na CITES, o que viria a suceder apenas a 6 de março de 2015, com a Decisão (UE) 2015/451 do Conselho, relativa à adesão da União Europeia à Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies Selvagens da Fauna e da Flora Ameaçadas de

Extinção. Transpondo, na sua generalidade, as deliberações da Convenção, na União Europeia foram implementados os seguintes regulamentos: Regulamento (CE) n.º 338/97 do Conselho de 9 de dezembro de 1996, relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagem, através do controlo do seu comércio; e o Regulamento (CE) n.º 865/2006 da Comissão de 4 de Maio de 2006, que estabelece as normas de aplicação do Regulamento (CE) n.º 338/97.

O Regulamento (CE) n.º 338/97 tem por objetivo, definido no seu Artigo 1.º, a proteção das espécies da fauna e da flora selvagens e garantir a sua conservação pelo controlo do seu comércio. Nesse sentido, são definidos os Anexos A, B e C, em correspondência aos Anexos I, II e III da Cites, de acordo com a Tabela 2.7. Para além das referidas correspondências entre anexos, a Regulamentação Europeia prevê ainda um Anexo D no qual inclui as espécies suscetíveis de poderem vir a ser incluídas num dos Anexos A, B ou C e, como tal, poderem passar a ter o controlo dos níveis de importação. O Anexo D é também denominado por “lista de controlo”.

Tabela 2.7: Correspondência entre os Anexos (A, B, C e D) do Regulamento (CE) n.º 338/97 do Conselho, e os Anexo I, II e III da CITES (www9, 2016).

A	Espécies em perigo de extinção. O comércio destes espécimes apenas é permitido em condições excecionais. Corresponde, de modo geral, ao Anexo I da Convenção.
B	Inclui Espécies cujo comércio deve ser controlado, apesar de não se encontrarem em perigo de extinção, de modo a evitar uma comercialização não compatível com a sua sobrevivência. Corresponde, de modo geral, ao Anexo II da Convenção.
C	Contém Espécies protegidas pelo menos por uma Parte contratante, que solicitou às restantes Partes o seu apoio para controlar o comércio internacional. Corresponde, de modo geral, ao Anexo III da Convenção.
D	Inclui Espécies que, apesar de não possuírem qualquer estatuto de proteção, apresentam um volume de importações comunitárias que justifica uma vigilância.

Qualquer importação de espécimes de espécies, ou seus derivados, constantes num dos Anexos (A, B, C e D), só poderá ser comercializada para a UE e dentro dela, se acompanhada por certificado, licença ou notificação, dependendo do Anexo em que a espécie está classificada. As condições necessárias para a emissão da documentação terão de ser atestadas pela Autoridade Administrativa designada pelo próprio Estado-Membro da UE, em cooperação com a sua Autoridade Científica, de acordo com os Artigos 4.º e 5.º, do Regulamento (CE) n.º 338/97,

assegurando, desta forma, o facto da espécie não ser adquirida de forma ilegal, e que o seu comércio não seja prejudicial para a sobrevivência da espécie em estado selvagem.

Para além das espécies listadas nos 4 Anexos, a UE, através de uma denominada “opinião negativa”, formada pelo Grupo de Revisão Científica, e após consulta do(s) Estado(s) da respetiva área de distribuição relevante, poderá suspender a importação de certas espécies provenientes de determinados países. A formação da “opinião negativa” ocorrerá caso se suponha que a importação de determinada espécie para a UE possa ser nociva para a sua conservação. As opiniões negativas são emitidas temporariamente, podendo ser levantadas no momento em que se resolvam as preocupações apresentadas. Quando a importação de determinada espécie é suspensa por um período alargado de tempo, está previsto, a Comissão Europeia publicar no seu Jornal Oficial, os denominados “Regulamentos de Suspensões”. Nestes regulamentos, serão listadas as espécies suspensas, tal como as suas proveniências, ficando impedida a sua importação para a União Europeia.

Dentro da União Europeia, existe a livre circulação de bens sem qualquer controlo de fronteiras, fazendo com que não haja necessidade de obter licenças ou certificados de circulação de espécimes de uma dada espécie listada nos Anexos B, C e D. No entanto, para as espécies do Anexo B, haverá necessidade de fazer prova da aquisição das mesmas, em conformidade com a legislação de conservação nos países relevantes. Por regra, as espécies do Anexo A não poderão ser comercializadas, estando a sua circulação sujeita a regulamentação.

O Regulamento (CE) n.º 865/2006 tem por objetivo definir e regulamentar a formalização e os requisitos técnicos da documentação para a emissão, utilização e validade das licenças, certificados e pedidos de emissão, dependendo do seu teor, de acordo com o previsto no Regulamento (CE) n.º 338/97.

Nos últimos 7 anos, foram surgindo novos regulamentos, baseados essencialmente em aplicações e atualizações dos Regulamento (CE) n.º 338/97 e Regulamento (CE) n.º 865/2006. Em seguida, enumera-se a regulamentação em vigor.

A 4 de fevereiro de 2008, a Comissão das Comunidades Europeias procedeu à publicação do Regulamento (CE) n.º 100/2008 da Comissão, que altera, no que respeita às coleções de amostras e de certas formalidades relacionadas com o comércio de espécies da fauna e da flora selvagens, o Regulamento (CE) n.º 865/2006.

A 6 de fevereiro de 2012, a Comissão Europeia aprovou o Regulamento (UE) N.º 101/2012, que altera o Regulamento (CE) n.º 338/97 do Conselho, essencialmente motivada pela atualização do Anexo III da Convenção CITES, com a inclusão de novas espécies. Baseado, essen-

cialmente no mesmo motivo, a 27 de novembro do mesmo ano, foi aprovado o Regulamento (UE) n.º 1158/2012 da Comissão.

A 23 de agosto de 2012, a Comissão Europeia, motivada pela experiência adquirida na aplicação da regulamentação do controlo das espécies protegidas, aprovou dois novos regulamentos: o Regulamento (UE) n.º 791/2012, que altera o respeitante a determinadas disposições relativas ao comércio de espécies da fauna e da flora selvagens, do Regulamento (CE) n.º 865/2006; e o Regulamento de Execução (UE) n.º 792/2012, que estabelece regras para a conceção das licenças, certificados e outros documentos previstos no Regulamentos (CE) n.º 338/97.

A 29 de julho de 2013, a Comissão Europeia procede a uma nova atualização e reorganização das espécies listadas nos anexos do Regulamento (CE) n.º 338/97, na sequência da 16ª reunião da Conferência das Partes na Convenção da CITES, realizada em Banguecoque, Tailândia, em março de 2013, com a aprovação do Regulamento 750/2013 da Comissão.

Tendo por base o n.º 6 do Artigo 4º do Regulamento 338/97 e novas informações do Grupo de Análise Científica da União Europeia, periodicamente, são revogadas e estabelecidas novas restrições à introdução de espécimes de determinadas espécies da fauna e flora selvagens na União Europeia, através da aprovação de novos Regulamentos. Atualmente está em vigor o Regulamento de Execução (UE) n.º 888/2014 da Comissão, de 14 de Agosto de 2014.

A 1 de dezembro de 2014, foi publicado o Regulamento (UE) n.º 1320/2014 da Comissão, que procede a uma nova alteração dos anexos pertencentes ao Regulamento (CE) n.º 338/97, apresentando as suas últimas versões (Anexos A, B, C e D).

A 15 de janeiro de 2015, é publicado o Regulamento (UE) n.º 2015/56, procedendo a novas alterações ao Regulamento (CE) n.º 865/2006 e que visa ser utilizado conjuntamente com o Regulamento (UE) n.º 792/2012. No mesmo dia é publicado o Regulamento (UE) n.º 2015/57 da Comissão, em que se procede a alterações ao Regulamento de Execução (UE) n.º 792/2012 da Comissão, em particular, de acordo com as Resoluções 16.8 e 14.6 da Conferência da CITES, realizada em Banguecoque, Tailândia, em março de 2013.

2.2.2 Legislação Portuguesa

Relativamente a Portugal, à semelhança dos restantes países membros da União, a Regulamentação Europeia e as disposições da CITES são transportadas e complementadas para a legislação nacional. Nesse sentido, o Decreto-Lei n.º 211/2009 do Diário da República n.º 171,

Série I de 3 de setembro de 2009, estabelece as medidas necessárias ao cumprimento e à aplicação, em território nacional, da Convenção CITES, do Regulamento (CE) n.º 338/97, e do Regulamento (CE) n.º 865/2006. O mesmo Decreto-Lei define, no seu Artigo 5.º, o Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade (ICNB), a autoridade administrativa principal, responsável pelo cumprimento da Convenção CITES e pela execução dos Regulamentos (CE) n.º 338/97 e n.º 865/2006. Mais tarde, a 29 de junho de 2012, o ICNB viria a ser integrado no Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), através do Decreto-Lei n.º 135/2012. Para além disso, a Portaria n.º 1225/2009 enumera as estâncias aduaneiras sob jurisdição nacional em que são executadas as verificações e formalidades relativas à introdução na Comunidade Europeia de espécimes de espécies inscritas nos anexos A, B, C e D do Regulamento (CE) n.º 338/97, do Conselho, de 9 de Dezembro de 1996, e a sua exportação para fora da Comunidade Europeia

No que se refere às espécies protegidas, para além das definidas nos Anexos A, B, C e D do Regulamento (CE) n.º 338/97 e dos Anexos I, II e III da Convenção Cites, a Portaria n.º 1226/2009 enumera novas espécies a acrescentar aos referidos anexos, para a legislação portuguesa.

Por fim, a Portaria n.º 7/2010 do Diário da República n.º 2, Série I de 5 de janeiro de 2010 visa regular as condições de organização, manutenção e atualização do Registo Nacional CITES e as condições do exercício das atividades que impliquem a detenção de várias espécies.

2.3 A marcação CE e o compromisso europeu para produtos mais seguros

2.3.1 Conceito da marcação CE

Com a criação do mercado único europeu, a marcação CE surge com o objetivo de uniformizar as exigências nas características dos produtos, funcionando como um passaporte para a livre circulação no mercado do Espaço Económico Europeu (EEE), garantindo a conformidade com as disposições das Diretivas comunitárias. O símbolo CE corresponde à abreviatura da designação francesa Conformité Européene, que em português significa em Conformidade Europeia e indica a correspondência do produto em relação aos requisitos estabelecidos nas Diretivas comunitárias da “Nova Abordagem”.

O conceito de “Nova Abordagem” resulta da Resolução de Conselho de Ministros de 7 de Maio de 1985, na qual as Diretivas passam a ter por base os requisitos essenciais de saúde, segurança e bem-estar das pessoas e animais, a proteção do meio ambiente e as formas de comprovação da conformidade com esses requisitos. As Diretivas elaboradas de acordo com esta resolução designam-se por “Diretivas da Nova Abordagem”.

Os países que não pertençam ao EEE também terão de cumprir com as Diretivas, caso pretendam ter acesso a esse mercado. Pretende-se que a marcação CE não funcione como uma barreira técnica para impedir a exportação de países terceiros para a União Europeia, mas antes como um fator de harmonização e unificação de procedimentos, de forma a promover o desenvolvimento económico e social entre os diversos estados membros.

2.3.2 Diretiva dos Produtos de Construção (DPC)

Relativamente ao sector da construção civil, a 21 de dezembro de 1988, foi criada a Diretiva dos Produtos de Construção (DPC), 89/106/CEE, tendo por objetivo assegurar a livre circulação da generalidade dos produtos de construção, através do estabelecimento de Normas harmonizadas, de Aprovações Técnicas Europeias e da eliminação das barreiras técnicas no Espaço Económico Europeu (EEE).

A referida Diretiva foi transposta para a legislação portuguesa, a partir do Decreto-Lei 113/93 de 10 de abril e da Portaria n.º 566/1993, de 2 de junho, do Ministério da Indústria e da Energia, na qual foram definidas as exigências essenciais a observar em obra. Posteriormente, a Diretiva 89/106/CEE, juntamente com mais onze Diretivas referentes a produtos, instrumentos, equipamentos, aparelhos, etc., em circulação no mercado europeu e sujeitos à marcação CE, foram modificadas pela Diretiva do Conselho 93/68/CEE, de 22 de julho de 1993, com o objetivo da criação de uma regulamentação comum entre as Diretivas, relativa a uma marcação CE. A Diretiva 93/68/CEE foi transposta para a legislação portuguesa, através do Decreto-Lei n.º 139/95, de 14 de junho, posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 374/98, de 24 de novembro. A 8 de janeiro de 2007, é publicado o Decreto-Lei 4/2007, em que se integra, sob a forma de anexos, o conteúdo da Portaria n.º 566/93 e se realizam um número significativo de alterações ao Decreto-Lei n.º 113/93, de 10 de abril, procedendo-se à sua republicação integral.

A DPC tinha por abrangência todos os produtos de construção destinados a serem incorporados, de forma permanente, em obras de construção e cujo desempenho tivesse influência na respetiva obra, ao nível dos seus requisitos básicos, incluindo as obras de construção civil e de engenharia civil, durante um período de vida útil economicamente razoável. De acordo com o

definido no Anexo I da DPC, os requisitos básicos que deveriam ser preenchidos estariam ao nível dos seguintes fatores previsíveis: resistência mecânica e estabilidade; segurança contra incêndios; higiene, saúde e ambiente; segurança e acessibilidade na utilização; proteção contra ruído; economia de energia e isolamento térmico; e utilização sustentável dos recursos naturais.

2.3.3 Regulamento dos Produtos de Construção (RPC)

A 9 de março de 2011, o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia estabeleceram o Regulamento (UE) n.º 305/2011, que viria a revogar a Diretiva 89/106/CEE do Conselho, estabelecendo as novas condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção, mantendo os princípios inerentes às Diretivas da Nova Abordagem e os requisitos básicos para as obras de construção. O Regulamento viria a entrar em vigor a 1 de julho de 2013, sendo diretamente aplicado aos estados membros, não necessitando de transposição para diplomas nacionais.

O novo Regulamento teve em conta o quadro normativo horizontal para a comercialização de produtos no mercado interno, criado pelo Regulamento (CE) n.º 765/2008 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de julho de 2008, que estabelece os requisitos de acreditação e fiscalização relativos às condições de comercialização de produtos; e a Decisão n.º 768/2008/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de julho de 2008, relativa ao quadro comum para a comercialização de produtos.

Para assegurar a efetiva execução do Regulamento na ordem jurídica portuguesa, foi elaborado o Decreto do Presidente da República n.º 103/2013, de 10 de setembro, onde são adotadas as disposições necessárias para a concretização das exigências específicas da competência dos estados membros.

2.3.4 Procedimentos com vista à obtenção da marcação CE

Para a obtenção da marcação CE, os fabricantes são obrigados a seguir os procedimentos definidos na respetiva Diretiva europeia referente ao produto em causa. Deste modo, em primeiro lugar, o fabricante deverá identificar os requisitos aplicáveis ao produto que, no caso de se tratar de produtos de construção civil, são abrangidos pelo Regulamento dos Produtos de Construção (RPC), Regulamento (UE) N.º 305/2011.

Como referido anteriormente, os produtos de construção civil cujo desempenho tenha influência na respetiva obra, ao nível dos seus requisitos básicos, só poderão ser comercializados, no mercado livre do Espaço Económico Europeu, se estiverem em Conformidade Europeia, ostentando a marcação CE, cumprindo com os requisitos das Diretivas europeias da Nova Abordagem. Para além do EEE, também os países da Islândia, Liechtenstein, Noruega e Turquia adotaram as mesmas exigências para os produtos de construção.

A Conformidade Europeia para os produtos de construção está dependente do estabelecimento de especificações técnicas harmonizadas para a avaliação do desempenho dos produtos. As referidas especificações deverão ser definidas no âmbito de Normas harmonizadas e de Documentos de Avaliação Europeus reconhecidos pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) e/ou pelo Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (Cenelec). Desta forma, os fabricantes que pretendam a marcação CE para os seus produtos de construção, deverão utilizar Normas harmonizadas reconhecidas pelo CEN e/ou pelo Cenelec, quando as suas referências estiverem publicadas no Jornal Oficial da União Europeia, de acordo com a Diretiva 98/34/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de junho de 1998, que se refere a um procedimento de informação no domínio das normas e regulamentações técnicas.

2.3.4.1 Normas Harmonizadas

As Normas Europeias harmonizadas são especificações técnicas de abrangência generalizada, aplicáveis aos produtos dos diferentes sectores industriais e comerciais, independentemente do respetivo fabrico.

As normas harmonizadas são estabelecidas pelos organismos europeus de normalização, definidos no Anexo I da Diretiva 98/34/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de junho de 1998, nomeadamente pelo CEN, Cenelec e pelo Instituto Europeu de Normalização das Telecomunicações (ETSI), fornecendo os métodos e critérios de avaliação do desempenho dos produtos de construção, relativamente às suas características essenciais. No caso do RPC apenas intervêm o CEN e o Cenelec.

As normas definem o controlo de produção em fábrica, aplicável para as condições específicas do processo de fabrico do produto de construção em causa, definindo os pormenores técnicos necessários para a aplicação do sistema de avaliação e verificação da regularidade de desempenho. Avaliam o desempenho dos produtos em função das suas características, a partir da realização de ensaios, cálculos e outros meios, definidos no âmbito da Norma e de Documentos de Avaliação Europeus. Têm em conta os aspetos relativos à saúde e segurança com a utilização do produto durante o seu ciclo de vida.

As normas são estabelecidas pelos organismos europeus de normalização com os mandatos correspondentes, sendo avaliadas as suas conformidades pela Comissão. Posteriormente, a própria Comissão publica, no Jornal Oficial da União Europeia, a lista de referências das normas harmonizadas que estão em conformidade com os mandatos correspondentes. Os produtos e as respetivas normas harmonizadas para o controlo dos mesmos, tendo em vista a marcação CE, poderão ser consultados na Comunicação da Comissão, no âmbito da aplicação do Regulamento (UE) n.º 305/2011, 2015/C 054/02. Os organismos nacionais estão obrigados a transpor as normas harmonizadas, de acordo com a Diretiva 98/34/CE.

Sempre que uma norma entra em vigor, é definido um período de coexistência, no caso de existirem outras orientações técnicas para o mesmo produto. Após o período de coexistência, as normas harmonizadas são os únicos meios definidores dos procedimentos, com vista à realização da declaração de desempenho dos produtos de construção, por elas abrangidos.

2.3.4.2 Documento de Avaliação Europeu

Quando as características essenciais de um produto não são abrangidas na totalidade ou parcialmente por uma norma harmonizada, e caso o fabricante pretenda colocar a marcação CE no referido produto, deverá solicitar uma Avaliação Técnica Europeia, para a qual a organização dos Organismos de Avaliação Técnica (OAT) elaborará um Documento de Avaliação Europeu. Deste modo, desde que exista um Documento de Avaliação Europeu, a Avaliação Técnica Europeia pode ser emitida, mesmo no caso de ter sido emitido um mandato, tendo em vista uma norma harmonizada. A emissão será possível até ao início do período de coexistência fixado pela Comissão.

Para a elaboração do referido documento o OAT deve aplicar as regras de procedimentos previstas no Anexo II do RPC. A Comissão poderá ainda alterar o Anexo II e estabelecer regras suplementares de procedimento, na elaboração e aprovação de Documentos de Avaliação Europeus. Por fim, os Documentos aprovados pela organização dos OAT são enviados à Comissão para a sua publicação. Os cinco anexos do RPC podem ser consultados no Anexo A da presente tese.

Deste modo, os fabricantes que pretendam colocar um produto de construção em circulação no mercado do EEE, deverão fazer acompanhar uma Declaração de Desempenho do referido produto, em função das suas características essenciais. As referidas características deverão estar de acordo com as especificações técnicas harmonizadas aplicáveis, segundo as respetivas Normas harmonizadas, ou segundo a Avaliação Técnica Europeia elaborada para o respetivo produto. A respetiva Declaração de Desempenho deverá ser numerada de acordo com um código único de identificação do produto-tipo. Como garantia, o desempenho do produto deve-

rá ser avaliado e a sua produção em fábrica deverá ser controlada segundo um sistema adequado de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção.

2.3.4.3 Declaração de Desempenho

A Declaração de Desempenho é a peça central resultante do procedimento de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto. É a base indispensável para a marcação CE dos produtos de construção, com vista à sua livre circulação na União Europeia e, de forma mais abrangente, no Espaço Económico Europeu (EEE).

Caberá ao fabricante realizar a Declaração de Desempenho do produto. No caso deste ser abrangido por uma Norma harmonizada, ou estiver conforme uma Avaliação Técnica Europeia emitida para esse produto, deverá elaborar uma Declaração de Desempenho, em que deverá constar a descrição do desempenho do produto relativamente às suas características essenciais, de acordo com as especificações técnicas harmonizadas aplicáveis.

Porém, o fabricante poderá ficar dispensado da apresentação da Declaração de Desempenho perante uma das seguintes situações: se o produto for fabricado por medida, ou individualmente, sem ser em série; se for fabricado no estaleiro para incorporação na respetiva obra; ou se o produto for fabricado de forma tradicional ou de forma adequada à conservação de património. Para as primeiras duas situações, os produtos terão de ser enquadrados com a legislação nacional e deverão ficar sob a responsabilidade dos encarregados da segurança da execução das obras de construção, designados ao abrigo da legislação nacional aplicável.

O Anexo III do RPC, apresenta o modelo segundo o qual a Declaração de Desempenho deve ser redigida, incluindo toda a informação necessária. Partindo da Declaração de Desempenho do produto, deverá ser redigido um documento técnico com a descrição de todos os elementos relevantes relacionados com o sistema de avaliação e verificação exigido para o produto em causa.

Deverão ser estabelecidos métodos específicos de avaliação e verificação da regularidade do desempenho das características e estabelecidas disposições específicas para assegurar que a obrigação de apor a marcação CE, seja claramente compreendida. A marcação CE deverá ser a única marcação de conformidade do produto, não devendo os estados membros introduzir quaisquer referências distintas de conformidade de desempenho, relativamente às características abrangidas pela norma harmonizada.

No Anexo V do RPC, são apresentados os Sistemas de Avaliação e Verificação da Regularidade de Desempenho. Partindo de atos delegados, tendo particularmente em conta os efeitos na saúde, na segurança das pessoas e no ambiente, a Comissão determina qual o sistema ou

sistemas aplicáveis a um dado produto de construção, ou família de produtos, ou a uma determinada característica essencial. As Normas e as especificações técnicas harmonizadas deverão indicar o sistema ou sistemas selecionados.

Os importadores dos produtos de construção deverão certificar-se de que o fabricante procedeu à avaliação e verificação de regularidade do desempenho do produto. Subsistindo qualquer tipo de dúvida, o importador terá a obrigação de desenvolver as ações necessárias para que se certifique o cumprimento dos requisitos exigidos para o produto. Também os distribuidores deverão assegurar que, quando tal seja exigido, os produtos que apresentam a marcação CE sejam acompanhados pela devida documentação e atestar de que o fabricante e o importador cumpriram com os requisitos necessários. No caso de os importadores ou distribuidores colocarem o produto no mercado em seu próprio nome, ou se o alterarem, de modo a que possa afetar a sua conformidade com a Declaração de Desempenho, estarão sujeitos aos mesmos deveres que vinculam o fabricante.

Resumidamente, apenas nos produtos para os quais tenha sido feita uma Declaração de Desempenho poderá ser aposta a marcação CE, assumindo o fabricante a responsabilidade pela conformidade do produto com o desempenho declarado. Os produtos de construção de fabrico individual, denominados por “fabrico sem ser em série”, poderão receber a marcação CE, desde que o fabricante seja autorizado a utilizar procedimentos simplificados de avaliação de desempenho, demonstrando a conformidade do produto.

A Comissão poderá ainda estabelecer classes de desempenho para as características essenciais dos produtos de construção, devendo os organismos europeus de normalização utilizá-las nas Normas harmonizadas. Baseado num mandato revisto, os organismos europeus de normalização, autonomamente, também o poderão fazer. Nas situações em que uma norma harmonizada defina classes de desempenho, a organização dos OAT, deverá utilizar essas classes nos Documentos de Avaliação Europeus.

2.3.4.4 Simplificação de procedimentos

O RPC prevê também a possibilidade de simplificar os procedimentos de atribuição da marcação CE, umas vezes pelos custos dispendiosos que todo o processo acarreta, outras, pelo desnecessário duplicar de trabalho realizado por outros fabricantes ou em produtos semelhantes. Nesse sentido, destacam-se três situações em que o fabricante poderá substituir os ensaios e cálculos, ou mesmo dispensá-los, designadamente: 1) no caso do produto corresponder a um determinado nível ou classe de desempenho, relativamente a uma ou mais características essenciais, de acordo com as condições das especificações técnicas harmonizadas ou por decisão da Comissão; 2) no caso do produto abrangido por uma Norma harmonizada corresponder a outro produto-tipo produzido e verificado, pela mesma norma, por outro fabricante; 3) se o

produto for um sistema de componentes que o fabricante monta, de acordo com as instruções do fabricante do sistema, ou de um dos seus componentes, tendo sido já realizados os ensaios necessários, segundo as especificações técnicas harmonizadas aplicáveis para o sistema ou componentes do mesmo, para uma ou várias características essenciais. Para estas situações, se o produto pertencer ao grupo para o qual se aplica o sistema de avaliação e verificação de regularidade de desempenho 1+ ou 1, previsto no Anexo V do RPC, a documentação técnica deverá ser verificada por um organismo de certificação de produtos notificados nos termos do respetivo anexo.

Sempre que haja necessidade de simplificar o processo de atribuição da marcação CE a partir dos resultados de outro fabricante, o fabricante do produto em causa só poderá utilizar os resultados se obtiver autorização desse fabricante para tal, uma vez que este último continua a ser responsável pelo rigor, fiabilidade e estabilidade desses resultados.

2.3.4.5 Pontos de Contacto, Organismos de Avaliação Técnica, Organismos Notificados, Autoridades Notificadoras e Autoridades de Fiscalização

Todos os atores, desde o processo de fabricação até à comercialização dos produtos, passando pelos importadores e distribuidores dos produtos de construção, deverão ter conhecimento das características essenciais e requisitos específicos em vigor nos estados membros, devendo utilizar esse conhecimento nos processos de transações comerciais. Os estados membros deverão designar Pontos de Contacto para os produtos da construção, de modo a garantir que as regras técnicas nacionais do país onde se pretende comercializar os produtos sejam acessíveis para as empresas. Para além disso, os Pontos de Contacto deverão prestar informações sobre as regras aplicáveis à incorporação, montagem ou instalação de tipos específicos de produtos.

Para a implementação e o bom funcionamento do recente Regulamento de Produtos de Construção, a sua aplicação deverá ser diferida das autoridades de notificação e dos organismos notificados, com exceção das disposições relativas à designação dos Organismos de Avaliação Técnica (OAT), à criação de uma organização de OAT e à criação de um Comité Permanente da Construção.

Cabe aos estados membros designarem, para os respetivos territórios, os Organismos de Avaliação Técnica, para uma ou várias gamas de produtos, de acordo com o quadro 1 do Anexo IV do RPC, comunicando, posteriormente, aos restantes estados membros e à Comissão, as nomeações efetuadas. No quadro 2 do mesmo Anexo IV, são definidos os requisitos aplicáveis aos OAT, devendo as suas atividades e competências ser controladas e avaliadas por parte dos estados membros.

Sublinhando o referido anteriormente, os OAT deverão criar uma organização de avaliação técnica, de modo a apoiar as suas funções, das quais se destacam: a coordenação da aplicação das regras processuais definidas essencialmente no Anexo II do RPC, prestando o apoio necessário para o efeito; a elaboração e aprovação dos Documentos de Avaliação Europeus; e assegurar que os mesmos Documentos e as referências às Avaliações Técnicas Europeias estejam à disposição do público em geral.

O RPC prevê também a existência dos denominados Organismos Notificados. Estes organismos estão envolvidos no processo de avaliação e verificação da regularidade do desempenho dos produtos. Os Organismos Notificados, quando solicitados pelo fabricante e cumprindo todos os requisitos de idoneidade e competência, poderão realizar ensaios previstos nos sistemas 1+, 1 e 3, ou mandar efetuar sob sua supervisão. Para proceder à avaliação e notificação destes organismos, os estados membros designam Autoridades Notificadoras. Para que um organismo possa exercer as funções de Organismo Notificado, deverá apresentar um pedido de notificação à Autoridade Notificadora do estado membro a que pertence. Os requisitos aplicáveis aos Organismos Notificados e às Autoridades Notificadoras estão descritos no RPC.

Existem ainda as autoridades de fiscalização do mercado dos estados membros, que poderão proceder à avaliação de um produto, se existirem motivos suficientes que levem a supor que esse produto, abrangido por uma Norma harmonizada ou para o qual foi emitido uma Avaliação Técnica Europeia, não atinge o desempenho esperado, constituindo um risco para o cumprimento dos requisitos básicos das obras de construção. Caso se confirme, a entidade fiscalizadora deverá exigir, junto do operador económico interessado, medidas adequadas para assegurar a conformidade do produto, ou solicitar a sua retirada do mercado. Posteriormente, o operador económico deverá garantir que todas as medidas corretivas sejam implementadas. Caso esteja envolvido algum Organismo Notificado, este deverá ser informado pelas autoridades de fiscalização.

Em Portugal, através do Decreto-Lei n.º 130/2013, de 10 de setembro, é definido um Comité Permanente da Construção (CPC), representado pela Direção-Geral das Atividades Económicas (DGAE). Competirá ao Instituto Português da Qualidade, I.P. (IPQ I.P.) designar os Organismos de Avaliação Técnica (OAT), assumir as competências de Autoridade Notificadora e assegurar a função de Ponto de Contacto para os produtos do sector da construção. Competirá ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC, I.P.) colaborar com a DGAE, na prestação de informações à entidade com funções de Ponto de Contato, para os produtos do sector da construção. O controlo dos produtos na fronteira externa será da competência da Autoridade Tributária e Aduaneira. A fiscalização de mercado caberá à Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE).

Na Capítulo 3, serão analisadas as normas EN 384 (CEN, 2010) e EN 408 (CEN, 2012a), tendo em vista os procedimentos de atribuição das Classes de Resistência e a sua adequabilidade à realidade das madeiras de folhosas tropicais.

Na tabela ZA.2 do mesmo anexo ZA, da EN 14081-1 (CEN, 2016), é confirmada a referência ao sistema 2+ para a Avaliação e Verificação da Regularidade do Desempenho (AVRD, correspondente à sigla inglesa AVCP - Assessment and Verification of the Constancy of Performance) dos produtos de madeira estrutural com secção retangular. Existe, porém, a exceção para os materiais que numa etapa, claramente identificável no processo da sua produção, resulte uma melhoria da reação ao fogo, por exemplo, através de aplicação de produtos retardadores de fogo ou limitadores de material orgânico. Para estes produtos, deve aplicar-se as condicionantes impostas pelo sistema 1.

Ainda no anexo ZA, é apresentada a tabela ZA.3, onde são definidas as tarefas a realizar para a avaliação da conformidade do desempenho de um elemento de madeira estrutural classificado, com secção retangular e sob o sistema 2+. De acordo com a tabela mencionada, os processos são definidos na secção 6 da EN14081-1 (CEN, 2016). Desta forma, as tarefas para o fabricante estarão descritas na secção referente ao Controle de Produção na Fábrica (CPF). As tarefas para o organismo de certificação de controle de produção notificado, estão descritas nas subsecções correspondentes à inspeção inicial de fábrica e de CPF, e à vigilância contínua de CPF respetivamente.

Na secção ZA.2.2, são descritos os conteúdos genéricos que a avaliação de conformidade deve conter, apresentando-se um exemplo do preenchimento de uma Declaração de Desempenho, prevista no Anexo III do Regulamento dos Produtos de Construção. No mesmo anexo, na secção ZA.3, são descritas as regras de marcação e rotulagem para os elementos de madeira, tendo por base o exemplo apresentado na secção ZA.2.2.

2.4 As espécies Câmbala e Sapelli

De acordo com o exposto no Capítulo 1, para os objetivos delineados na presente tese foram escolhidas ensaiar amostras das espécies de Câmbala (*Milicia excelsa*) e de Sapelli (*Entandrophragma Cylindricum*). Nesse sentido, através de procedimentos internos de controlo da empresa fornecedora, foi assegurada a proveniência das espécies solicitadas com origem na floresta tropical da República do Congo. O facto de as madeiras serem provenientes da República do Congo, acabou por ser relevante do ponto de vista da possibilidade de madeiras da mesma espécie e com a mesma origem, poderem vir a ser importadas para a Europa. Isto,

porque segundo o novo regulamento EUTR, a República do Congo é um dos poucos países africanos com quem a UE já está a implementar o denominado Acordo de Parceria Voluntária.

Segundo dados da FLEGT (Forest Law Enforcement, Governance and Trade), o Congo é um país em que a floresta cobre cerca de 65% da sua área territorial (www10, 2016), sendo o segundo recurso natural mais valioso, imediatamente a seguir ao petróleo. Cerca de 3,5 milhões de hectares de floresta são considerados áreas protegidas e 19 milhões de hectares são destinados à exploração da madeira. O facto da União Europeia ser um dos principais parceiros comerciais recetores da exportação da sua madeira, a par da China, fez com que, em junho de 2008, a UE e o Congo iniciassem as negociações, com vista ao estabelecimento de um acordo para a implementação de um sistema que visasse garantir que os produtos de madeira e seus derivados, exportados da República do Congo para a UE, não fossem provenientes de abate ilegal, mas sim de florestas geridas de forma sustentável, com benefício para as comunidades locais. Em 19 de fevereiro de 2013, a UE e o Congo concluíram a ratificação do denominado “Acordo de Parceria Voluntária”.

2.4.1 Câmbala

O nome de Câmbala é vulgarmente atribuído à espécie de madeira *Milicia excelsa* (Welw.), que tem como sinónimos as denominações de *Chlorophora excelsa* (Welw.) Benth. (Richter, 2009), *Chlorophora alba* (A. Chev), *Chlorophora tenuifolia* Engl., *Maclura excelsa* (Welw.) Bureau, *Milicia africana* Sim e *Morus excelsa* Welw (AFPD, 2008; Berg, 1982). Para além do vernáculo Câmbala, vulgarmente utilizado em Portugal, a espécie é também conhecida por amoreira, moreira, teca africana, tumbiro ou magundo. Em inglês pode assumir os nomes de iroko, rock elm, African teak, African oak ou mvule. Em Francês é também conhecida por iroko, mas ainda por chêne d’Afrique, teck d’Afrique, teck kambala (Louppe et al., 2008). A espécie pertence à família das Moraceae (Ayensu, 1974).

2.4.1.1 Disseminação

A Câmbala é uma espécie nativa de África, predominando nas florestas tropicais, savanas húmidas, zonas ribeirinhas, zonas com acesso a águas subterrâneas e em baixas altitudes. A sua árvore pode tolerar uma estação seca de até 6 meses e crescer em áreas com precipitação média anual de apenas 700 milímetros desde que tenha acesso a água a partir de um fluxo perene ou fonte subterrânea. É também uma espécie que não tolera encharcamento (Orwa et al., 2009).

Geograficamente a Câmbara pode ser encontrada na bacia do rio Congo, estendendo-se a oeste até à Guiné Bissau, a leste até à Etiópia e a sul até ao Zimbabué e Moçambique (Orwa et al., 2009). A Figura 2.4, apresenta o mapa da origem e disseminação da espécie.



Figura 2.4: Disseminação geográfica da Câmbara (www11, 2017).

2.4.1.2 Descrição da árvore

As árvores da espécie Câmbara caracterizam-se por terem uma altura entre os 30 e os 50 metros (Appiah, 2003), um tronco reto e cilíndrico até aos seus 20 metros (pelo menos) e por um diâmetro do tronco que pode variar entre 2 a 10 metros (Orwa et al., 2009). Para além disso, a sua base é geralmente constituída por contrafortes que lhe conferem estabilidade. Apesar dos troncos serem geralmente retos e cilíndricos, as árvores da savana são frequentemente afetadas por incêndios que provocam um crescimento excêntrico da sua madeira, causado pela casca encravada ou por depósitos de carbonato de cálcio (Ofori, 2007). A casca caracteriza-se por ser grossa de cor a variar entre o cinzento, castanho escuro ou preto, tornando-se escamosa com o seu interior espesso e fibroso, salpicado por manchas laranja acastanhadas que exsuda um látex branco ou amarelado de cor creme. O seu cerne apresenta-se de cor amarela ou amarelo pálido, escurecendo com a exposição solar para um amarelo mais escuro, esverdeado ou castanho. O grão é encadeado com textura média a grossa. A sua madeira é um pouco oleosa e inodora (Louppe et al., 2008; Orwa et al., 2009). Os seus ramos aparecem normalmente a partir dos 25 metros da altura do tronco, com crescimento oblíquo e ascendente, originando uma copa em forma de guarda-chuva de ramos dispersos. As suas raízes são superficiais, muitas vezes longas e proeminentes, de cor vermelha acastanhada (www11, 2017). A Figura 2.5 apresenta exemplos de árvores de Câmbara.



Figura 2.5: Exemplo de árvores de Câmbala (www12, 2017) e das suas folhas (www13, 2017).

2.4.1.3 Usos e aplicações

No caso das árvores de Câmbala, todos os seus constituintes são extremamente valorizados para diferentes usos e fins. A sua madeira é empregue para trabalhos de construção civil, construção naval, carpintaria, mobiliário em geral, pavimentos, aplicação em elementos estruturais, acabamentos de interiores e exteriores, brinquedos e instrumentos musicais. Devido à sua resistência à ação de líquidos ácidos e base, é também usada para tanques e barris para alimentos, produtos químicos e bancadas laboratoriais. A sua lenha é ainda aproveitada para a fabricação de carvão. Para além do uso da sua madeira, os seus frutos e folhas são comestíveis, e o aroma do seu sumo é muito valorizado. As folhas mais maduras são também usadas como lixas. A sua casca é usada para recobrir telhados e para tingimento de couro e tecidos (Louppe et al., 2008; Orwa et al., 2009).

A Câmbala é também amplamente utilizada na medicina tradicional africana, contribuindo para a cura de mais de 45 doenças humanas. Para tal, são aproveitadas as diferentes partes da árvore, desde as suas folhas (30,3%), casca (25,8%), raízes (23,6%), látex (10,1%), descamação da casca (6,7%), madeira, cálcio concentrado em árvores velhas e goma (1,1% cada) (Ouinsavia, 2005). A título de exemplo, a fervura da sua raiz é muitas vezes usada para tratamento da esterilidade feminina e como afrodisíaco. Preparativos da sua casca são usados para tratamento de tosse, asma, problemas cardíacos, problemas de estômago, edemas, entorses, tratamento de feridas e febres. As suas folhas são também comidas para tratamento de demências e os seus preparativos para tratamento de picadas de mosquitos e cobras (Louppe et al., 2008). Foram registadas seis formas diferentes de utilização das folhas: em imersão (46,3%), casca ou folhas de decocção (32,8%), chás de ervas (11,9%), pós (6,0%), folhas ou cascas aterradas e enroladas em bola (1,5%), e componentes da oferta ou fetiche (1,5%) (Ouinsavia, 2005).

2.4.1.4 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Relativamente às características físicas e mecânicas, existem algumas variações e nuances entre os resultados apresentados por diferentes laboratórios independentes e estudos científicos. Começando pelos valores da massa volúmica, de uma forma geral, a Câmbala apresenta valores que vão desde os 550 (Louppe et al., 2008) aos 786 kg/m³ (Wu, 2009). Pelo meio temos estudos que nos dão valores de 752 kg/m³ (Amoah et al., 2012), de 620 kg/m³ (Tsoumis, 1991) e o CIRAD com um valor próximo dos 640 kg/m³. Relativamente ao módulo de elasticidade à flexão, estudos demonstram poder variar entre os 8,3 e os 13,3 GPa (Louppe et al., 2008). Cheng (1992) apresentou valores entre 9,3 e 9,4 GPa; Tsoumis (1991) apresentou um valor médio de 11,27 GPa; Amoah et al. (2012), também para provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, apresentaram 13,2 GPa, e a base de dados do CIRAD, apresenta um valor médio de 12,8 GPa. No que se refere à tensão de rotura à tração, os valores encontram-se normalmente entre os 75 e os 156 MPa (Louppe et al., 2008). Excepcionalmente, Amoah et al. (2012), obtiveram valores médios de 64 MPa, enquanto o CIRAD apresenta um valor médio de 87 MPa (Tropix, 2015).

Em relação à estabilidade dimensional da espécie, a bibliografia apresenta valores para a Câmbala de 1,7% a 4,1% de retração radial, com um máximo de 5,6%; e de 2,4% a 6,3% de retração tangencial, com um máximo de 9,8% (Louppe et al., 2008). Apresenta-se, em seguida, a Tabela 2.8, onde se podem consultar os valores de referência para a Câmbala, definidos por Tsoumis (1991).

Tabela 2.8: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da Câmbala (*Milicia excelsa*) para um teor em água de 12% (Tsoumis, 1991; LNEC, 1997).

Valores médios (H=12%) Provetes isentos de defeitos (2x2x32cm)		CÂMBALA <i>Milicia excelsa</i>
Propriedades físicas		
Massa volúmica (kg/m ³)		620
Coeficientes de retração unitária	Tangencial	0,24
	Radial	0,17
	Volúmica	0,41
Propriedades mecânicas		
Flexão estática	Tensão rotura (MPa)	111
	Módulo elástico (GPa)	11,27
Tração longitudinal (MPa)		78
Tração transversal (MPa)		2,5
Compressão longitudinal (MPa)		68
Corte (MPa)		10,8
Dureza (kN)		3,2

2.4.1.5 Mercado comercial

Devido ao alto aproveitamento da sua madeira, a Câmbala foi uma espécie excessivamente explorada em determinadas áreas geográficas, pondo em risco a sua subsistência nessas regiões (Orwa et al. 2009). Esta característica fez com que fosse importada para plantação, quer para os Estados Unidos, quer para a Índia (Orwa et al. 2009; Louppe et al. 2008).

A madeira de Câmbala (*Milicia excelsa*), no mercado comercial, não é distinguida da madeira de Câmbala Escura (*Milicia regia*), sendo ambas comercializadas pelo nome de Câmbala ou Iroko (em inglês). A Câmbala é altamente valorizada e procurada em África. Durante os anos 60 do século passado, estima-se que a Costa do Marfim tenha exportado 55.000 m³ de Câmbala em tronco e 6.000 m³ de Câmbala já serrada, por ano. Calcula-se que o Gana tenha exportado cerca de 28.000 m³ de Câmbala serrada. Relativamente ao ano de 1973, a Costa do Marfim exportou 136.500 m³ de madeira Câmbala em tronco, e 16.000 m³ em madeira serrada. Em 1994, os Camarões exportaram 65.000 m³ de madeira em tronco e 12.000 m³ de madeira serrada, enquanto o Congo exportou cerca de 10.000 m³ em toro e o Gana exportou, no mínimo, 47.000 m³ de madeira serrada. Entre 1998 e 1999, estima-se que tenham sido cortados cerca de 133.400 m³ de madeira de Câmbala só nos Camarões. De 1998 a 2003, estima-se que o Gana tenha exportado 28.500 m³ de madeira em tronco, por ano. Atualmente, na Costa do Marfim, Gana e Camarões, apenas a exportação de madeira serrada de Câmbala é permitida (Louppe et al., 2008).

Em 2003, os Camarões exportaram cerca de 33.000 m³ de Câmbala serrada a um valor aproximado de 948 USD's/m³. No mesmo ano, o Congo exportou cerca de 28.000 m³ de toros de Câmbala, a um custo médio de 221 USD's/m³. A República Centro Africana exportou cerca de 2.000 m³ de toros de Câmbala a um valor médio de 412 USD's/m³ e 5.000 m³ de Câmbala serrada a 465 USD's/m³. O Gana terá exportado cerca de 8.000 m³ de Câmbala serrada a 745 USD's/m³, e o Togo, 1.000 m³ a 260 USD's/m³ (Louppe et al., 2008).

No passado, a Tanzânia e o Uganda foram os maiores exportadores de Câmbala. No Gabão, a Câmbala está espalhada por toda a floresta, tendo um volume médio de abate para comércio de 0,1 m³/ha (Louppe et al., 2008).

2.4.1.6 Exploração e sustentabilidade da espécie

Devido à aparência da madeira e às suas características de elevada durabilidade, estabilidade, e de boa trabalhabilidade, a Câmbala pertence ao grupo das madeiras mais valorizadas de África (Louppe et al., 2008). Em comparação com outras madeiras nobres, a Câmbala é uma espécie de rápido crescimento. As árvores estão prontas para o abate em cerca de 50 anos (Orwa et al., 2009).

A Câmbara é essencialmente extraída da floresta tropical natural, devido às suas plantações serem frequentemente afetadas por pragas nas fases iniciais de crescimento. A identificação de instrumentos preventivos dos ataques das pestes merece a máxima prioridade para que se possam desenvolver plantações desta espécie (Louppe et al., 2008; Orwa et al., 2009)

A exploração da Câmbara tornou-se, em algumas zonas, insustentável, concretamente na floresta tropical da África Ocidental. Nos anos 80, estima-se que o volume de extração de Iroko (Câmbara e Câmbara Escura) no Gana tenha sido de 170.000 m³ por ano, enquanto que a sua regeneração foi estimada em apenas 29.000 m³ por ano. Apesar de tudo, a extinção da espécie de Câmbara (*Milicia excelsa*) é classificada como “de baixo risco, mas próximo de ameaçada”, na lista das espécies ameaçadas da IUCN Red List de 2014. As principais ameaças na África Ocidental são a expansão da agricultura que vai reduzindo o habitat da espécie, a exploração exagerada da sua madeira e o ataque de algumas pragas e doenças (Louppe et al., 2008).

A veneração da árvore é a principal abordagem na sua conservação, por parte de populações nativas, sendo conservada a sua exploração em bosques sagrados, em locais públicos e em cemitérios (Ouinsavia et al., 2005). As árvores são ainda empregues na conservação do solo ou como árvores ornamentais em povoações, servindo de sombra ou abrigo (Orwa et al., 2009). Em muitas culturas nativas centro africanas, a árvore de Câmbara é também considerada como uma árvore sagrada (Ouinsavia et al., 2005).

Em alguns países já foi aprovada legislação protetora para esta espécie, como são os casos da Costa do Marfim, Moçambique, Gana e Tanzânia. Nos dois últimos passou a ser necessária licença de exploração da espécie. A exportação em tronco é já proibida em vários países, da África Ocidental e Oriental (Louppe et al., 2008).

2.4.2 Sapelli

A Sapelli é o nome comercial atribuído à espécie *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague. Esta espécie tem também por sinónimos *Entandrophragma angolense* (Welw.), *Swietenia angolensis* (Welw.) (ORSTOM, 1988), *Entandrophragma tomentosum* A. Chev e *Entandrophragma lebrunii* Staner (Richter et al., 2000). Para além do nome de Sapelli a espécie é também vulgarmente conhecida em inglês por sapelli mahogany, sapele mahogany, West African cedar e scented mahogany. Em francês é também conhecida por Sapelli e cédrat d’Afrique. A espécie pertence à família das *Meliaceae* (Richter et al., 2000).

2.4.2.1 Disseminação

A Sapelli é uma espécie nativa de África, predominando nas florestas tropicais e florestas semi-temperadas, podendo aparecer em habitats mais secos ou campos abandonados, mas sendo predominante em regiões com pluviosidade anual de 1750 mm, com períodos de seca de 2 a 4 meses e temperatura média anual de 24 a 26 °C (IUCN, 2014; Lourmas et al., 2007).

A Sapelli é a espécie mais comum das *Entandrophragma*, em grande parte, pela sua disseminação. Geograficamente, pode ser encontrada nas florestas tropicais da África Ocidental e na bacia do rio Congo. (Lourmas et al., 2007; IUCN, 2014). A Figura 2.6, apresenta o mapa da origem e disseminação da espécie.



Figura 2.6: Disseminação geográfica da Sapelli (www11, 2017).

2.4.2.2 Descrição da árvore

As árvores de Sapelli têm grande longevidade e são de crescimento lento, desempenhando um importante papel ecológico na floresta tropical africana (Lourmas et al., 2007). São árvores que podem atingir alturas de 55 a 65 metros. O seu tronco é reto e cilíndrico, com diâmetro variável entre os 2 a 2,8 metros (Lourmas et al., 2007). As ramificações aparecem a partir dos 30 metros de altura (US DAFS, 2007). A cor da casca varia entre o acinzentado, castanho acinzentado ou castanho amarelado. O seu interior é rosado, ficando avermelhado com oxidação após o corte. A textura é bastante fina e o seu odor é parecido ao do cedro (Kémeuzé, 2008). A copa é arredondada e simétrica, as suas flores são pequenas, numerosas e compostas por 5 pétalas (Jansen, 1974). Os seus frutos são alongados de cápsulas lenhosas (Panshin, 1933).

A Figura 2.7 apresenta exemplos de árvores de Sapelli.



Figura 2.7: Exemplos de árvore (www14, 2017) e do seu tronco (www15, 2017).

2.4.2.3 Usos e aplicações

Para além do elevado valor ecológico, as árvores de Sapelli têm também elevado valor comercial e medicinal. A sua madeira é de alto valor para soalhos, revestimentos interiores, carpintaria, painéis, marcenaria, instrumentos musicais, esculturas, construção naval e laminados (Lourmas et al., 2007). É também usada como matéria prima para elementos estruturais maciços ou lamelados.

Na África central, a sua casca é usada para fins medicinais, nomeadamente para tratamentos de bronquites, problemas pulmonares em geral, resfriados e edemas. A sua polpa é também usada para tratamento de furúnculos e feridas (Lourmas et al., 2007). A árvore serve ainda para efeitos ornamentais, sendo plantada em arruamentos e avenidas.

2.4.2.4 Propriedades físicas e mecânicas

Relativamente à sua massa volúmica, na generalidade, são apontados valores que variam entre 560 e 750 kg/m³, com um módulo de elasticidade à flexão entre os 8,9 e os 13,8 GPa (Lourmas et al., 2007). Ainda para o módulo de elasticidade, a USDA (1980) apresenta um valor de 11,7 GPa, compreendido no intervalo acabado de referir, já o CIRAD (2003) fala de um valor ligeiramente superior, de 13,96 GPa. No que se refere à tensão de rotura à tração no sentido das fibras, os valores publicados apresentam um intervalo bastante alargado, compreendido entre os 95 e os 184 MPa (Lourmas et al., 2007). Relembra-se que os resultados têm por referência ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeito. A USDA (1980), apresenta um valor de 111 MPa. Em relação à estabilidade dimensional, os valores disponíveis referem um intervalo entre 3,5% a 7,6% para a retração radial, e entre 4,3% a 9,8% para a retração tangencial (Lourmas et al., 2007). Os valores da USDA (1980) e do CIRAD (2003) também se enquadram nos mesmos intervalos, com 4,6% e 5% para a retração radial, respetivamente, e, do mesmo modo, 7,4% e 7,2% para a retração tangencial. Em seguida, a Tabela 2.9

apresenta os valores de referência, definidos nas bases de dados do CIRAD (2003) e da PROTA (2008).

Tabela 2.9: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) para um teor em água de 12% (CIRAD, 2003; PROTA, 2008).

SAPELLI <i>Entandrophragma cylindricum</i> Valores médios (H=12%)		CIRAD	PROTA 2008
Propriedades físicas			
Massa volúmica (kg/m ³)		690	560–750
Coeficientes de retração unitária (%)	Tangencial	7,2	4,3–9,8
	Radial	5	3,5–7,6
	Volúmica	0,47	—
PSF (ponto de saturação das fibras) (%)		29	—
Propriedades mecânicas			
Flexão estática	Tensão rotura (MPa)	102	95–184
	Módulo elástico (GPa)	13,96	8,9–13,8
Compressão longitudinal (MPa)		—	40-75
Corte (MPa)		—	8

2.4.2.5 Mercado comercial

A Sapelli é uma das madeiras mais importantes na exportação das florestas tropicais africanas (Lourmas et al., 2007). Durante os anos 60, os principais exportadores eram a Costa do Marfim e o Gana. A exportação média anual da Costa do Marfim, entre os anos de 1963 e 1974 foi de 122.000 m³ de madeira em tronco e de 15.700 m³ de madeira serrada. No Gana, durante o período compreendido entre 1963 e 1967, exportaram-se anualmente 48.000 m³ em tronco e 39.000 m³ em madeira serrada. Nos Camarões exportaram-se, anualmente, 52.000 m³ em tronco, entre 1969 e 1970. No mesmo período, os países da Nigéria, Congo e República Centro-Africana exportaram, em conjunto, cerca de 60.000 m³ de madeira em tronco (Lourmas et al., 2007).

A proveniência da Sapelli é essencialmente da África central, nomeadamente dos Camarões, República Centro Africana e Congo. As suas exportações ascenderam aos 165 milhões de dólares em 2003. Em termos de volume e valores destes 3 países, teremos a República Centro Africana que exportou 41.000 m³ de toros em 2003, a um preço médio de 391 USD's/m³, e 29.000 m³ de madeira serrada, a um preço médio de 473 USD's/m³. O Congo exportou 211.000 m³ de toras em 2003, a um preço médio de 224 USD's /m³, 221.000 m³ em 2004 a 219 USD's/m³ e 150.000 m³, em 2005, a 194 USD's/m³. Já os Camarões exportaram

108.000 m³ de madeira serrada em 2003, a um preço médio de 806 USD's/m³, 120.000 m³ em 2005, a 350 USD's/m³, e 89.000 m³ em 2006, a 422 USD's/m³ (Lourmas et al., 2007).

2.4.2.6 Exploração e sustentabilidade

Sendo a Sapelli uma das madeiras comerciais mais importantes de África, quer ao nível de quantidade explorada, quer ao nível da sua qualidade, a sua procura torna-se bastante elevada. O seu lento crescimento debaixo das condições naturais e a baixa capacidade de dispersão das próprias sementes são uma forte desvantagem para o rejuvenescimento da espécie. A possibilidade de se procurar uma intensa plantação da espécie não parece ser uma aposta lógica, dado o seu lento crescimento. Na Costa do Marfim e Camarões são realizadas plantações de madeira de Sapelli, mas ainda em escala muito pequena, com menos de 10 e 425 hectares, respetivamente (UNEP, 2006). Nos Camarões é também realizado o plantio em florestas. Entretanto, vários países foram adotando leis que impõem limites mínimos de diâmetro no abate das árvores de Sapelli. No Gana, o diâmetro mínimo é de 110 cm, nos Camarões, de 100 cm, na Libéria, de 90 cm, na República Centro Africana, Gabão e Congo, de 80 cm, e na Costa do Marfim, de 60 cm (Lourmas et al., 2007).

Em 1973, o volume total de madeira explorada na Costa do Marfim, Camarões, República Centro Africano e Congo, juntos, foi estimado em mais de 50 milhões de m³ (Lourmas et al., 2007). No entanto, o interesse comercial na valiosa madeira resultou na extração de grandes quantidades nas florestas da região, levando a que esteja considerada com o grau de "Vulnerável", relativamente à sua extinção, segundo a IUCN Red List (2014).

Relativamente ao Congo, a Sapelli representa mais de 70% da madeira extraída no norte do país. A sua exploração levou já a parte da sua extinção na África Ocidental (Hewitt, 2007).

2.4.3 A semelhança entre as espécies estudadas

De forma a justificar a opção pelas espécies de Câmbala e Sapelli perante a normalização europeia, nomeadamente, segundo a EN 384 (CEN, 2010) (norma que será aprofundada na secção 3.2 da presente tese), faz-se uma comparação entre as propriedades de referência das duas espécies. A Tabela 2.10 resume a comparação entre as propriedades.

Tabela 2.10: Comparação entre as propriedades de referência entre as espécies de Câmbala (*Milícia excelsa*) e Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) para um teor em água de 12% (Tsoumis, 1991; LNEC, 1997; CIRAD, 2003; PROTA, 2008).

Espécie	CÂMBALA <i>Milícia excelsa</i>		SAPELLI <i>Entandrophragma cylindricum</i>	
	Tsoumis, 1991 LNEC, 1997	CIRAD	CIRAD	PROTA 2008
Propriedades de Referência				
Massa volúmica (kg/m ³)	620	690		560–750
Flexão estática	Tensão rotura (MPa)	111	102	95–184
	Módulo elástico (GPa)	11,27	13,96	8,9–13,8

Da referida tabela, é possível constatar que os valores obtidos por diversos estudos para as mesmas espécies, em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, atestam a existência de uma grande proximidade entre as propriedades das duas espécies. De facto, as diferenças entre ambas não foram além dos 10% em cada uma das três propriedades, com a exceção do módulo de elasticidade na comparação do resultado obtido por Tsoumis (1991) e pelo LNEC (1997), para a Câmbala, com o valor apresentado pelo CIRAD, para a Sapelli. Neste caso a diferença situou-se em cerca de 19,3%. Porém, se se analisar o intervalo de resultados para a mesma propriedade, na espécie de Sapelli, no estudo apresentado pela PROTA (2008), o seu valor médio fica muito próximo (11,35 GPa) do valor obtido para a Câmbala (11,27 GPa). Este facto veio sustentar a opção por ambas as espécies.

Capítulo 3

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS TROPICAIS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

RESUMO: No presente capítulo são analisadas as metodologias previstas na normalização europeia para a caracterização mecânica de madeiras. É especificada a análise da classificação de madeiras tropicais e feita uma abordagem aos ensaios não-destrutivos mais relevantes, dando particular ênfase aos ensaios de ultrassons. São apresentados alguns estudos sobre a possibilidade de desenvolvimento de modelos alternativos para a caracterização mecânica de madeiras de folhosas. Por fim, é abordada a estabilidade física das madeiras, nomeadamente, a sua influência na variação dos teores em água no comportamento de elementos estruturais de madeira.

3.1 Caracterização e Classificação de madeiras

De acordo com a normalização europeia, para se poder admitir em cálculo um conjunto de valores de resistências para um determinado elemento estrutural em madeira, haverá necessidade de o identificar com uma população anteriormente caracterizada através de numerosas campanhas de ensaios. Este enquadramento é descrito na norma EN 14081-1 (CEN, 2016).

Segundo a EN 14081-1 (CEN, 2016), são definidos dois métodos para a atribuição de classes de resistência a um elemento estrutural de madeira: Classificação Visual e Classificação Mecânica. Porém, antes de se proceder à classificação do elemento de madeira, quer seja pelo processo visual, quer por máquina, tem de haver lugar à determinação das capacidades resistentes da população na qual se insere o referido elemento. Para tal, de acordo com o descrito nas secções 5.1.2 e 5.1.3 da referida norma, se à classe ou espécie, a que pertence o elemento de madeira a estudar, não estiver atribuída uma Classe de Resistência prevista na EN 338 (CEN, 2009a), os respetivos valores característicos de resistência e massa volúmica, deverão ser determinados de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2010).

3.1.1 Determinação das propriedades mecânicas da madeira

Segundo a norma EN 384 (CEN, 2010), para efeitos de determinação e atribuição de uma Classe Resistente a uma população, existe a necessidade de serem conhecidas três propriedades de referência, sendo elas: a massa volúmica, a tensão de rotura e o módulo de elasticidade, à flexão paralela à direção das fibras. A partir destas, e através de expressões matemáticas, poderão ser aferidas as restantes propriedades mecânicas. Assim sendo, o primeiro processo passa por definir a população que se pretende caracterizar.

De acordo com a EN 384 (CEN, 2010), como vimos, uma população deve ser definida através de métodos de classificação visual ou por máquina. Para os requisitos visuais, a EN 14081-1 (CEN, 2016), define, no Anexo A, os critérios a partir dos quais os países poderão elaborar as suas normas nacionais para a caracterização das suas espécies. As partes 2 e 3 da norma EN 14081, são dedicadas às características necessárias para a definição de populações, através de processos mecânicos. A EN 14081-2 (2013b) foca-se em requisitos adicionais para ensaios tipo; enquanto que a EN 14081-3 (2013c) dá relevância a requisitos adicionais para controle de produção em fábrica.

O material a ensaiar deverá ser representativo da sua população, designadamente, quanto à sua origem, dimensões e qualidade classificada na produção. Cada amostra deve ser proveniente de uma única origem e o número de provetes necessários para a determinação das resis-

tências características será definido em função do coeficiente de variação. Para o módulo de elasticidade, esse mínimo poderá baixar para os 34 provetes, enquanto que para a tensão de rotura à flexão, terá de ser sempre superior a 40 (CEN, 2010). Após a definição da população a ensaiar, das suas amostras e dos respetivos provetes, proceder-se-á às campanhas de ensaios para a determinação das propriedades de referência: massa volúmica; módulo de elasticidade à flexão; e tensão de rotura à flexão (CEN, 2010).

Para a determinação da massa volúmica da população, deverão ser determinadas as massas volúmicas dos provetes das amostras. Estas deverão ser calculadas de acordo com os procedimentos previstos na norma ISO 3131 (ISO, 1975c), tendo por referência um teor em água de 12%. Para a determinação do teor em água, a ISO 3131 (ISO, 1975c) faz referência à ISO 3130 (ISO, 1975b).

Os valores do módulo de elasticidade à flexão e da tensão de rotura à flexão, ambos na direção paralela das fibras, de acordo com a EN 384 (CEN, 2010), deverão ser determinados, seguindo os procedimentos laboratoriais descritos na norma EN 408 (CEN, 2012a). Para tal, são definidas as dimensões dos provetes, tal como as condições de ambiente para a realização dos ensaios, nomeadamente, 20 ± 2 °C de temperatura ambiente, e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa, por forma a estabilizar os elementos de madeira com um teor em água próximo dos 12%. Para além disso, no caso de provetes de pequenas dimensões, estes não deverão ser afastados das condições ambientais referidas, mais do que uma hora antes do ensaio. Ao contrário do descrito na EN 384 (CEN, 2010), a EN 408 (CEN, 2012a) indica a EN 13183-1 (CEN, 2002) para a determinação do teor em água dos provetes. No presente trabalho, optou-se manter a indicação da EN 384 (CEN, 2010), utilizando a ISO 3130 (ISO, 1975b) para a determinação do teor em água, para todas as campanhas de ensaios.

A norma EN 408 (CEN, 2012a), para provetes de dimensão estrutural, prevê a realização de ensaios à flexão estática em 4 pontos. Os provetes deverão ter um comprimento mínimo de 19 vezes a altura da secção e apoiar-se em dois pontos afastados entre si de 18 vezes a mesma altura de secção. Não sendo possível o afastamento desejado, a norma permite uma variação de 1,5 vezes a altura da secção entre o apoio e a ação da carga mais próxima. Consequentemente, o comprimento da peça e o afastamento dos apoios poderão variar no máximo até 3 vezes a altura da secção, de acordo com a Figura 3.1. O provete deverá estar simplesmente apoiado e deverão ser providenciados apoios laterais que evitem a sua torção lateral. A carga deverá ser aplicada a uma velocidade constante, inferior a 0,003 vezes a altura da secção do provete, sendo que o seu máximo não deverá exceder 40% da carga máxima estimada. Referir que os equipamentos de aplicação da carga deverão ter uma precisão de leitura de 1% da carga aplicada no provete. A deformação w deve ser medida na secção central da peça e no centro da face de tração ou compressão. Quando w é medido no eixo neutro, deverá corresponder

à média das medidas feitas em ambas as faces das peças. A precisão do equipamento de leitura da deformação deverá ser de 1%.

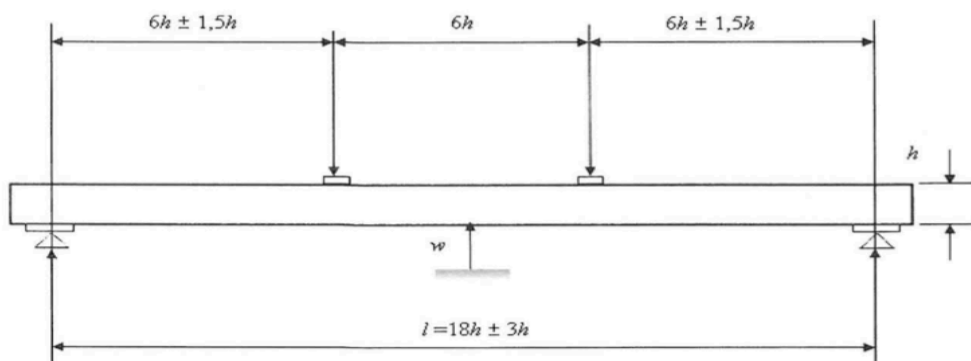


Figura 3.1: Esquema representativo do ensaio de provetes segundo a norma EN 408 (CEN, 2012a) para a determinação do módulo de elasticidade global e da tensão de rotura, em flexão.

Os resultados dos módulos de elasticidade à flexão e das correspondentes tensões de rotura, na direção das fibras, são obtidos através da relação carga-deformação, lida ao longo do ensaio. Sublinhar apenas que a norma EN 408 (CEN, 2012a) prevê a possibilidade de serem calculados dois tipos de módulos de elasticidade à flexão: o módulo de elasticidade local e o módulo de elasticidade global. Apesar de estudos da área aconselharem ao uso do módulo que mais se coadune à situação de esforço em que a peça se encontra (Solli, 2000; Nocetti et al., 2013), para efeitos de classificação das propriedades mecânicas da peça, é usado o módulo de elasticidade global, sujeito a um ajustamento de valor que inclui uma correção em relação ao módulo de elasticidade em flexão pura. As expressões correspondentes serão abordadas no Capítulo 5 do presente trabalho.

De forma a homogeneizar os resultados entre amostras de provetes de diferentes dimensões, a norma EN 384 (CEN, 2010) prevê a correção dos valores correspondentes ao percentil de 5%, para dimensões de referência, quer em termos de altura das secções, quer em termos de espaçamento entre apoios e entre os pontos de aplicação das cargas. Relativamente à homogeneização das alturas das secções dos provetes, a correção deverá ser feita para uma altura de referência de 150 mm. Esta correção realiza-se dividindo o valor obtido da tensão de rotura à flexão, para o percentil de 5% de cada amostra, pelo coeficiente k_h . Este coeficiente será determinado de acordo com a expressão 3.1.

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \quad (3.1)$$

em que h representa a altura real da secção do provete.

Relativamente aos espaçamentos entre apoios e entre os pontos de aplicação das cargas nos provetes, quando estes diferem do previsto pela norma EN 408 (CEN, 2012a), ou seja, quando

o afastamento entre apoios for diferente de 18 vezes a altura da secção e o afastamento entre os pontos de aplicação das cargas for diferente de 6 vezes a altura da secção, a norma EN 384 (CEN, 2010) prevê que o valor da tensão de rotura à flexão, para o percentil de 5% de cada amostra, seja dividido pelo coeficiente k_l , determinado de acordo com a expressão 3.2.

$$k_l = \left(\frac{48h}{l_{et}} \right)^{0,2} \quad (3.2)$$

sendo $l_{et} = l + 5a_f$, em que l representa o comprimento efetivo do provete; e a_f , o vão efetivo entre os pontos de aplicação das cargas no provete.

3.1.2 Determinação dos valores característicos para efeitos de cálculo

A normalização europeia, através da EN 384 (CEN, 2010), descreve os procedimentos necessários para a obtenção dos respetivos valores característicos para efeitos de cálculo em projeto, partindo dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade e para a tensão de rotura à flexão, segundo a direção paralela das fibras, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012a); e da determinação da massa volúmica, segundo a ISO 3131 (ISO, 1975c).

Para a determinação do valor característico da massa volúmica, deverá ser realizada a média ponderada entre os valores correspondentes ao percentil de 5% de cada amostra, após terem sido corrigidos para o teor em água de 12%. De acordo com o ponto 8 da EN 384 (CEN, 2010), os resultados das massas volúmicas de cada provete, caso não contenham um teor em água de 12%, deverão ser corrigidos para a referida percentagem, assumindo uma redução de 0,5% no resultado obtido para a respetiva massa volúmica, por cada ponto percentual acima de 12% do provete. No caso do provete conter um teor em água abaixo dos 12%, a correção far-se-á aumentando 0,5% ao resultado obtido por cada ponto percentual. Em seguida, o percentil de 5% deverá ser determinado, ordenando os provetes em função da sua massa volúmica e selecionando o resultado do ensaio para o qual apenas 5% dos resultados apresentam valor inferior ao da sua massa volúmica. Caso a amostra tenha um número de provetes diferente de um múltiplo de 20, o percentil de 5% será a média ponderada entre os resultados dos ensaios que corresponderão aos valores imediatamente acima e abaixo dos 5% dos resultados mais baixos. O valor característico para a massa volúmica deverá ser calculado através da expressão 3.3.

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05j} n_j}{\sum n_j} \quad (3.3)$$

em que ρ_k corresponde ao valor característico da massa volúmica da população; ρ_{05j} corresponde ao percentil de 5% do valor da massa volúmica da amostra j ; e, n_j corresponde ao número de provetes da amostra j .

Para a tensão de rotura à flexão, o valor característico deverá ser calculado de acordo com a expressão 3.4.

$$f_{mk} = \bar{f}_{0,5} k_s k_v \quad (3.4)$$

em que f_{mk} representa o valor característico da tensão de rotura; $\bar{f}_{0,5}$ representa a média ponderada dos valores correspondentes ao percentil 5% de cada amostra, após serem corrigidos para o teor em água de 12%; k_s , o fator corretivo do número de provetes e de amostras da população; e k_v , o fator compensador da menor variabilidade dos valores correspondentes ao percentil 5% de cada amostra, entre amostras classificadas mecanicamente por comparação com amostras classificadas visualmente.

Para o caso de $\bar{f}_{0,5}$ ser superior a 1,2 vezes ao valor mais baixo dos valores correspondentes aos percentis de 5% de todas as amostras, tornar-se-á necessário redefinir a população de referência para eliminar este valor mais baixo, ou atribuir a $\bar{f}_{0,5}$ um valor igual a 1,2 vezes o valor mais baixo dos percentis de 5% de todas as amostras.

O valor de k_s deverá ser determinado a partir da Figura 3.2, na qual a letra A representa o número de amostras e a letra B o número de provetes das amostras mais pequenas.

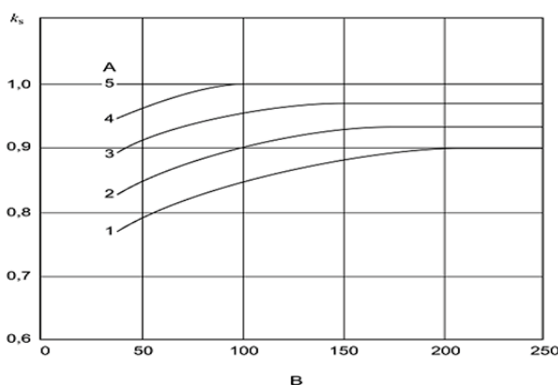


Figura 3.2: Efeito do número e do tamanho das amostras no coeficiente k_s (CEN, 2010).

Relativamente a k_v , este assumirá o valor de 1,0 para todas as classes de qualidade obtidas por classificação visual. Quando a classe de qualidade for obtida por classificação mecânica, assumirá o valor de 1,0, para um valor característico da tensão de rotura superior a 30 MPa; e 1,12 quando esse valor for igual ou inferior a 30 MPa.

Para a obtenção do valor característico do módulo de elasticidade à flexão de uma população, a norma EN 384 (CEN, 2010) determina, em primeiro lugar, a necessidade do cálculo da média do módulo de elasticidade de cada amostra, através da expressão 3.5, que inclui a correção em relação ao módulo de elasticidade em flexão pura:

$$\bar{E} = [\Sigma E_i/n]^{1,3} - 2690 \quad (3.5)$$

em que \bar{E} corresponde ao módulo de elasticidade à flexão na direção das fibras, de uma amostra; E_i , corresponde ao enésimo valor do módulo de elasticidade no domínio de 1 até n , expresso em Newton por milímetro quadrado.

Posteriormente, deverá ser aplicada a expressão 3.6:

$$E_{0,m} = \Sigma \bar{E}_j n_j / \Sigma n_j \quad (3.6)$$

em que, $E_{0,m}$, corresponde ao valor característico do módulo de elasticidade à flexão, segundo a direção das fibras, da população; n_j , corresponde ao número de provetes da amostra j ; e \bar{E}_j , corresponde à média do módulo de elasticidade para a amostra j , calculado de acordo com a expressão 3.5.

Com base nos valores característicos aferidos para uma população, é feita a correspondência a uma Classe de Resistência, de acordo com o previsto na EN 338 (CEN, 2009a).

3.1.2.1 Classes de Resistência

Por forma a facilitar o trabalho do engenheiro projetista e dos fornecedores de madeira, a normalização europeia, através da EN 338 (CEN, 2009a), define as Classes de Resistência. Através destas, as populações de madeira são agrupadas em função dos seus valores característicos, nomeadamente, massa volúmica, tensão de rotura à flexão e módulo de elasticidade à flexão. Assim, no momento da realização dos cálculos de estabilidade, o projetista limitar-se-á a definir a Classe de Resistência a que o elemento estrutural em madeira deverá pertencer.

Para a atribuição da Classe de Resistência, os valores característicos da tensão de rotura à flexão e da massa volúmica terão de ser iguais ou superiores aos definidos na respetiva Classe. Já o valor característico do módulo de elasticidade à flexão paralela às fibras, deverá ser igual ou superior a 95% do valor definido na Classe. Os restantes valores característicos das propriedades mecânicas podem ser obtidos das tabelas presentes na norma EN 338 (CEN, 2009a), ou das expressões definidas no seu Anexo A.

A norma EN 338 (CEN, 2009a) especifica os valores característicos das propriedades de cada classe, apresentando-os em duas tabelas; uma para as madeiras de resinosas e uma outra para as madeiras de folhosas. De acordo com esta norma, são consideradas 12 Classes de Resistência para as madeiras de resinosas e 8 classes para as madeiras de folhosas. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os valores característicos para as propriedades de cada Classe de Resistência das madeiras de resinosas e de folhosas, respetivamente.

Tabela 3.1: Classes de Resistência previstas pela EN 338 (CEN, 2009a) para as madeiras de resinosas.

		Espécies de Resinosas											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades de resistência (MPa)													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração paralela às fibras	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração perp. às fibras	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compr. paralela às fibras	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compr. perp. às fibras	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriedades de rigidez - Módulos de Elasticidade (GPa)													
Paralelo às fibras	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
5% Paralelo às fibras	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Perp. às fibras	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
De distorção	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volúmica (kg/m³)													
Massa volúmica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volúmica média	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabela 3.2: Classes de Resistência previstas pela EN 338 (CEN, 2009a) para as madeiras de folhosas.

		Espécies de Folhosas							
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência (MPa)									
Flexão	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela às fibras	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perp. às fibras	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compr. paralela às fibras	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compr. perp. às fibras	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez - Módulos de Elasticidade (GPa)									
Paralelo às fibras	$E_{0,mean}$	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5% Paralelo às fibras	$E_{0,05}$	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Perpe. às fibras	$E_{90,mean}$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
De distorção	G_{mean}	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Massa volúmica (kg/m³)									
Massa volúmica	ρ_k	475	485	530	540	550	620	700	900
Massa volúmica média	ρ_{mean}	570	580	640	650	660	750	840	1080

3.1.2.2 Classes de Qualidade

Sendo a madeira um material natural, está sujeita a que possam aparecer defeitos ou singularidades que podem afetar substancialmente a capacidade resistente do elemento estrutural.

Por motivos de segurança das próprias estruturas, nem todas as imperfeições ou defeitos poderão ser admitidos num elemento estrutural. Por outro lado, também existem defeitos que, dadas as suas dimensões ou localização, terão um efeito insignificante na redução da capacidade resistente do elemento. A existência de uma grande amplitude de densidades de defeitos, em determinada espécie, faz com que a condicionante dos valores característicos e consequente atribuição da Classe de Resistência, leve ao desaproveitamento do potencial das madeiras com menor incidência de defeitos, da mesma espécie. Nesse sentido, para algumas espécies, foram criadas diferentes Classes de Qualidade, de modo a quantificar e correlacionar os defeitos e imperfeições dos elementos com a redução das suas capacidades mecânicas. Este procedimento permite caracterizar determinada espécie em função dos seus defeitos e imperfeições, fazendo-lhe corresponder diferentes Classes de Qualidade, às quais são atribuídas diferentes valores característicos de resistência mecânica e, por via desse facto, diferentes Classes de Resistência.

A principal mais valia da divisão de uma espécie em diferentes Classes de Qualidade estará na possibilidade de serem atribuídas Classes de Resistência superiores a elementos em que as imperfeições tenham menor incidência. Desta forma, é possível obter-se um maior rendimento do elemento, valorizando, de uma forma geral, toda a espécie (Gominho et al., 2004; Stapel et al., 2013).

Nesse sentido, diversos países Europeus, dos quais são originárias diferentes espécies de madeiras, essencialmente de resinosas, foram estabelecendo normas nacionais de avaliação das suas espécies autóctones. As espécies foram sendo catalogadas em diferentes Classes de Qualidade que quantificam a influência dos defeitos naturais, de processamento, ou das próprias dimensões dos elementos, nas suas capacidades mecânicas

Resultado da elevada heterogeneidade entre as características das diferentes espécies de madeira e das diferenças entre as normas de classificação dos seus países de origem, tornou-se extremamente difícil definir, a nível Europeu, uma abordagem comum para os valores limite admissíveis de defeitos e singularidades. A normalização europeia prevê que a norma EN 1912 (CEN, 2012b) estabeleça a correspondência entre classificações visuais definidas em normas nacionais e as Classes de Resistência definidas na norma europeia EN 338 (CEN, 2009a). Na referida norma, estão tabeladas todas as relações entre: Classe de Resistência; as normas nacionais aplicadas, redigidas de acordo com o Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016); a Classe de Qualidade; o nome comercial da espécie; a origem; e a identificação botânica.

A título de exemplo, em Portugal existe a norma NP 4305 (1995), na qual se estabelece a classificação da madeira serrada de pinho bravo, tendo em vista a sua resistência mecânica, através de Classificação Visual. Ao fazer-se a leitura da referida norma, constata-se estarem defi-

nidas duas Classes de Qualidade: Classe E e a Classe EE. Esta separação é feita em função da existência de nós, da inclinação do fio, da taxa de crescimento, das fendas, do descaio, dos empenos, das bolsas de resina e casca inclusa e da medula. À Classe de Qualidade E estarão afetadas as madeiras de pinho bravo com menor incidência de defeitos da madeira, do que à Classe de Qualidade EE.

De referir, ainda que as atribuições de Classes de Resistência são baseadas em relatórios de classificação. Quando esses relatórios de classificação são avaliados e aprovados pelo CEN/TC124/GT2/TG1, tornam-se Approved Grading Reports (AGR). Este requisito é necessário para a atribuição de Classes de Resistência, através de classificações visuais definidas na EN 1912 (CEN, 2012b) e para o controlo da máquina de classificação.

3.1.3 Métodos de classificação de um elemento estrutural

Para uma correta atribuição da Classe de Resistência a um elemento estrutural de madeira, como referido anteriormente, a normalização europeia, através da EN 14081, prevê duas metodologias: Classificação Visual, descrito na Parte 1 as variáveis a serem controladas; ou, Classificação Mecânica, descrita nas partes 2 e 3 da mesma norma. Os procedimentos mecânicos podem ainda ser divididos em dois: controlo do produto na fabricação (output-controlled); e controlo através de ensaios mecânicos, a realizar em elementos das mais diferenciadas espécies e dimensões (machine-controlled). A Figura 3.3 apresenta o esquema de procedimentos a seguir até à atribuição da Classe de Resistência a um elemento de madeira, quer através da Classificação Visual, quer através da Classificação Mecânica.

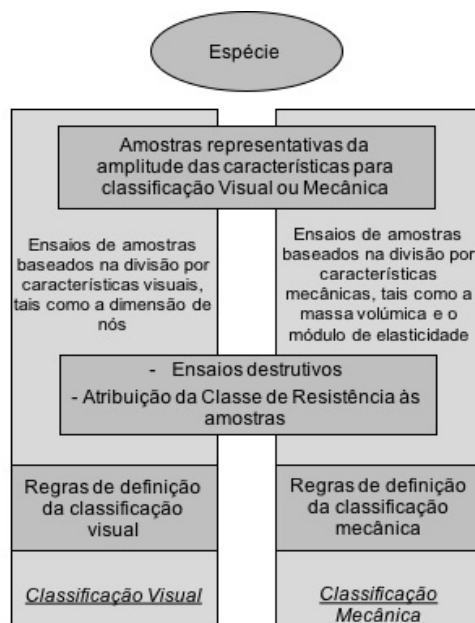


Figura 3.3: Procedimentos para à classificação de um elemento estrutural (adaptado de Ravenshorst et al., 2004).

3.1.3.1 Classificação visual

A classificação visual é o método tradicional de atribuição de uma Classe de Resistência a um elemento estrutural em madeira. É o método não destrutivo mais utilizado nos Estados Unidos e na Europa. Madsen (1992) refere que 95 a 98% de todas as madeiras utilizadas na América do Norte, é classificada por técnicas visuais.

A classificação é baseada na detecção, a olho nu, de defeitos no elemento, existindo diferentes normas em uso por toda a Europa. Este facto torna impossível a redação de uma única norma para todos os Estados-Membros.

As normas a seguir para os procedimentos de inspeção visual são desenvolvidas pelos países de origem das próprias espécies. A diversificação de normas permite atender a: diferentes espécies ou grupos de espécies; diferentes origens geográficas; diferentes requisitos de dimensões dos elementos; requisitos variáveis para diferentes utilizações; qualidade do material disponível; influências históricas e tradições.

A nível europeu, o Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016), fornece os princípios básicos que uma norma de classificação visual deve seguir na avaliação de um elemento estrutural em madeira. O referido anexo divide em quatro os campos necessários abranger: 1) limitações para as características de redução da resistência; 2) limitações para as características geométricas; 3) limitações para as características biológicas; 4) e, por fim, um último campo definido para "outras características", onde se inclui a madeira de reação, ações de compressão (no caso de madeiras de resinosas) e outras características que afetem a resistência da madeira.

No primeiro campo, destinado às limitações para as características de redução da resistência do elemento, o anexo define: a) a necessidade de ser especificado o método de medição de nós e os seus limites; b) a necessidade de definir a inclinação do fio e as suas limitações para cada classe; c) a necessidade de determinar a correspondente massa volúmica e os limites para o ritmo de crescimento da madeira; d) e, por fim, a necessidade de avaliar e medir as fissuras existentes no elemento. Para a medição dos nós, a inclinação do fio e as fissuras, o Anexo A indica os procedimentos existentes na norma EN 1310 (CEN, 1997c). Relativamente à inclinação do fio, a sua definição deverá estar de acordo com a norma EN 844-9 (CEN, 1997b). Para além disso, relativamente às fissuras, quando estas tiverem efeito sobre a resistência do elemento, concretamente na resistência ao corte numa viga, deverão ser limitadas.

Relativamente às limitações geométricas, o Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016) faz referência a: a) necessidade de definir o método de medição do descaio dos cantos da secção do elemento de madeira; b) necessidade de limitar o máximo empeno/torção, que uma peça de madeira poderá admitir, segundo os três eixos. Relativamente ao descaio dos cantos da sec-

ção, é referido que este não poderá reduzir as dimensões da secção em mais de 1/3, tendo em conta as dimensões completas da secção. Quanto ao empeno da peça, o mesmo deverá ser medido de acordo com a norma EN 1310 (CEN, 1997c). Para além disso, o Anexo A define as máximas deformações por empeno: em arco de face; em arco de canto; em hélice; e em meia-cana.

Para o terceiro campo, limitações para as características biológicas, as normas a serem desenvolvidas deverão estar em conformidade com as definições de termos relacionados com manchas e ataques fúngicos definidos na norma EN 844-10 (CEN, 1998). Naturalmente, deverão incluir requisitos que limitem a danificação dos elementos por ataques fúngicos e de insetos. Segundo o Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016), no caso dos elementos apresentarem podridões ativas, não deverão ser aceites em qualquer Classe de Resistência. No caso da podridão estar já desativa, a Classe de Resistência deverá ser de C18 ou inferior.

Quanto ao campo 4, denominado por “outras características”, é referido, no Anexo A, que as normas de classificação visual para as espécies de resinosas deverão ter em conta a compressão da madeira. Para as madeiras de folhosas, deverão atender à tensão de tração da madeira. As normas de classificação deverão estar em conformidade com os termos definidos na norma EN 844-7 (CEN, 1997a). Relativamente a outras características que afetem a resistência do elemento, tal como danos mecânicos, inchaços, etc., devem seguir-se os requisitos fornecidos no Anexo A para outras características de redução de resistência que tenham um efeito semelhante no elemento de madeira.

Seguindo os requisitos previstos no Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016), são redigidas as normas nacionais de Classificação Visual que conferem o reconhecimento de uma Classe de Resistência a um elemento de madeira pertencente a uma determinada população, anteriormente sujeita a uma bateria de ensaios, de forma a aferir as suas propriedades características.

Para além dos quatro campos abrangidos pelo Anexo A, as normas a serem desenvolvidas por cada país poderão fazer referência a novos critérios que sejam considerados relevantes, ficando essa análise ao juízo de cada país.

3.1.3.2 Classificação mecânica

No caso da classificação mecânica, como referido anteriormente, esta poderá ser feita pelo controlo do elemento de madeira à saída de uma serração (output-controlled), ou pelo controlo de máquina (machine-controlled). Apesar da classificação ser por meios mecânicos, ambos os sistemas exigem uma inspeção visual preliminar para atender às características de redução de resistência que não sejam detetadas automaticamente pela máquina.

A classificação através do controlo do elemento de madeira é apropriada para máquinas de serrações que trabalhem em linhas de produção com peças limitadas relativamente a dimensões, espécies e classes, permitindo o controlo de amostras através de testes diários em elementos. Estes testes, em conjunto com procedimentos estatísticos, são usados para monitorar e ajustar as configurações da máquina, de forma a manter as propriedades de resistência exigidas para cada Classe de Resistência. Através deste sistema, é admissível que os requisitos de aprovação das máquinas possam ser menos exigentes e com diferentes desempenhos. A EN 14081-1 (CEN, 2016) indica que este modelo de classificação deve ser utilizado quando a população a classificar provém de áreas mais pequenas ou regiões delimitadas no interior de um país.

No caso dos elementos de madeira terem uma grande variedade de dimensões, espécies e classes, a classificação, através de output-controlled, deixa de ser possível. Para estas situações, foi desenvolvido, na Europa, o modelo machine-controlled, em que a classificação mecânica se baseia na realização de ensaios diretamente nos elementos. As máquinas são minuciosamente controladas, com configurações criteriosamente estudadas e definidas, mantendo-se constantes para todas as máquinas do mesmo tipo.

Um exemplo de aplicação deste modelo de classificação, consiste no uso de máquinas que infligem uma flexão ao elemento de madeira, aferindo o seu módulo de elasticidade e correlacionando-o com a tensão de rotura à flexão a atribuir para uma Classe de Resistência. Para a classificação mecânica, parâmetros como o módulo de elasticidade e a massa volúmica são usados para a seleção das vigas (Ravenshorst et al., 2004). Através do módulo de elasticidade à flexão e da massa volúmica, são também inferidas as restantes propriedades mecânicas, nomeadamente as tensões de tração, compressão e corte. A aceitação das máquinas de classificação e as suas configurações dependem dos procedimentos estatísticos, pelo que os seus resultados vão depender do método utilizado para esse fim.

Para além das orientações previstas na EN 14081-1 (CEN, 2016), a EN 14081-2 (CEN, 2013b) especifica requisitos adicionais para os ensaios iniciais em máquinas de classificação de madeira estrutural; a EN 14081-3 (CEN, 2013c) especifica requisitos adicionais para o controlo de produção em fábrica, de máquinas de classificação de madeira estrutural.

3.2 Classificação de madeiras tropicais

Até meados da década de 70 do século passado, as normas nacionais e internacionais eram redigidas com base na caracterização mecânica de provetes de pequenas dimensões. A título de exemplo, para a determinação da tensão de rotura em flexão, era frequente a utilização da ISO 3133 de 1975. Em Portugal, era também usada a norma NP-619 de 1973. Noutras regiões, concretamente nas zonas tropicais, onde predominam as madeiras de folhosas, ainda hoje é muito utilizada a norma britânica BS 373 de 1957.

Relativamente aos procedimentos de classificação implementados pela normalização europeia para as propriedades mecânicas das madeiras, designadamente através das normas EN 14081-1 (CEN, 2016), EN 408 (CEN, 2012a) e EN 384 (CEN, 2010), como referido anteriormente, estes são redigidos, essencialmente, tendo por base as madeiras de resinosas, e com a implícita aceitação de que serão válidos para as madeiras de folhosas tropicais (Ravenshorst et al., 2004; Ravenshorst et al., 2006; Kuilen et al., 2007). No entanto, as diferenças significativas, entre as estruturas celulares dos dois grupos de madeiras, conduzem a diferentes comportamentos de resistência e de variabilidade (Kuilen et al., 2005).

O facto da atual normalização europeia prever o comportamento mecânico das madeiras através de ensaios em provetes de dimensões estruturais, tem por objetivo relevar características que têm influência significativa no comportamento dos elementos, as quais, a partir de provetes de pequenas dimensões, dificilmente seriam quantificadas. Uma dessas características está relacionada com a presença dos defeitos naturais das madeiras. Este facto tem especial relevância nas madeiras de resinosas, onde se podem encontrar com frequência.

Objetivamente, o mecanismo de rotura dos elementos em madeiras de resinosas é governado, essencialmente, pela quantidade e localização de defeitos de crescimento, tais como os nós. No caso de madeiras de folhosas, admite-se que os nós são virtualmente inexistentes, considerando-se o desvio das fibras, no sentido longitudinal dos elementos, o principal fator de rotura dos elementos (Kuilen et al., 2005). No caso de inspeção visual para este tipo de madeiras, os defeitos mais comuns e relevantes, possíveis de detetar, são pouco frequentes e de difícil avaliação.

Uma vez que, numa campanha de ensaios para aferição dos valores característicos de resistência, é definido que apenas 5% dos elementos não atinjam a Classe de Resistência atribuída, Ravensshorts et al. (2004) demonstraram que, no caso de madeiras tropicais, a divisão em Classes de Qualidade, por controlo visual ou em função do módulo de elasticidade, será economicamente inviável. Comprovando este facto, constata-se, através da consulta da EN 1912

(CEN, 2012b), a ausência de espécies de madeira tropical que possam ser enquadradas em diferentes Classes de Qualidade, ao contrário de diversas espécies de resinosas.

A Figura 3.4 apresenta a correlação típica entre o rácio de nós e a tensão de rotura à flexão, dentro da mesma espécie, quer para madeiras de resinosas, quer para madeiras de folhosas.

Os limites definidos nos eixos horizontais representam diferentes classes. Usando o requisito de que não mais de 5% dos elementos de madeira possa não atingir determinada característica resistente, os limites exatos das classes de resistência podem ser estabelecidos, dependendo dos valores da tensão de rotura, definidos nos eixos verticais. Os 5% dos resultados não atingidos apresenta-se a negro na mancha de resultados.

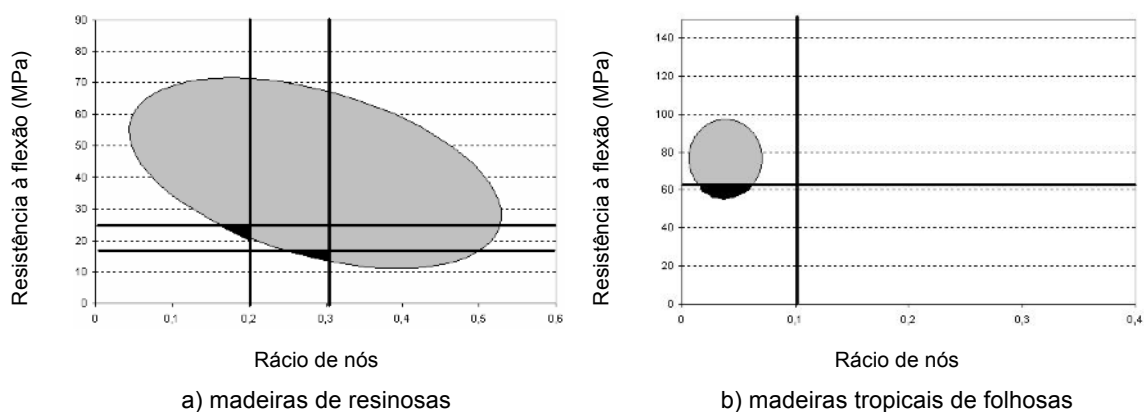


Figura 3.4: Correlação entre os rácios de nós e as tensões de rotura à flexão: a) madeiras de resinosas; b) madeiras de folhosas (Ravenshorst et al., 2004).

No mesmo estudo, Ravenshorst et al. (2004) demonstram ainda que a divisão de uma espécie tropical, em diferentes Classes de Qualidade através de procedimentos mecânicos baseados na determinação do módulo de elasticidade à flexão, é também pouco económica e eficaz.

A Figura 3.5 apresenta a correlação típica entre os módulos de elasticidade e a tensão de rotura à flexão, dentro da mesma espécie, para madeiras de resinosas e de folhosas.

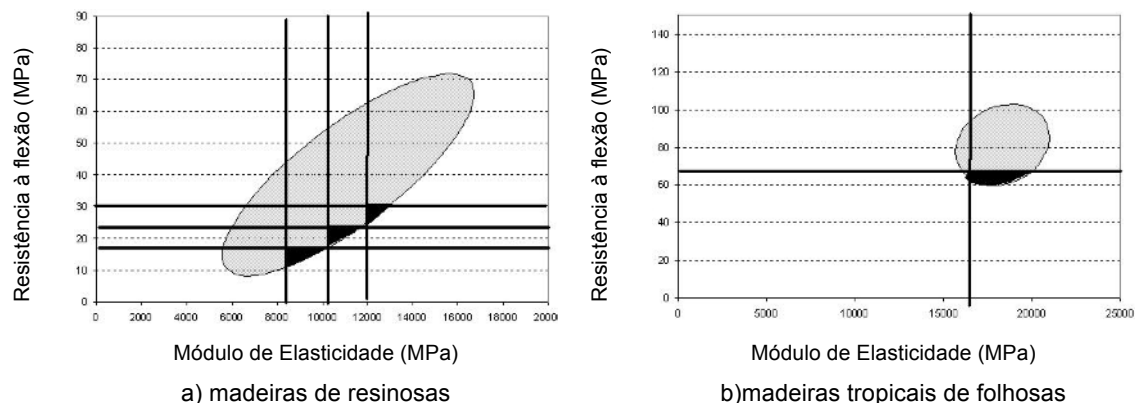


Figura 3.5: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensões de rotura à flexão:
a) madeiras de resinosas; b) madeiras de folhosas (Ravenshorst et al., 2004).

Outra característica relevante, a ser considerada pela normalização europeia para a utilização de provetes de dimensão estrutural, prende-se com a influência da variação do volume dos elementos de madeira no seu comportamento mecânico (Weibull, 1939). Diversos estudos têm sido realizados sobre este efeito mas, novamente, quase todos eles focados em madeiras de resinosas (Barrett et al., 1989; Barrett et al., 1990).

Como vimos anteriormente, a expressão 3.1 procura correlacionar os resultados das tensões de rotura à flexão para uma altura de secção de referência de 150 mm. Esta expressão, que apresenta como expoente o valor de 0,2, é baseada, essencialmente, em resultados de madeiras de resinosas. Para a madeira de azobé, Kuilen et al. (2005), obtiveram um expoente de 0,103, tendo por referência a mesma altura de secção, 150 mm. Bohannan (1966), para madeiras de folhosas, encontrou um expoente de 0,11, em madeiras isentas de defeitos, tendo por referência uma altura de secção de 200 mm, enquanto que Fewell et al. (1983), atingiram um valor de 0,4, baseado em estruturas canadianas e britânicas, de madeiras de resinosas, para a mesma altura de secção de referência, 200 mm. Estes estudos demonstram que as diferenças físicas de constituição das madeiras de resinosas e de folhosas mereciam uma análise diferenciada na definição da expressão de correção do efeito da altura da secção. Para além disso, Fruhwald et al. (2001), constataram uma maior homogeneidade de resultados para as madeiras de folhosas, obtendo valores de coeficiente de variação, geralmente compreendidos entre 15 a 20%, enquanto que para as resinosas é comum o coeficiente de variação ser acima de 20%, mesmo para situações em que o material é classificado à resistência por processos mecânicos.

No caso do módulo de elasticidade à flexão, a influência das referidas características, nomeadamente da existência de defeitos e do efeito de volume, não será tão relevante, como para a tensão de rotura à flexão. Na verdade, estudos demonstram que a diminuição de volume nos

elementos de madeira provoca apenas uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade à flexão (Ahmad et al., 2010). Quanto à tensão de rotura à flexão, esta apresenta-se como sendo uma característica extremamente sensível à existência de defeitos.

Para além destes fatores físicos, assumindo-se a normalização europeia para a classificação da resistência de uma espécie tropical, logo à partida, depara-se com a enorme dificuldade de seleção de amostras representativas de uma população. Refira-se que, uma população é baseada na espécie da madeira e na sua origem, limitada por fronteiras nacionais. É sabido que os parâmetros ambientais, tais como o solo, a sua nutrição, os microclimas e a gestão florestal têm um efeito fulcral sobre as propriedades da madeira. Por exemplo, sendo o Brasil, um país com o dobro da área da União Europeia, conseqüentemente, sujeito a inúmeras combinações de parâmetros ambientais, coloca-se a questão do quão representativos poderão ser os resultados dos ensaios das capacidades resistentes das amostras de uma determinada espécie de madeira ou seleção de madeiras deste país (Ravenshorst et al., 2013).

Relativamente à dimensão da população a analisar, concretamente o número de amostras e o número de provetes de cada amostra, o fator k_s , descrito na EN 384 (CEN, 2010), incorpora a variação esperada entre as amostras para a determinação dos valores característicos de resistência. Sublinhe-se, no entanto, o facto dos seus valores serem baseados em simulações realizadas em espécies de resinosas, suscitando a dúvida se serão os indicados para as madeiras de folhosas (Fewell et al., 1988). O fator k_s pressupõe que as amostras pertençam a uma espécie de madeira bem identificada. Esta realidade aplica-se principalmente a espécies de resinosas, mas raramente a espécies de folhosas tropicais, principalmente após serem serradas. Ravenshorst et al. (2013) questionam a possibilidade do fator k_s ser diferente para madeiras tropicais, argumentando com o facto das amostras poderem ser provenientes de uma zona geográfica mais abrangente, em que a amostra represente diferentes espécies mas o mesmo género, justificando esta opção com a dificuldade de diferenciação das espécies através duma simples análise visual.

Ainda para espécies tropicais, mas para amostras de diferentes origens, a correção do fator de k_s foi questionada por Stapel et al. (2011). O autor verificou que o tamanho da amostra e o seu número têm uma influência significativa sobre os valores da resistência característicos que são atribuídos a determinadas espécies e classes. Demonstrou o quão relevante é a seleção da amostra na determinação dos valores característicos, ao afetar o coeficiente k_s . Stapel et al. (2011) apresentaram, ainda, que o número mínimo admissível de 40 provetes por amostra, de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2010), para valores característicos de resistência, é claramente pequeno demais para representar a qualidade de uma espécie de madeira, incluindo a sua origem.

A classificação de uma espécie só poderá acontecer se houver uma correta identificação da mesma. Atualmente, a identificação da espécie é um processo complexo, sendo, que por vezes, se torna impossível de realizar devido às características anatómicas da madeira não serem suficientemente diferenciáveis a olho nu, ou por exigirem conhecimentos que no local de abate da árvore não existem, fator muito relevante e comum, em especial nas madeiras tropicais (Gard et al., 2013). Após o abate da árvore, o tronco é transportado para uma área dispersa, ou diretamente para uma serração, onde a primeira transformação tem lugar. Normalmente, diferentes espécies de madeira de diversas origens são processadas na mesma estação de trabalho. Nesta fase, é possível que determinada espécie de madeira seja misturada com outras espécies de características visuais aproximadas. É-lhe ainda atribuído um nome comercial que é usado nas etapas transacionais até à sua chegada à Europa.

Diversas tentativas têm sido realizadas com o intuito de inventariar, em normas, os nomes comuns comerciais com os respetivos nomes científicos. Atualmente, a norma EN 13556 (CEN, 2003) é exemplo disso mesmo. Porém, devido à dinâmica comercial do sector, que constantemente vai alterando a designação das madeiras comercializadas e misturando várias espécies debaixo do mesmo nome, as listagens acabam por ter uma validade muito limitada (Gard et al., 2013). Recentemente, têm surgido métodos sofisticados de identificação das espécies e sistemas de rastreamento baseados no ADN das madeiras (Höltken et al., 2012). Atualmente, as dificuldades em se proceder a uma diferenciação e identificação fiável das espécies tropicais leva a que alguns investigadores optem por desenvolver estudos de caracterização de madeiras baseadas no género, onde se incluem várias espécies fisicamente semelhantes. Um desses estudos foi desenvolvido por Ravenshorst et al. (2004), que será analisado na secção 3.3.3.

A elevada diversidade de espécies primárias nas florestas tropicais, facto abordado nas secções 2.1 e 2.2 do presente trabalho; as dificuldades de acesso para o reconhecimento das próprias florestas, cujas grandes percentagens de área permanecem virgens até aos dias de hoje (nomeadamente nas florestas da África Central, local de proveniência das espécies estudadas); passando pelas quantidades de madeira necessárias para se recolherem amostras significativas da representatividade para campanhas de ensaios; fazem com que, nos dias de hoje, se torne praticamente inviável ir ao encontro dos requisitos da normalização europeia de seleção de amostras de uma população de determinada espécie primária tropical.

Países como o Reino Unido, França e Holanda fazem uma forte aplicação da madeira tropical em estruturas marítimas e em outras estruturas expostas às condicionantes climatéricas adversas, onde se apela à superior durabilidade das madeiras tropicais, comparativamente com as resinosas. Consequentemente, estes países acabaram por desenvolver os seus próprios regulamentos de classificação visual de madeiras de folhosas, incluindo madeiras tropicais, basea-

dos essencialmente na experiência do seu uso (Gard et al., 2013). Respetivamente, foram desenvolvidas as normas BS 5756 (2007), NF B 52-001-1 (2011) e NEN 5493 (2011), normas essas elaboradas a partir dos requisitos base da norma europeia EN 14081-1 (CEN, 2016) e com os métodos de medição preconizados na EN 1310 (CEN, 1997c), com exceção de critérios para a massa volúmica e taxas de crescimento, essencialmente, porque em madeiras tropicais os anéis de crescimento são difíceis de distinguir e a massa volúmica não será propriamente uma característica visível.

Sendo normas que se baseiam na medição e quantificação das mesmas características visuais, as diferenças entre elas acabam por residir nos limites admissíveis para cada característica. Para além disso, enquanto que as normas britânica e francesa se resumem a avaliar a capacidade resistente da madeira, no caso da norma holandesa, a atribuição da respetiva classificação virá também em função do destino de aplicação desta.

Observando a norma EN 1912 (CEN, 2012b), constata-se que existem apenas 23 espécies tropicais, a que são atribuídas Classes de Resistência por meio de procedimentos visuais. Destas, 13 são baseadas na norma britânica, 5 na norma francesa e 5 na norma holandesa. Referir ainda que 7 espécies são do continente africano, onde se incluem a Câmbala e a Sapelli.

Segundo as três normas, as origens das espécies classificadas estendem-se por vastos territórios subcontinentais, com todas as condicionantes ambientais díspares subjacentes, e que têm implicação direta na heterogeneidade física e mecânica de cada espécie. Em especial, sobre a Câmbala, Ouinsavia et al. (2010) demonstraram que a vastidão da área geográfica, pela qual se dissemina a espécie, tem implicações nas diversas alterações genéticas e morfológicas, levando a concluir a enorme necessidade em se melhorar a forma de delimitação da área das populações a caracterizar e dos procedimentos de controlo sobre a origem da madeira.

As três normas nacionais limitam-se a definir os valores admissíveis para as medições e quantificações de defeitos visuais para atribuição da respetiva Classe de Resistência, alterando muito pouco as técnicas de medição. Consequência direta desta metodologia é a sua aplicabilidade a uma ampla gama de situações, não considerando adaptações a espécies e a condições particulares (Arriaga et al., 2006).

A Tabela 3.3, apresenta um resumo dos limites admissíveis para os defeitos das madeiras tropicais, segundo cada uma das três normas.

Tabela 3.3: Características a avaliar e respectivos limites atribuídos pelas normas de classificação visual britânica (BS 5756, 2007), francesa (NF B 52-001-1, 2011) e holandesa (NEN 5493, 2011) (adaptado de Gard et al., 2013).

País	Reino Unido	França	Holanda
Norma	BS 5767:2007+A1:2011	NF B 52-001-1:2011	NEN 5493+C1:2011
Aplicação geral	Folhosas tropicais e de climas temperados	Resinosas, Francesas e folhosas tropicais	Europeias e folhosas (sub)tropicais
Seleção das características importantes			
Nós	limite < 0,25	limite < 0,25	limite ≤ 0,2
Inclinação do fio	<1:11, entre nós <1:4	Guiana Francesa <1:7 Todas as folhosas <1:10, local <1:4	≤ 1:10
Descaios	As dimensões totais dos topos e das faces não devem ser reduzidas para menos de 2/3 das dimensões da peça. O comprimento do descaio é ilimitado.	<u>Guiana Francesa:</u> < 10% na espessura; <u>Outras madeiras de folhosas tropicais:</u> Ver BS 5756	Não permitidos
Fissuras	<u>Sem ser através da espessura:</u> Não superior a 1 m ou 1/4 do comprimento da peça, o que for menor; <u>Através da espessura:</u> Só permitido nos topos com um comprimento inferior à largura da peça.	Ver BS 5767	Permitidas pequenas fissuras de superfície; Permitidas no local das extremidades chanfradas; Permitidas pequenas fissuras e divididas
Coração encravado	Não permitido se a espessura da peça for de 100 mm ou menos, ou se a largura for de 225 mm ou menos.	Sem observação	Não permitida se a dimensão for menor do que 250 mm x 300 mm.
Brittleheart	Não permitido	Não permitido	Não permitido
Lenho de tensão	Sem observação	Não permitido	Sem observação
Alburno	Sem observação	<u>Guiana Francesa:</u> uma superfície e topo: <50% da espessura, <50% da largura. <u>Todas as outras madeiras de folhosas tropicais:</u> sem observações.	Não permitido
Empenos			
em arco de face	< 10mm em comp. sup. a 2 m	Ver BS 5767	< 4mm em comp. sup. a 2 m
em arco de canto	< 8mm em comp. sup. a 2 m		< 2mm em comp. sup. a 2 m
em hélice	< 1mm por largura de 25 mm, em comp. sup. a 2 m		< 2mm por largura de 25 mm, em comp. sup. a 2 m
em meia-cana	Sem limite		2mm/10mm largura
Casca inclusa	Restrição menor	Sem observação	Não permitido

De forma resumida, pode afirmar-se existirem dois aspetos fundamentais na definição da população da espécie tropical a caracterizar, segundo a normalização europeia, que requerem uma reflexão mais profunda, a saber: 1) a necessidade de se desenvolverem procedimentos que garantam, com eficácia, a determinação e reconhecimento das espécies com que se está a trabalhar; 2) a definição de novos modelos de delimitação da origem das respetivas populações.

Numa segunda fase, atendendo às diferenças físicas entre as madeiras de resinosas e de folhosas, que no caso das primeiras levou a que a normalização europeia baseasse a metodologia de caracterização em ensaios de provetes de dimensão estrutural, torna-se menos evidente o detrimento do uso de provetes de pequenas dimensões para madeiras de folhosas. Refira-se, nomeadamente, os aspetos relativos ao efeito de volume e à presença de defeitos naturais nestas madeiras. Para além disso, resultados recentes de ensaios em provetes de dimensão estrutural, acabam por não coincidir com as classes atribuídas pela norma EN 1912 (CEN, 2012b) (Gard et al., 2013). Este facto, levanta a questão se a exigência de uma vasta campanha de ensaios, em provetes de dimensões estruturais, conduzirá a reais vantagens para as madeiras de folhosas tropicais.

Nesse sentido, têm surgido alguns estudos que procuram estabelecer coeficientes de correlação entre os resultados dos provetes de dimensão estrutural com os de pequenas dimensões isentos de defeitos. A própria norma EN 384 (CEN, 2010) apresenta um procedimento alternativo para a caracterização de espécies de folhosas, partindo do conhecimento de resultados provenientes de ensaios em provetes de dimensão estrutural e de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Outros estudos que serão abordados na secção 3.3.3 da presente tese, têm procurado aferir os valores característicos de resistência das espécies através de procedimentos não destrutivos, designadamente através das suas correlações com o módulo de elasticidade dinâmico.

3.2.1 Procedimento alternativo previsto na EN 384 (CEN, 2010)

Para a determinação das propriedades mecânicas em madeiras de folhosas, não sendo possível a realização de ensaios em provetes de dimensão estrutural, a EN 384 (CEN, 2010) prevê um procedimento alternativo baseado em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. A norma descreve a aplicação de coeficientes para determinar os valores característicos da resistência à flexão e do módulo de elasticidade. Estes coeficientes deverão ser determinados a partir de pelo menos 3 espécies semelhantes, em que estejam disponíveis resultados de ensaios obtidos em provetes de pequenas dimensões sem defeitos e em provetes de dimensão estrutural. Os coeficientes serão determinados a partir da relação entre os valores característicos obtidos dos provetes de dimensão estrutural e os valores médios dos provetes de pequenas dimensões. Posteriormente, os coeficientes determinados serão aplicados aos valores médios obtidos para a espécie em análise, resultantes dos ensaios em provetes de pequenas dimensões. Sublinha-se a necessidade do número de provetes de uma amostra ser de pelo menos 40 e provenientes de pelo menos 5 árvores diferentes. Note-se que, em momento algum, a norma EN 384 (CEN, 2010) define objetivamente o conceito de espécie semelhante. É mencionado que a semelhança se deva refletir na amplitude de diminuição das características resistentes e na massa volúmica.

Desta forma, conclui-se, que a norma EN 384 (CEN, 2010) apenas impõe como condição que a espécie a ser classificada apresente uma massa volúmica semelhante à das três outras espécies, para as quais já existam campanhas de ensaios em provetes de dimensão estrutural e em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Nada é referido sobre a necessidade de pertencerem ao mesmo género.

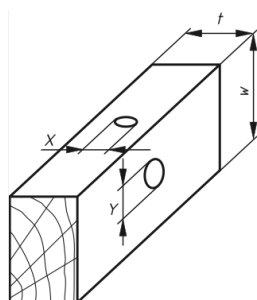
Com relativa facilidade, poderemos encontrar grupos de espécies com massas volúmicas semelhantes, mas com capacidades resistentes bem diferentes. Em alguns casos, especificamente em madeiras tropicais, dependendo da sua origem, foram já demonstradas variações significativas das propriedades mecânicas, dentro da mesma espécie. Assim sendo, fica a dúvida em se saber a partir de que grupo de espécies se deverão definir os coeficientes a aplicar na nova espécie a ser classificada. Para além disso, como veremos na secção 3.3.3 do presente capítulo, Ravenshorst et al. (2010) apresentaram resultados de campanhas de ensaios sobre as mesmas espécies, mas de proveniências distintas (Brasil e Peru), em que os resultados dos ensaios em provetes de pequenas dimensões, eram muito semelhantes, mas que as tensões de rotura da espécie de uma origem chegavam a ser mais de 40% superiores às da outra origem. Segundo a atual proposta de modelo alternativo da EN 384 (CEN, 2010), este facto nunca será detetado, tendo implicações diretas do lado da segurança das estruturas, e do lado do desaproveitamento do material. Posto isto, coloca-se a questão de até que ponto as considerações feitas pela norma EN 384 (CEN, 2010), para a aplicação do procedimento alternativo, serão uma opção viável.

3.2.2 A Classificação Visual segundo a BS 5756 (2007)

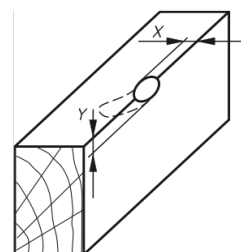
Como referido na secção 3.1.3.1 da presente tese, a norma EN 1310 (CEN, 1997c), na descrição do seu âmbito, refere que a mesma não tem aplicação direta a madeiras tropicais. Apesar disso, através do uso de normas nacionais para a classificação de madeiras tropicais, frequentemente, são mencionadas as técnicas definidas na EN 1310 (CEN, 1997c) como métodos adequados para a avaliação e medição de características visuais das madeiras. Exemplo disso são as enumeras referências descritas na norma BS 5756 (2007) aos métodos descritos na EN 1310 (CEN, 1997c), como forma de avaliar algumas das características visuais.

Como referido na secção anterior, mais de metade das classificações, reconhecidas na normalização europeia, para madeiras de folhosas tropicais, através da EN 1912 (CEN, 2012b), são realizadas através da norma britânica. Nesse sentido, procurar-se-á fazer uma análise dos critérios seguidos pela BS 5756 (2007), em função do definido no Anexo A do EN 14081-1 (CEN, 2016).

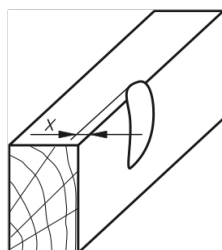
Começando pelas limitações para as características de redução da resistência, segundo a norma BS 5756 (2007), a dimensão de um nó deve corresponder à distância entre duas linhas paralelas à aresta, que contenham e toquem no contorno do nó, de acordo com a Figura 3.6 a), com a exceção dos nós que podem ser vistos em mais do que uma face. Se o nó se localizar sobre uma aresta e nenhuma das seções expostas for definitivamente mais alongada, tal como exemplificado na Figura 3.6 b), o nó deve ser medido em ambas as faces, assumindo por dimensão o maior valor entre a distância da aresta às linhas paralelas no limite do nó em ambas as faces. Esta medida deve ser relacionada com a largura da face do elemento. No caso do nó estar em duas faces, mas em que numa delas o corte se apresenta ao longo do nó, de acordo com as Figuras 3.6 c) e d), a sua dimensão deve corresponder à dimensão do nó na face em que o nó não se alonga, relacionando-o com a largura da face do elemento.



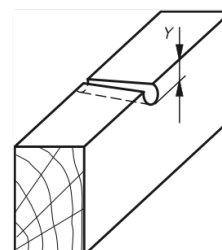
a) X é medido e relacionado com a largura da sua face, t .
Y é medido e relacionado com a largura da sua face, W



b) X e Y são medidos. O maior entre os dois é relacionado com a largura da sua face



c) X é medido e relacionado com a largura da sua face



d) y é medido e relacionado com a largura da sua face

Figura 3.6: Método de medição de nós, de acordo com a BS 5756, 2007.

Relativamente à inclinação do fio, esta deve ser medida em relação ao eixo longitudinal da peça. Deve ser medido a uma distância suficientemente grande para determinar a inclinação geral, menosprezando os desvios locais. A norma BS 5756 (2007) refere a secção 4.4.1 da norma EN 1310 (CEN, 1997c), como método de medição. Nesse sentido, é indicado a utilização de um riscador para marcar a direção das fibras. O resultado será expresso em percentagem, segundo a expressão 3.7.

$$x/y \quad (3.7)$$

em que x corresponde ao desvio do fio; e y corresponde ao comprimento sobre o qual o desvio é medido.

A Figuras 3.7, apresenta um riscador e o método de medição da inclinação das fibras após marcação da face do elemento.

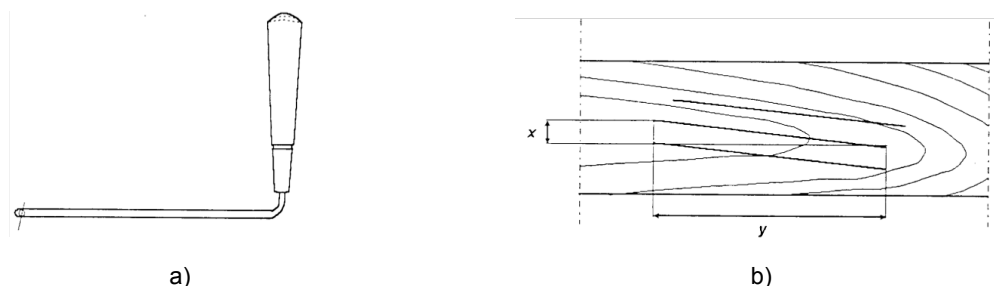


Figura 3.7: a) Desenho de um riscador; b) Medição da inclinação das fibras (CEN, 1997c).

Para as fendas, a BS 5756 (2007) indica a secção 4.9.1 da norma EN 1310 (CEN, 1997c) como método de medição. Dependendo da regra de classificação, ou seja, se a existência da fenda influenciar o comportamento da peça, a avaliação desta consistirá em medir o seu comprimento, determinando a distância entre duas linhas normais ao eixo longitudinal da peça e passando pelas extremidades da fenda. Para um aglomerado de fendas, deve medir-se o comprimento total das fendas. No caso de não ter qualquer tipo de influência, apenas se deve registar a existência da fenda, sem necessidade de a medir. Os limites máximos admissíveis estão referidos na Tabela 3.4, de acordo com o definido no Anexo A da EN14081-1 (CEN, 2016).

Tabela 3.4: Máximos admissíveis no comprimento de fissuras num elemento de madeira^a
(adaptado da CEN, 2016)

Tipo de empeno	Comprimento máximo permitido correspondente à Classe de Resistência	
	C18 ^b e abaixo	acima de C18 ^b
Fissura que não vão para além da espessura	Fissuras com profundidades inferior a metade da espessura da peça, podem ser ignoradas	
	Menor entre 1,5 m ou 1/2 do comprimento da peça	Menor entre 1 m ou 1/4 do comprimento da peça
Fissura que vão para além da espessura	Menor entre 1 m ou 1/4 do comprimento da peça. Se nos topos, o comprimento não for superior a duas vezes a espessura da peça	Só permitido nos topos das peças com um comprimento não superior à espessura.
Nota: O comprimento das fendas está relacionado com o teor em água, por isso, os limites referidos só são aplicáveis no momento da classificação		
^a Limites permitidos para a profundidade e o comprimento das fissuras, relativos à soma cumulativa das fissuras num plano e num elemento de madeira		
^b De acordo com a EN 338		

Ainda dentro do campo das limitações para as características de redução da resistência, a BS 5756 (2007) define a necessidade de se analisar a possível existência de pequenos nós denominados por “*coração frágil*”, em inglês *brittleheart*. Este tipo de defeito pode ser detectado por uma aparência esburacada nas extremidades da peça,. Em geral, aparece como vincos de compressão e muitas vezes é associado a uma massa volúmica anormalmente baixa. Se se suspeitar da presença de *brittleheart*, a peça deve ser rejeitada, mesmo que o defeito não seja evidente nas extremidades.

Relativamente às limitações geométricas, descaio da secção e empenos do elemento, observando a norma BS 5756 (2007) para madeiras tropicais, o descaio dos cantos das secções deverá ser controlado através de: a) rácio entre a altura completa da secção em relação à sua redução; b) rácio entre a largura completa da secção relativamente à sua redução. Os rácios são calculados de acordo com as expressões 3.8 e 3.9.

$$(h - V_1)/h \text{ ou } (h - V_2 - V_3)/h \quad (3.8)$$

$$(b - K_1)/b \text{ ou } (b - K_2 - K_3)/b \quad (3.9)$$

em que, h , b , V_1 a V_3 e K_1 a K_3 são representados na Figura 3.8.

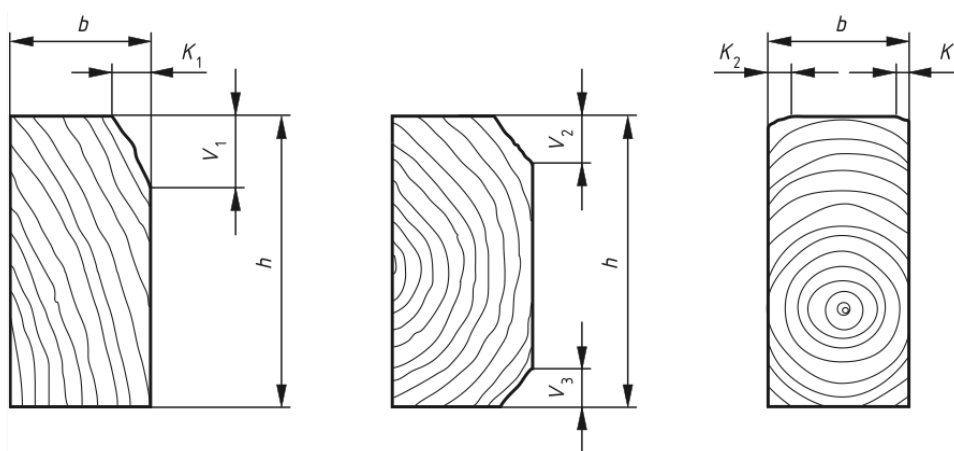


Figura 3.8: Esquema de medição dos descaios de uma secção (BS 5767, 2013).

De acordo com o referido no Anexo A e repetido na BS 5756 (2007), estes rácios terão de ser superiores a 2/3 das dimensões respetivas da secção completa.

Sobre os empenos da peça, a BS 5756 (2007) refere que estes devem ser avaliados em comprimentos superiores a 2 metros e que o empeno em arco de canto, para secções quadradas, deve ser limitado aos mesmos valores usados para o empeno em arco de face. É referido que as medições deverão ser executadas conforme o descrito nas secções 4.10.1 e 4.10.3 da EN 1310 (CEN, 1997c). Assim, para a medição do empeno de arco de face, de arco de canto e de

hélice, para peças com mais de 2 metros de comprimento, os valores respetivos serão os medidos em w , x e y , de acordo com a Figura 3.9, usando uma régua rígida de apoio, com 2 metros de comprimento para os empenos de arco de face e de canto.

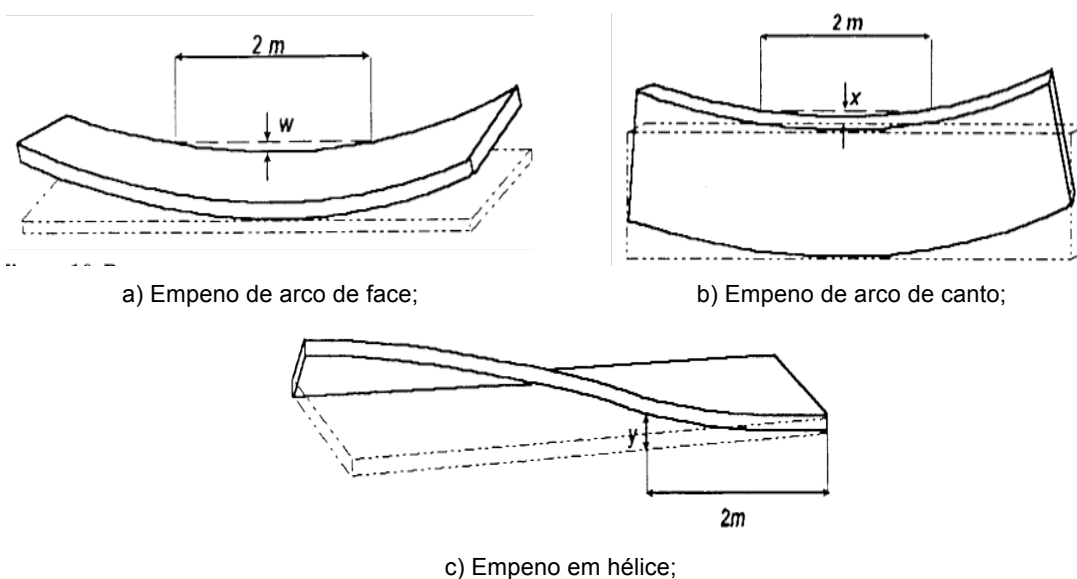


Figura 3.9: Métodos de medição de empenos (BS 5756, 2007):

Os valores máximos admissíveis para w , x e y , são tabelados no Anexo A da EN 14081-1 (CEN, 2016) e que aqui se apresentam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores máximos admissíveis para o empeno em peças com mais de 2 metros de comprimento^a (adaptado de CEN, 2016).

Tipo de empeno	Valor máximo admissível para a respetiva Classe de Resistência	
	C18 ^b e abaixo	acima de C18 ^b
arco de face (mm)	20	10
arco de canto (mm)	12	8
Hélice (mm)	2 mm / 25 mm espessura	2 mm / 25 mm espessura

^a Para a empenos em peças de outros comprimentos, os requisitos devem ser ajustados *pro-rata*.
^b Segundo a EN 338

Referir, apenas, que os valores apresentados na Tabela 3.5, são os valores máximos admissíveis a serem definidos pelas normas nacionais. Para além dos valores EN 14081-1 (CEN, 2016), a própria BS 5756 (2007) apresenta os seus limites admissíveis para a classificação visual de madeiras tropicais de folhosas, tal como a NF B 52-001-1, 2011 e a NEN 5493, 2011 (normas francesa e holandesa, respetivamente), os quais são apresentados na Tabela 3.3 do presente capítulo.

3.3 Estudos sobre métodos alternativos para a caracterização de madeiras tropicais

3.3.1 Abordagem genérica aos ensaios não destrutivos

Nesta secção, são abordados os métodos não destrutivos (em inglês, non-destructive tests – NDT) para a avaliação das capacidades resistentes da madeira. Estes métodos focam-se na análise da existência de defeitos ou descontinuidades redutoras das capacidades resistentes do elemento de madeira, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir no uso posterior da peça analisada (ABENDE, 2006).

Para o aumento do nível de confiança da análise de um elemento, os métodos não destrutivos acabam por ser usados em simultâneo. Normalmente, a inspeção/classificação visual acaba por ser complementada com outros métodos não destrutivos.

Quando se abordam os NDT, é comum separá-los em dois grupos: métodos globais (GTM – Global Test Method) e métodos locais (LTM – Local Test Method) (Feio, 2005). A diferença entre os dois grupos prende-se com o alcance da leitura de cada método. Os GTM são métodos de análise do elemento em todo o seu comprimento. Um exemplo desses métodos e no qual incide o nosso estudo, é o método de ultrassons. Os LTM são métodos de análise local/pontual de determinada área do elemento. Estes métodos ajudam a determinar as propriedades do elemento dentro, de um intervalo considerado. A título de exemplo de métodos LTM, existe o Pilodyn® e o Resistógrafo® (Feio, 2005) (Oliveira, 2012).

De uma forma geral, são vários os métodos não destrutivos utilizados nas madeiras. Em seguida, são enumerados alguns dos mais comuns e relevantes, fazendo uma breve alusão aos seus fundamentos teóricos.

Método do Resistógrafo®: consiste num equipamento que mede a resistência da madeira à perfuração de uma agulha, com comprimento a variar entre os 280 e os 950 mm e de diâmetro médio de 1,5 mm. É um método muito utilizado em estruturas em serviço, uma vez que o seu efeito de perfuração é quase imperceptível, sem qualquer influência nas capacidades resistentes da peça. O equipamento perfura o elemento na direção transversal e, através da energia libertada, permite relacionar-se com a massa volúmica da peça, detetando anéis de crescimento e qualquer degradação existente no perfil radial do elemento perfurado. Para além da massa volúmica, a resistência à perfuração permite ainda extrapolar o módulo de elasticidade à flexão e à tensão de rotura, ambos na direção do fio. A Figura 3.10, apresenta um modelo de Resistógrafo® e a saída de resultados de um ensaio tipo.

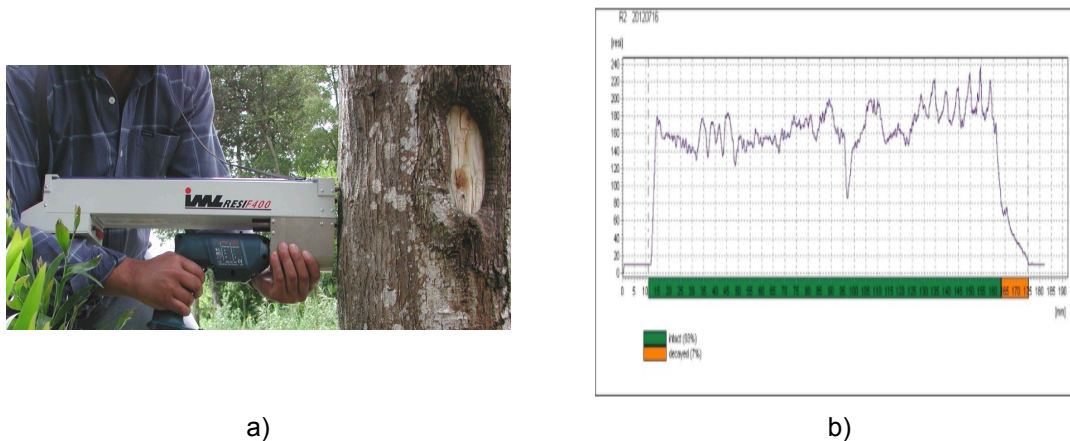


Figura 3.10: a) Equipamento Resistógrafo (Árvores & Pessoas, 2015) ; b)Gráfico obtido com Resistógrafo (NCREP, 2012):

Método do Georradar: consiste numa técnica geofísica de alta resolução, em que são emitidas e propagadas ondas eletromagnéticas, por impulsos de curta duração de banda de frequências UHF-VHF, posteriormente captadas por antenas. É constituído por uma unidade central e monitor, antenas e outros acessórios. É na recepção das ondas, por parte das antenas, que se captam as diferenças de energia electromagnética e que servem para distinguir os meios que as ondas atravessam, provocando efeitos de reflexão, refração e difração. O Georradar imprime um radargrama onde ficam registados os percursos das ondas, em função da variação dos parâmetros magnéticos. Para a interpretação correta do radargrama, é necessário conhecer previamente as características eléctricas dos materiais que constituem o meio (Júnior, 2006). Deste modo, é possível caracterizar o elemento de madeira. A Figura 3.11, apresenta um exemplo de uma listagem de resultados de um ensaio com georradar, o radargrama.

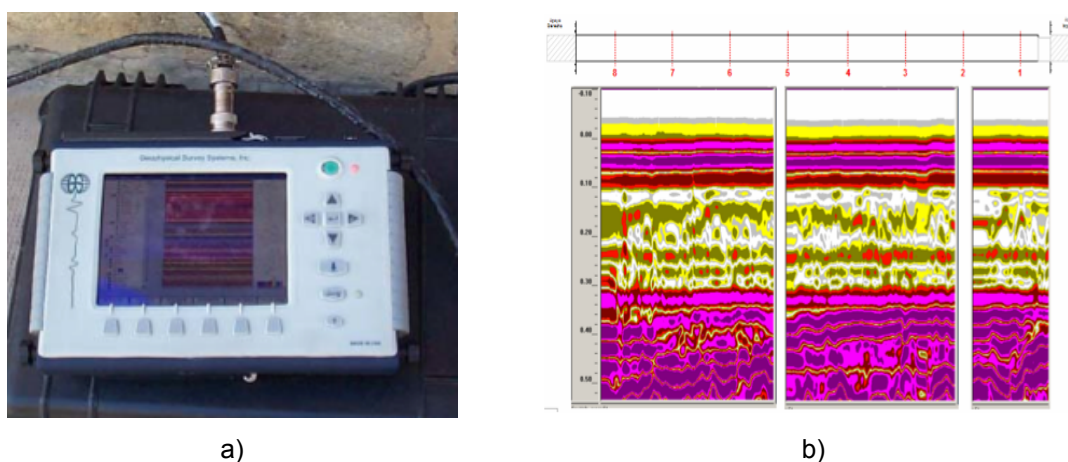


Figura 3.11: a) Equipamento de Georradar; b) Exemplo de um radargrama (Júnior, 2006).

Método das vibrações induzidas: é um método muito similar ao método de ultrassons, residindo a sua diferença no tipo de onda emitida. Ao contrário do método de ultrassons que, como o próprio nome indica, nos diz que as ondas emitidas são ultrassónicas, neste método são provocadas ondas de impacto que vão percorrer todo o elemento. A velocidade de propagação da onda de vibração permitirá correlacionar com a massa volúmica e o módulo de elasticidade do elemento. Uma vez que as ondas de vibração se propagam mais facilmente sobre superfícies compactas e homogéneas, como serão o caso das fibras da madeira, é também muito eficaz na detecção de zonas danificadas por podridões, vazios, ou outros defeitos interiores. Este método é constituído por: um martelo de impacto, que irá provocar as ondas de vibração no elemento; 1 ou 2 acelerómetros, que servirão de receptores das ondas; e uma unidade central, que fará o tratamento dos dados recolhidos. A Figura 3.12 apresenta um esquema simplificado da aplicação do método.

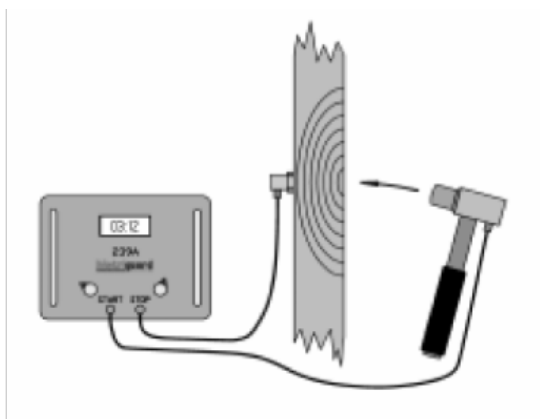


Figura 3:12: Esquema de funcionamento do método das vibrações induzidas (Júnior, 2006).

Método do Pylodin: é um método local, em que é analisada a dureza da superfície do elemento de madeira, correlacionada com a massa volúmica da peça. O Pylodin é um aparelho cilíndrico que tem, no seu interior, um pino metálico com diâmetro de 2,5 mm. O aparelho vai provocar um impacto do pino na superfície da madeira, através de uma mola comprimida que, após libertada, empurrará o pino metálico, permitindo a correlação entre a energia potencial da mola e a profundidade de penetração do pino na superfície. A partir da correlação, é estimada a dureza da superfície na secção transversal, com a sua massa volúmica. Apesar de ser um método muito conhecido, Bonamini et al. (1992), referem tratar-se de um método, cujas correlações para a obtenção da resistência da madeira são pouco significativas. A Figura 3.13 apresenta um exemplo do aparelho de Pylodin.



Figura 3.13: Exemplo de um aparelho Pilodyn (Importécnica, 2015).

Método de Raios-X: permite a visualização da secção do elemento de madeira, tal como o nome do método indica, ao emitir ondas de raios-x. Ao atravessar materiais de diferentes densidades, os raios-x são condicionados no seu percurso, originando uma imagem com diferentes tonalidades. O facto deste processo ser de elevado custo e as emissões das radiações serem perigosas para a saúde humana, os raios-x foram sendo substituídos por raios-gama. Através do uso de raios-gama, é possível baixar o custo do ensaio, evitar o perigo de exposição aos raios-x e, para além disto, obter imagens em tempo real (Júnior, 2006). A Figura 3.14, apresenta um equipamento para ensaios pelo método dos raios-x e o resultado de um ensaio de raios-gama.

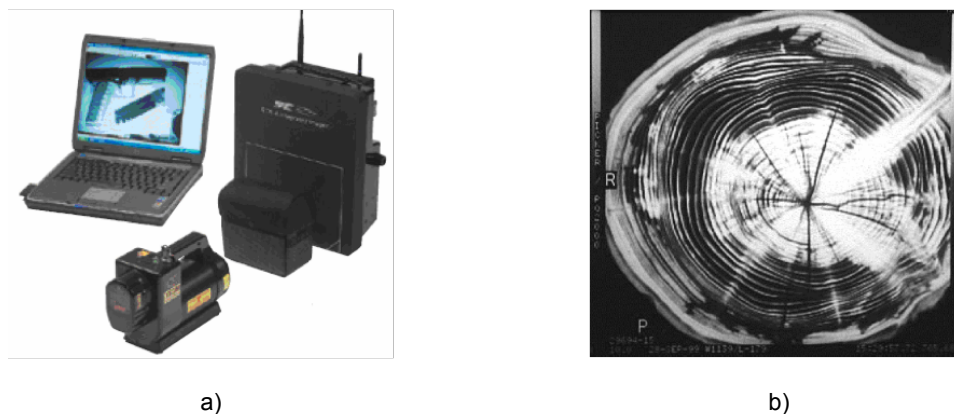


Figura 3.14: a) Equipamento para ensaios de raio-x; b) Imagem de um ensaio por raios-gama (Júnior, 2006).

Existem ainda algumas nuances das metodologias apresentadas, mas que acabam por assentar nas mesmas bases teóricas. Machado (2003), apresenta uma resumo das técnicas de ensaios não destrutivas relacionando: método de medição de cada técnica; propriedades da madeira a estimar; meios disponíveis para apoiar a realização do ensaio; e respetivas referências bibliográficas. A Tabela 3.6, apresenta o referido quadro, adaptado do trabalho de Machado (2003).

Tabela 3.6: Resumo dos métodos de ensaio não destrutivos para inspeção de estruturas de madeira (adaptado de Machado, 2003).

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

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

Júnior (2006), apresenta ainda um novo resumo, em função do critério de escolha do método de ensaio não-destrutivo, tendo em conta o objetivo da inspeção. A Tabela 3.7, reflete essa mesma análise.

Tabela 3.7: Critério de escolha da técnica não-destrutiva a utilizar, em função do objetivo de inspeção (Júnior, 2006).

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

3.3.2 Método dos Ultrassons

Uma vez que o método de ultrassons teve um papel central no desenvolvimento das campanhas de ensaios da presente tese, considerou-se relevante fazer-se uma análise mais aprofundada e independente dos restantes métodos não destrutivos.

Essencialmente, o método consiste na emissão de ondas ultrassónicas, ao longo de um dos eixos: radial, longitudinal ou tangencial. Quando a emissão da onda do ultrassom é direcionada ao longo do eixo longitudinal da peça, o método permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico do elemento. Para tal, é necessário determinar a velocidade de propagação da onda sónica e conjugá-la com a massa volúmica da peça, através da expressão 3.8.

$$E_{din} = v^2 * \rho \quad (3.8)$$

em que E_{din} corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico; v^2 corresponde à velocidade de propagação da onda ultrassónica; e ρ corresponde à massa volúmica do elemento.

Permite, também, aferir da existência de nós, ataques fúngicos ou insetos; o direccionamento das fibras, e a possível decomposição da madeira; e estimar o módulo de elasticidade e a tensão de rotura à flexão, na direcção das fibras (Gorniak et al., 2000). Comparativamente com outros ensaios não destrutivos, o método do ultrassom não requer mão-de-obra extremamente especializada.

Para a análise da propagação das ondas ultrassónicas, estão definidos três métodos: método dos ecos; método da ressonância; e método da transmissão.

Relativamente ao método dos ecos, este é utilizado quando se torna impossível aceder a uma das faces do elemento. Neste método, existe apenas uma sonda que funciona como emissor e receptor, absorvendo a reflexão das ondas. Os seus resultados são pouco eficazes, dada a elevada heterogeneidade da madeira (Arriaga, 2002). A Figura 3.15, exemplifica o modelo de funcionamento.

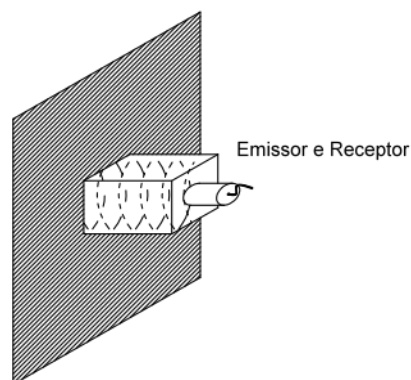


Figura 3.15: Método dos ecos

No caso do método da ressonância, este é baseado na frequência fundamental de vibração do elemento de madeira. Um emissor electrodinâmico provoca um aumento brusco na oscilação do elemento que, em função da frequência de ressonância, da massa volúmica e das dimensões do elemento, permite determinar o seu módulo de elasticidade. É um método que exige equipamento bastante complexo.

Por fim, o método de transmissão consiste na colocação de um emissor e de um receptor em faces paralelas. As ondas ultrassónicas são emitidas a frequências mais baixas do que no mé-

todo dos ecos, para permitir um maior alcance e capacidade para torneir os defeitos (Arriaga et al., 2002). O método permite aferir da qualidade e estimar as capacidades mecânicas da peça. A descontinuidade das fibras provoca a redução da velocidade da onda. Esta descontinuidade pode ser provocada por defeitos, nomeadamente por podridões originadas por ataques de insectos ou fungos, pela existência de nós ou bolsas de resina, ou pelo descaio das fibras. A Figura 3.16, apresenta um modelo do método de transmissão.

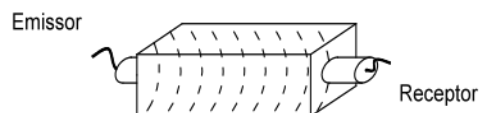


Figura 3.16: Método de transmissão

Quer o método de transmissão, quer o método dos ecos terão ainda uma variante denominada por método de imersão. Nesta variante, apenas mudará a natureza do acoplante de contacto entre as sondas ao elemento, uma vez que este se encontrará submerso em água (Machado, 2003).

Após a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, pode ser estimado o módulo de elasticidade estático, através da expressão 3.9 (Bucur et al., 1984; Sandoz, 1989).

$$E_{est} = K \cdot E_{din} \quad (3.9)$$

em que E_{est} corresponde ao módulo de elasticidade estático; e, K , corresponde à constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira.

Bonamini et al. (2001) propuseram adicionar-se uma nova constante à expressão 3.9, também esta dependente da madeira a avaliar. A nova proposta é apresentada na expressão 3.10.

$$E_{est} = K \cdot E_{din} + a \quad (3.10)$$

em que a , corresponde à constante dependente do elemento a analisar.

Tem-se assistido a diversos trabalhos de investigação que procuram aferir a correspondência entre os ensaios de ultrassons e as características obtidas em ensaios destrutivos, de onde sobressai a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, com o módulo de elasticidade à flexão. Esta correlação permite considerar que o módulo de elasticidade dinâmico será igual ou superior a 90% do valor do módulo de elasticidade à flexão (Bonamini et al., 2001). De uma forma geral, esta correlação assentará numa relação linear (US Forest Products Laboratory, 1999).

A escolha da frequência e do comprimento de onda com que se realiza o ensaio tem uma importância crucial (Feio, 2005). As duas características são inversamente proporcionais. Desta forma, se se pretende avaliar a homogeneidade do elemento e possíveis defeitos internos de pequenas dimensões, que possam provocar a descontinuidade das fibras da madeira, interessará aplicar um ultrassom com baixo comprimento de onda, conseqüentemente de elevada frequência, de forma a que estes sejam detetados. Caso contrário, defeitos inferiores a metade do comprimento de onda poderão ser facilmente imperceptíveis. Em contrapartida, as elevadas frequências tendem a atenuar-se rapidamente, fazendo com que a sua propagação tenha menor alcance, sendo por isso interessantes na análise de pequenos elementos ou regiões. Desta forma, é importante definir-se o objetivo para o qual se vai aplicar o ultrassom, para que a escolha da frequência seja a adequada. No caso da madeira, devido às suas características físicas, é comum usarem-se frequências compreendidas entre os 20 e os 500 kHz (Zombori, 2000). Bartunkova (2011), define um intervalo mais apertado de frequências, compreendendo-o entre 150 e 220 kHz. Apesar disso, é frequente o uso de sondas que emitem frequências de ressonância significativamente mais baixas que os 150 kHz.

É também importante ressaltar a importância do correto acoplamento dos transístores ao elemento de madeira e o material utilizado. Caso contrário, poderão criar-se diferentes impedâncias entre o transístor e a madeira, que levarão a interpretações erradas (Feio, 2005). Para além dos factores referidos, a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas é afetada pelo teor em água, temperatura, estado de tensão da peça, direção da medição, diferenças anatómicas entre lenho de Outono e de Primavera, entre outros (Júnior, 2006).

Sandoz (1989), após a análise de vigas em abeto, propõe que entre 5 e 30% de teor em água das madeiras, a velocidade da onda ultrassónica variasse aumentando 0,8% para cada 1% de redução do teor em água. Machado (2000) conclui também que para o Pinho bravo (*Pinus pinaster*) a velocidade da onda diminui com o aumento do teor em água da madeira.

Relativamente à temperatura, Júnior (2006) refere que o seu aumento diminui a velocidade de propagação, mas que não se reconhece esta influência como um factor importante. Quanto ao estado de tensão do elemento de madeira, Bucur (1995) demonstra, para o abeto vermelho, que quanto maior for a tensão aplicada ao elemento, menor será a velocidade de propagação do ultrassom.

Como referido, as imperfeições e vazios, vão afetar a velocidade de propagação da onda. No entanto, o facto da velocidade de onda transversal às fibras ser aproximadamente 1/3 da velocidade na direção das fibras, provoca dificuldades na análise dos resultados, levantando dúvidas de interpretação na existência de possíveis defeitos (Zombori, 2000). Deste modo, a direção em que os ultrassons são medidos tem uma influência fundamental (McDonald, 1978).

Por fim, Feeney et al., (1998) constataram que as diferenças existentes entre os lenhos do outono e da primavera também têm influência direta na velocidade da onda, sendo superior no lenho de outono.

Relativamente aos equipamentos mais utilizados para a realização deste tipo de ensaios, poder-se-ão destacar o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester) e o Sylvatest (Júnior, 2006), sendo que este último é o mais utilizado em estruturas de madeira, utilizando frequências mais baixas (20 MHz). A Figura 3.17 apresenta os componentes de um modelo Sylvateste.

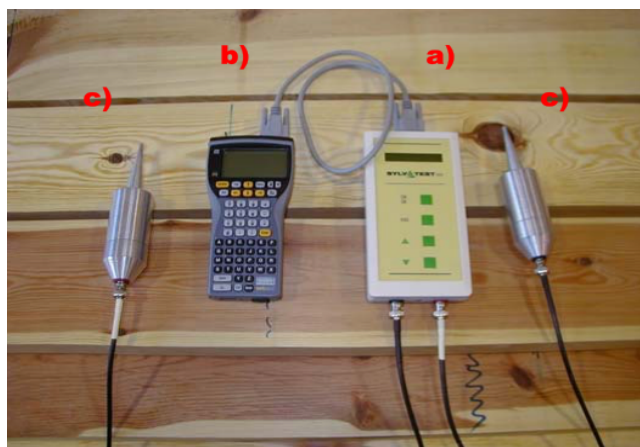


Figura 3.17: Componentes do aparelho Sylvatest:
a) Sylvatest Duo / b) Sylvion (Psion) / c) sondas (Capuz, 2003)

3.3.2.1 Estudos baseados no método de ultrassons

Para as madeiras de folhosas, vários autores apresentam correlações do módulo de elasticidade dinâmico com outras características e com valores de coeficientes de determinação significativos. Por exemplo, Lourenço et al. (2007), no estudo de madeira de castanho, utilizando provetes isentos de defeitos, apresentaram valores para o coeficiente de determinação entre 0,71 e 0,74, quando correlacionados o módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à compressão e o módulo de elasticidade à compressão na direção perpendicular às fibras, respectivamente. Contudo, Feio et al. (2007) apresentam valores para o coeficiente de determinação de 0,39 e 0,60, quando correlaciona com a resistência e módulo de elasticidade à compressão na direção das fibras, respectivamente, e de 0,27 a 0,58, com a resistência à tração e o módulo de elasticidade à tração paralela às fibras, respetivamente.

Oliveira (2012) resume, numa tabela, estudos relevantes sobre a aplicação do método dos ultrassons em diversas espécies de resinosas e de folhosas e que aqui se apresentam na Tabela 8.

Tabela 3.8: Resumo da pesquisa sobre a aplicação de UPV na análise não destrutiva de madeira (adaptado de Oliveira, 2012).

Referência	Espécie de Madeira	Conclusões dos trabalhos realizados
(Sandoz, 1989)	Abeto Suíço	Os resultados elementares obtidos pelos UPV são muito bons para a estimativa do MoE ($r > 0,8$), e por causa da redundância estatística, os resultados são também muito bom para o MoE ($r > 0,65$).
(Bucur, 1995)	Madeira maciça	A relação entre a densidade e os UPV não é relevante uma vez que de entre as espécies analisadas, com densidades entre 200-900 kg/m ³ e velocidades de UPV entre 2500-5800 m/s, apenas 5% se mostraram relacionáveis..
(Haines, et al., 1996)	Abeto da Noruega (<i>Picea excelsa</i>) e abeto branco (<i>Abies amabilis</i>)	Quanto mais elevada for a densidade da espécie, maior será a velocidade atingida pelo UPV. O valor médio do MoE obtido a partir dos UPV excedeu o MoE em cerca de 17-22%.
(Wang & Ko, 1998)	Cedro Japonês (<i>Cryptomeria japonica D. Don</i>)	Determinaram relações entre as propriedades mecânicas e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, obtendo correlações que variam entre $r^2=0,38-0,81$.
(Oliveira, et al., 2003)	Pinheiro (<i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elioti</i>)	O coeficiente de correlação obtido entre o E_{din} e o MoE, $r^2=0,83$, é altamente significativo.
(Lee & Bae, 2004)	Pinheiro Coreano (<i>Pinus densiflora</i>)	A relação entre a percentagem de deterioração e os resultados do UPV encontrada é: $V < 800 \mu s$: deterioração inicial (< 8%), $800 < V < 900 \mu s$: deterioração moderada (entre 8 e 15%), $V > 900 \mu s$: deterioração severa (> 15%).
(Miná, et al., 2004)	Eucalipto (<i>Eucalyptus citriodora</i>)	Definem um $r^2=0,55-0,62$ entre o E_{din} e o MoE. Verificam ainda que os coeficientes de variação obtidos para o E_{din} são menores que os obtidos para o MoE, denotando por isso uma menor variabilidade inerente aos NDT para peças com dimensões estruturais.
(Feio, 2005)	Elementos novos e velhos de Castanho (<i>Castanea sativa</i>)	Compressão Perpendicular às Fibras: Correlações fiáveis, $r^2=0,74-0,97$, encontradas entre o E_{din} obtido pelo método indireto do UPV, e o MoE. Correlações fiáveis, $r^2=0,71-0,89$, encontradas entre o E_{din} e a força de compressão $f_{c,90}$.
		Compressão Paralela às Fibras: Correlações médias, $r^2=0,65-0,73$, encontradas entre o E_{din} , obtido pelo método indireto do UPV, e o MoE. Correlações moderadas, $r^2=0,61-0,67$, encontradas entre o E_{din} e a força de compressão $f_{c,90}$.
		Tração Paralela às Fibras: Correlações moderadas, $r^2=0,63-0,67$, encontradas entre o E_{din} , obtido pelo método indireto do UPV, e o MoE. Correlações baixas, $r^2=0,27-0,53$, encontradas entre o E_{din} e a força de tração $f_{t,90}$.
(Divós & Tanaka, 2005)	Abeto	Estabelecem a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático, $r^2=0,90-0,96$, e explicam que a diferença entre eles é devida à fluência.
(Oliveira & Sales, 2006)	Madeira maciça (<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i> , <i>Eucalyptus citriodora</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Goupia glabra</i> e <i>Hymenaea sp.</i>)	Entre as várias espécies de madeira brasileira testadas, verificou-se que o aumento de V com o aumento da massa volúmica pode ser relacionado na grandeza $r^2=0,80-0,88$. No entanto, esta relação dentro do mesmo tipo de madeira decresce para $r^2=0,32$.
(Horáček, 2007)	Madeira maciça	As tecnologias de UPV, aplicadas perpendicularmente às fibras, são utilizadas com sucesso para detetar a presença e o nível de deterioração interno em pontes de madeira. No entanto verifica-se que a gama de valores obtidos varia conforme os equipamentos utilizados.

Referência	Espécie de Madeira	Conclusões dos trabalhos realizados
(Kotlínová, et al., 2008)	Pinho e Castanho	Os resultados obtidos revelaram a importância da estrutura da madeira, na direção dos anéis anuais, bem como do tipo de espécie na avaliação não destrutiva da densidade.
(Machado & Palma, 2010)	Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i>)	Uma alta correlação entre o E_{din} e o MoE foi encontrada, $r^2=0,76$. Além disso, o grau de correlação entre o $E_{m,g}$ teórico e prático, das duas espécies testadas, revelam um $r^2=0,55-0,76$.
(Secco, et al., 2011)	Pequiá-marfim (<i>Aspidosperma desmanthum</i>)	Análise de provetes com diferentes percentagens de cavidades artificiais através de dois tipos de malhas. A malha de difração apresenta melhores resultados que a malha reticulada uma vez que deteta cavidades de menor diâmetro.
(Hasenstab & Fruehwald, 2011)	Madeira maciça	Utilizam a técnica de eco ultrassônica, em conjunto com outras técnicas NDT, para realizar uma inspeção, em condições de serviço, em pontes.
(Kroggel, et al., 2011)	Madeira maciça	Utilização dos ultrassons como técnica de inspeção a elementos de madeira.

Para além da tabela apresentada por Oliveira (2012), mais recentemente, foram desenvolvidos alguns estudos que se focaram essencialmente na correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através de ensaios de ultrassom, e o módulo de elasticidade à flexão, estático. A Tabela 3.9 apresenta uma brevíssimo resumo desses mesmos estudos.

Tabela 3.9: Estudos recentes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através de do ultrassom, e o módulo de elasticidade à flexão estático.

Referência	Espécie de Madeira	Conclusões dos trabalhos realizados
García-Iruela, et al. (2016)	Pinheiro de Monterey (<i>Pinus radiata</i>)	Na correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, determinado por meio da técnica do ultrassom, e o módulo de elasticidade estático à flexão, foi obtido um $r^2=0,7$.
Nowak, et al. (2015)	Abeto da Noruega (<i>Picea Abies</i>)	Ao estudar a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido por meio de dois equipamentos de ultrassom, Fakopp e Sylvatest, e o módulos de elasticidade à flexão estático, obtiveram 0,49 e 0,66, respetivamente.
Faggiano, et al. (2011)	Castanheiro-comum (<i>Castanea sativa Mill.</i>)	Os autores estudaram a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático, obtendo um coeficiente de determinação de 0,76.
Branco, et al. (2010)	Abeto (<i>Picea abies Karst</i>)	Utilizando o equipamento Sylvatest na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, e por correlação com o módulo de elasticidade à flexão estático, foi obtido um coeficientes de determinação de 0,15.
Íñiguez, et al. (2006)	Tali (<i>Erythrophleum suaveolens</i>)	Forte correlação entre resultados obtidos pelo uso de métodos de ultrassom e o módulo de elasticidade à flexão, obtendo valores para o coeficiente de determinação de 0,61.

3.3.3 Estudos sobre madeiras tropicais

A necessidade de se caracterizarem mecanicamente as novas espécies que vão chegando ao mercado europeu, provenientes da gestão sustentável de florestas tropicais, e resultado das dificuldades em se preencherem os requisitos da normalização europeia para a classificação destas madeiras, têm surgido alguns trabalhos debruçando-se sobre a possibilidade de se desenvolverem modelos alternativos que procuram estabelecer correlações entre modelos destrutivos e não destrutivos. Os estudos que são abordados na presente secção, encontram-se referenciados, de forma resumida, no Anexo B da presente tese.

De um modo geral, a caracterização de espécies tropicais, através de provetes de dimensão estrutural, continua a não ser pacífica. Jamil et al. (2013) no seu artigo em que aborda a relação mecânica entre as propriedades dos provetes de dimensão estrutural com as dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dá conhecimento da existência de uma discussão alargada ao nível do país, Malásia.

De entre os argumentos mais relevantes contra a utilização de provetes de dimensões estruturais podem destacar-se: os elevados custos inerentes à obtenção dos provetes; o facto de só na Malásia existirem mais de 3000 espécies tropicais, tornando praticamente impossível uma recolha séria de amostras de provetes de dimensões estruturais que possibilite as suas caracterizações, ou parte delas; e o forte impacto ambiental resultante da quantidade de provetes de dimensão estrutural a ensaiar e de toda a madeira desperdiçada até à execução dos próprios provetes.

Tendo presente o modelo previsto na norma EN 384 (CEN, 2010), para a determinação das propriedades mecânicas das madeiras de folhosas, logo à partida, emergem duas questões fundamentais. A primeira, relacionada com o conceito de espécie semelhante, o qual não é definido na norma e que será fundamental para a determinação de coeficientes de correção de resultados obtidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos. E a segunda, com o facto de estudos recentes demonstrarem que, a resultados obtidos em ensaios de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, poderão corresponder valores significativamente distintos, quando comparados com os de provetes de dimensões estruturais, segundo a EN 408 (CEN, 2012a).

Um desses estudos foi realizado por Ravenshorst et al. (2010) que ao analisarem a espécie de Cumaru (*Dypterix odorata*), através de duas amostras, uma com origem no Brasil e outra no Peru, através de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, obtiveram valores muito similares para a tensão de rotura à flexão. No caso da amostra proveniente do Brasil, obteve-se um valor médio para a tensão de rotura de 180 MPa, enquanto que para a amostra proveni-

ente do Peru, o valor foi de 183,9 MPa. Para provetes de dimensões estruturais, foi efetuada uma inspeção visual segundo a BS 5756 (2007) e a NEN 5493 (2011) (categoria 3) para a seleção de provetes e foi seguido o procedimento preconizado na EN 408 (CEN, 2012a) para a determinação das tensões de rotura à flexão e dos módulos de elasticidade à flexão. Foram obtidos os seguintes valores médios: 113,0 MPa e 79,8 MPa, para as tensões de rotura à flexão com origem no Brasil e no Peru, respetivamente; e, 17,6 GPa e 14,5 GPa, para os módulos de elasticidade à flexão, respetivamente para a amostra com origem no Brasil e no Peru. A Tabela 3.10, recolhida do referido estudo, resume os resultados finais.

Da figura, constata-se que, seguindo o procedimento alternativo previsto na EN 384 (CEN, 2010), onde é referido o conceito de espécie semelhante para a determinação de coeficientes de correção entre resultados de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e provetes de dimensões estruturais, dependendo da origem considerada, Brasil ou Peru, o valor dos respectivos coeficientes seria substancialmente diferente, com implicações óbvias na determinação dos respectivos valores característicos.

Torna-se evidente a dificuldade em definir-se o conceito de espécie semelhante para as capacidades mecânicas, uma vez que, madeiras da mesma espécie podem apresentar relações diferentes entre provetes de diferentes escalas.

Origin	Cross sections (mm x mm)	type	n	Moisture content [%]		MOR [MPa]		density [kg/m ³]		MOE _{global} [MPa]		MOE _{dynamic} [MPa]	
				mean	COV	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]
Brazil	50 x 110 50 x 130	Full size	91	16,0	2,0	113,0	0,19	1037	0,08	17600	0,15	21200	0,14
	20 x 20	small	40	12,0	0,5	150,6	0,25	1003	0,07	16000	0,19	19800	0,20
Peru	55 x 165	Full size	49	16,5	1,10	79,8	0,23	965	0,06	14500	0,12	19500	0,13
	20 x 20	small	44	12,0	0,5	151,0	0,28	932	0,05	15100	0,27	17500	0,15

a)

Origin	Cross sections (mm x mm)	type	n	Moisture content [%]		MOR [MPa]		density [kg/m ³]		MOE _{global} [MPa]		MOE _{dynamic} [MPa]	
				mean	COV	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]	Mean	COV [%]
Brazil	20 x 20	Small all	40	12,0	0,5	150,6	0,25	1003	0,07	16000	0,19	19800	0,20
	20 x 20	Small only clears	17	12,0	0,5	180,0	0,13	1034	0,07	18100	0,10	22600	0,07
Peru	20 x 20	small	44	12,0	0,5	151,0	0,28	932	0,05	15100	0,27	17500	0,15
	20 x 20	Small only clears	17	12,0	0,5	183,9	0,14	950	0,04	20040	0,18	19100	0,04

b)

Origin	Cross section (mm x mm)	n	type	Parametric 5% value of the bending strength (N/mm ²)	Non-parametric 5% value of the bending strength (N/mm ²)
Brazil	50 x 105 50 x 130	91	Full size	76,7	69,8
Brazil	20 x 20	40	Small all	87,4	91,4
Brazil	20 x 20	17	Small clears	142,3	147,4
Peru	55 x 155	49	Full size	49,4	46,6
Peru	20 x 20	44	small	81,7	88,8
Peru	20 x 20	17	Small clears	142,1	142,5

c)

Tabela 3.10: Propriedades mecânicas da espécie de Cumaru (*Dypterix odorata*): a) Resultados dos provetes de dimensões estruturais e de pequenas dimensões; b) Resultados dos provetes de pequenas dimensões; c) Valores correspondentes ao percentil 5% das amostras (Ravenshorst et al., 2010).

Em 2004, Ravenshorst et al., desenvolveram um modelo de caracterização das propriedades mecânicas definindo por população a totalidade das espécies analisadas. Pretendeu-se um modelo rápido e económico que resultasse da combinação de resultados de ensaios destrutivos com não destrutivos. Os ensaios destrutivos foram realizados com base na EN 408 (CEN, 2012a) e os não destrutivos através da emissão de ondas de vibração. A população foi constituída por treze espécies, das quais onze eram tropicais e duas europeias.

Numa primeira fase, foram analisadas as correlações entre as características de cada espécie, obtendo-se valores extremamente baixos. Também não se obtiveram boas correlações entre o módulo de elasticidade estático e a tensão de rotura à flexão, justificando o autor, com a possível influência dos defeitos dos elementos. Ao desenvolver a mesma análise, mas considerando por população o conjunto de resultados de todas as espécies, Ravenshorst et al. (2004) obtiveram valores substancialmente mais elevados. Para a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão obtiveram $r^2=0,63$. Para a correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e o estático à flexão, o valor foi de $r^2=0,73$. A Figura 3.18 apresenta, a cinzento, a relação entre os valores para o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão da população definida por todas as espécies. A preto, estão os resultados de uma espécie isolada, a Karri.

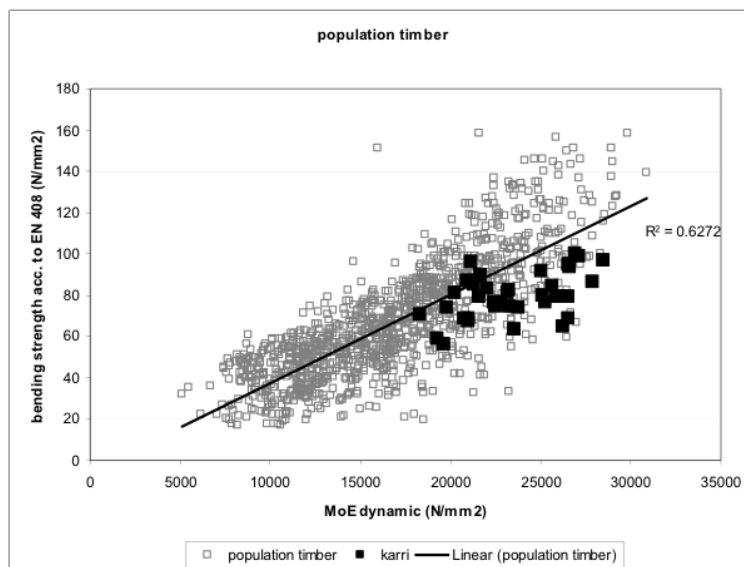


Figura 3.18: Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão, para a população constituída por todas as espécies (cinza), e pela espécie Karri (preto) (Ravenshorst et al. 2004).

Baseado na totalidade dos resultados obtidos para as 13 espécies, o autor procurou estabelecer uma metodologia de previsão dos valores característicos da tensão de rotura correspondentes ao percentil de 5%, para cada espécie. O procedimento baseou-se na combinação de 75% (30 provetes) dos resultados obtidos por métodos não destrutivos, nomeadamente por ensaios de medição da frequência de vibração natural dos provetes, medidos com o aparelho TNO Mobile Timber Grader, apresentado na Figura 3.19; e 25% (10 provetes) por métodos destrutivos, seguindo o preconizado na norma EN 408 (CEN, 2012a).

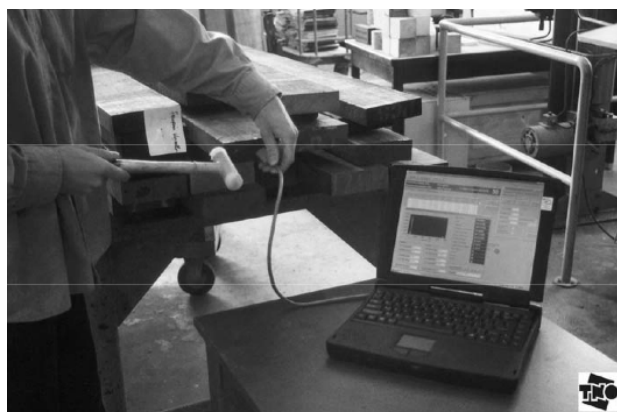


Figura 3.19: Protótipo do equipamento TNO Mobile Grader (Ravenshorst et al., 2004).

Com base na metodologia alternativa, foram comparados os resultados com os obtidos através dos procedimentos segundo a EN 408 (CEN, 2012a). Da comparação de resultados, obtive-

ram-se rácios de 1,07 para a tensão de rotura à flexão e 1,06 para o módulo de elasticidade à flexão.

Dois anos antes, Kuilen et al. (2002), tendo por base os resultados das mesmas campanhas de ensaios (Kuilen, 1999; Kuilen et al., 2000) e os mesmos princípios que fundamentaram o trabalho de Ravenshorst et al. (2004), nomeadamente o de assumir por população a totalidade das espécies ensaiadas, estudaram a correlação entre os resultados das propriedades obtidos por processos destrutivos e não destrutivos, estabelecendo expressões de correlação através de regressões linear e logarítmica. Para este estudo, o módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através das frequências de vibração dos elementos, produzidas pelo mesmo equipamento desenvolvido pelo TNO Building and Construction Research.

Da correlação entre a tensão de rotura à flexão com as características do módulo de elasticidade à flexão, do módulo de elasticidade dinâmico e da massa volúmica, foram-se obtendo diversas expressões de regressões lineares e logarítmicas, excluindo da base de dados de cada expressão os resultados da espécie a caracterizar. Kuilen et al. (2002) obtiveram resultados com uma precisão de $\pm 20\%$, ao estimar a tensão de rotura à flexão nas diferentes espécies. Da totalidade dos resultados da base de dados (incluindo todas as espécies), resultaram as expressões linear, 3.11, e logarítmica, 3.12, obtendo-se valores de 0,58 e 0,62 para os respectivos coeficientes de determinação.

$$f_m = 0,038E_{din} + 0,0008E_{est} + 0,0223\rho - 28,2675 \quad (3.11)$$

$$f_m = 0,0079E_{din} - 84,2096 \log(E_{est}) - 0,0008E_{est} + 36,6253 \log(E_{est}) - 0,3038\rho + 0,0002\rho^2 + 538,0231 \quad (3.12)$$

Das expressões referidas, f_m representa a tensão de rotura à flexão; E_{din} o módulo de elasticidade dinâmico; E_{est} o módulo de elasticidade à flexão estático global segundo a EN 408 (CEN, 2012a); e ρ a massa volúmica.

Íñiguez et al. (2006), num estudo sobre a aplicação de métodos não destrutivos, baseados nas técnicas de ultrassom e na análise de vibração para o controlo de qualidade da madeira estrutural de Tali, concluíram existir uma forte correlação entre estes procedimentos e o módulo de elasticidade à flexão, obtendo valores para os coeficientes de determinação da ordem de 0,61 e 0,88, respectivamente. No entanto, ao analisar a correlação com a tensão de rotura à flexão, os coeficientes de determinação revelaram-se bastante inferiores, atribuindo-se o facto aos defeitos locais terem maior influência na tensão de rotura do que na qualidade geral do elemento de madeira.

Em 2011, Mvogo et al. procuraram dividir a classificação das espécies tropicais por 4 grupos, baseando-se em ensaios de análise das frequências de vibração naturais transversais das madeiras. Foram analisadas 19 espécies tropicais, entre as quais a Câmbala e a Sapelli. O módulo de elasticidade dinâmico da amostra foi obtido a partir dos testes de análise vibratórios, utilizando o equipamento de Pico Tecnologia (ADC216; 16 bits). A Figura 3.20, apresenta o exemplo de um gráfico de resposta das vibrações naturais.

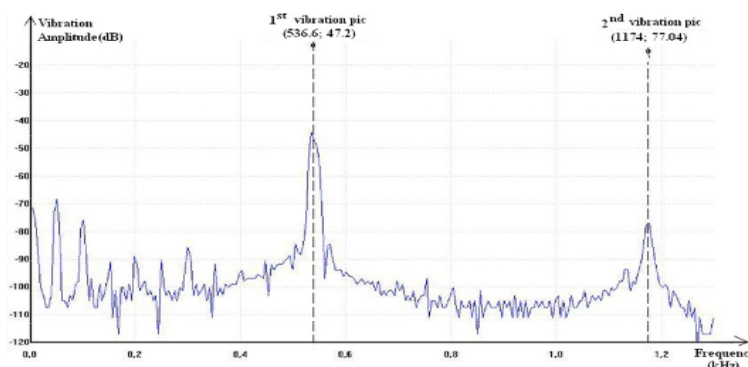


Figura 3.20: Exemplo de gráfico de resposta de vibrações naturais transversais de um provete (Mvogo et al., 2011).

Comparando os resultados do módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade à flexão estático, determinado a partir de ensaios à flexão em 4 pontos, observou-se que os segundos eram, em média, 6% superiores, demonstrando uma enorme proximidade de resultados entre os procedimentos. A Figura 3.21 apresenta o resumo dos valores.

Specie local name	Specie botanic standard name	Vibratory MOE (MPa)		CIRAD MOE (MPa)	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	7035	1320	7260	1574
Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	12151	1400	13960	2403
Tali	<i>Erythrophleum ivorense</i>	17913	2093	19490	3224
Azobé	<i>Lophira alata</i>	23179	2169	21420	3539
Moabi	<i>Baillonella toxisperma</i>	16225	2754	21040	2630
Iroko	<i>Chlorophora excelsa</i>	11357	2091	12840	2496
Ebène	<i>Diospyros crassiflora</i>	18457	4988	18457	3500
Movingui	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	18808	1509	18808	3053
Bubinga	<i>Guibourtia tessmannii</i>	16262	4092	20180	5592
Bibolo	<i>Lovoa trichilioides</i>	11517	1591	10460	946
Bété	<i>Mansonia altissima</i>	15614	1238	13620	1224
Wengé	<i>Milletia laurentii</i>	19423	1134	21050	695
Difou	<i>Morus mesozygia</i>	15914	1581	18490	2100
Bilinga	<i>Nauclea diderrichii</i>	16987	2249	14660	1934
Padouk	<i>Pterocarpus soyauxii</i>	14500	1518	15870	1885
Fraké	<i>Terminalia superba</i>	10203	1706	11750	2480
Eyong	<i>Eribroma oblonga</i>	14516	2591	17110	1910
Fromager	<i>Ceiba pentandra</i>	7860	1406	5130	1462
Pachyloba	<i>Azelia pachyloba</i>	15691	1761	17020	2889

Figura 3.21: Resultados das campanhas de ensaios não destrutivos, de análises dos modos de vibração naturais da madeira (Mvogo et al., 2011), e da flexão estática segundo o CIRAD (Gérard, 2004).

Relativamente à correlação entre o módulo de elasticidade dinâmica com a massa volúmica, a tensão de rotura e o módulo de elasticidade à flexão, para o coeficiente de determinação, obtiveram-se os valores de 0,79, 0,76 e 0,89, respectivamente.

Em 2013, Ravenshorst et al. voltaram a abordar a possibilidade da classificação das madeiras tropicais ser independente da espécie. Os autores justificam esta opção, pela dificuldade de efetuar a distinção de espécies, especialmente numa fase avançada em que a madeira já esteja serrada, sem possibilidade de se analisarem as folhas, frutos, cascas, etc.. Sendo a análise das características anatómicas da madeira um método comum na determinação da espécie, em muitos casos torna-se impossível de se efetuar por estas não serem significativamente distintas, ou por os conhecimentos necessários no local não serem os suficientes.

O autor procurou atribuir classes de resistência correlacionando os valores médios obtidos dos ensaios em provetes de pequenas dimensões, com os valores característicos de provetes de dimensões estruturais. Neste estudo, foram analisadas 5 amostras de madeira com o nome comercial Cumarú e 3 amostras com o nome comercial Massaranduba. As amostras de Cumarú e Massaranduba eram compostas por várias espécies que não foram possíveis de distinguir com os meios disponíveis, ficando agrupadas pelo mesmo género.

As amostras de Cumarú eram provenientes de 3 zonas do Brasil, de uma zona do Peru e outra da Bolívia. Os valores característicos para a tensão de rotura, obtidos através de ensaios em provetes de dimensão estrutural, segundo a EN 408 (CEN, 2012a), mostraram a possibilidade de uma amostra proveniente do Brasil (amostra 3) ter um valor característico para a tensão de rotura, superior ao dobro da amostra proveniente do Peru. A Figura 3.22 apresenta os valores característicos da espécie de Cumarú.

sample	location	5%-value of the density (kg/m ³)	Mean-value of Modulus of Elasticity (N/mm ²)	5%-value of the bending strength (N/mm ²)
1	Brazil	933	20700	76.8
2	Brazil	880	20600	58.7
3	Brazil	919	22200	100.9
4	Peru	829	19000	46.0
5	Bolivia	843	19000	56.0

Figura 3.22: Valores característicos para as amostras em madeira de Cumarú (Ravenshorst et al., 2013).

Para a justificação das diferenças significativas entre as amostras de Cumarú, o autor apresenta 4 possibilidades: 1) as diferentes condições de crescimentos das zonas de onde provêm as amostras, influenciando o tipo de alinhamento das fibras, tornando-as mais encaracoladas ou

direitas; 2) a dificuldade em avaliar o ângulo de alinhamento das fibras com o eixo das peças, podendo implicar diferenças significativas; 3) as próprias espécies de cada amostra de Cumaru; 4) a arbitrariedade na escolha dos provetes de cada amostra, influenciando o valor correspondente ao percentil 5% mais baixo. Acima de tudo, o autor refere que os resultados demonstram a evidência de que cada amostra acaba por não cobrir as variações naturais de parâmetros, tais como a origem, o número de provetes do mesmo género, as condições de crescimento, etc.

No mesmo artigo, Ravenshorst et al. (2013), avaliaram 3 tipos de possibilidades para a determinação do valor característico da tensão de rotura: 1) Derivação do valor característico de provetes de dimensão estrutural, através de inspeção visual; 2) Derivação dos valores característicos, através de provetes de pequenas dimensões; 3) Derivação dos valores característicos, a partir de classificação mecânica. Das três possibilidades, na presente tese, serão analisadas as 2ª e 3ª hipóteses.

Dentro do mesmo estudo, foi referenciado um programa de investigação desenvolvido pelo European Timber Traders Federation, onde foi estudada a possibilidade de se prever o percentil 5% de amostras definidas pelo seu género, a partir de provetes de pequenas dimensões. Para isso procurou estabelecer-se uma correlação entre a tensão de rotura à flexão obtida através de provetes de pequenas dimensões, com a obtida em provetes de dimensão estrutural. Analisados os dados de cerca de 15 espécies de madeira, foi estabelecida uma relação entre o valor médio da resistência à flexão de provetes de pequenas dimensões, com o valor característico de provetes de dimensões estruturais.

Numa segunda fase, o estudo foi estendido a amostras de provetes de pequenas dimensões extraídos de provetes de dimensões estruturais. Procurou investigar-se a relação básica com os provetes de pequenas dimensões, para prever a tensão de rotura de provetes de dimensões estruturais, das mesmas amostras.

Os resultados apresentam-se na Figura 3.23, representando uma amostra proveniente do Brasil e outra do Peru. Para valores médios da tensão de rotura em provetes de pequenas dimensões, marcados nos círculos a vermelho, correspondem valores característicos de provetes de dimensão estrutural, significativamente afastados. O autor concluiu que o valor característico não poderia ser previsto através de provetes de pequenas dimensões. Para isso, teria de se ter em conta uma linha de correlação entre as duas escalas. Uma vez que, aquando da obtenção dos resultados de provetes de pequenas dimensões, não seriam conhecidos os valores dos provetes de dimensão estrutural, com base na Figura 3.23, uma linha de correlação $Y = 0,30X$ pareceu ser segura, dado que, há apenas um ponto para o qual o valor correspondente ao percentil de 5% de uma amostra ficaria abaixo.

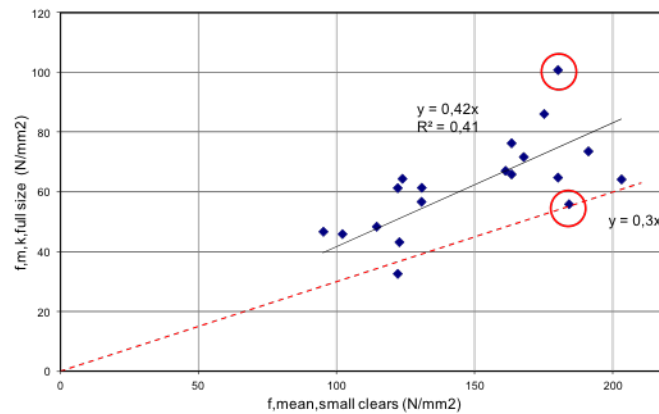


Figura 3.23: Relação entre os valores médios das tensões de rotura à flexão obtidas em provetes de pequenas dimensões (eixo horizontal), e os valores característicos obtido em provetes de dimensão estrutural (eixo vertical) (Ravenshorst et al., 2013).

Relativamente a uma possível variação provocada pela origem das amostras, o autor considera não estar provada. Por este facto, propõe que à área de origem se poderia adequar a área de um continente, por onde se dissemina a espécie. Desta forma, para o Cumaru e a Massaranduba, a origem corresponderia à América do Sul, ao invés de ficarem limitadas a países ou à área da floresta amazónica. Previsivelmente, este método provocaria valores mais conservadores do que o procedimento previsto pela normalização europeia, contudo apresenta a vantagem de ser prático e expedito, podendo admitir áreas continentais para a origem das espécies.

Relativamente à classificação por máquina, o autor, na Figura 3.24 apresenta uma forte correlação para as 3 amostras de Massaranduba, entre os respetivos valores dos módulos de elasticidade dinâmicos, determinados através da vibração natural das madeiras e as tensões de rotura à flexão.

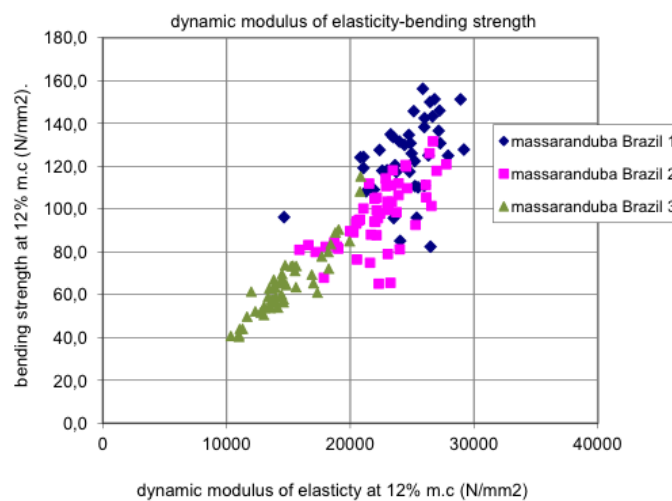


Figura 3.24: Relação entre os módulo de elasticidade dinâmicos e as resistências à flexão para as amostras de Massaranduba (Ravenshorst et al., 2013).

Do artigo em questão, o autor concluiu que o uso de provetes de pequenas dimensões para prever os valores característicos, implicaria o uso de factores de segurança com substancial redução das capacidades resistentes, uma vez que a diferenciação entre as amostras através de provetes de pequenas dimensões, não acontece. Para a previsão das tensões de rotura através do módulo de elasticidade dinâmico, o autor conclui obter valores de elevada precisão, capazes de estimar o valor de cada elemento individual, tornando-se desnecessária a atribuição de uma Classe de Resistência para a espécie.

Para diferentes espécies, Jamil et al. (2013) estudaram a relação entre resultados obtidos em provetes de dimensão estrutural, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012a) e os obtidos em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, ensaiados de forma similar ao previsto na norma BS 373 (1957). De uma forma geral, o valor obtido para a tensão de rotura à flexão, nos provetes de dimensão estrutural, foram inferiores aos de pequenas dimensões, sendo que, numa análise à totalidade dos resultados das diferentes espécies, não se conseguiu observar uma tendência clara de correlação, obtendo-se um valor da ordem de 0,4 para o coeficiente de determinação. O facto de os provetes de pequenas dimensões serem isentos de defeitos foi um dos factores a que o autor atribuiu a diferença de resultados, uma vez que não traduziriam os defeitos existentes nos provetes de dimensão estrutural. Realizada uma inspeção visual aos provetes de dimensão estrutural de Keruing, constatou-se uma diminuta presença de defeitos, comparativamente com as outras espécies. Corroborando com a justificação apresentada pelo autor, ao observar apenas a espécie de Keruing, constatou um coeficiente de determinação de 0,72 entre as duas escalas de provetes, para a mesma propriedade mecânica. Já em 1996, Desch et al. afirmavam que, defeitos tais como a presença de nós e o desvio das fibras, afectavam as capacidades resistentes da madeira. Para o módulo de elasticidade à flexão, as correlações mostraram-se consistentes, mesmo quando se misturaram os resultados das diferentes espécies analisadas, obtendo-se o valor de 0,64 para o coeficiente de determinação entre os provetes de dimensões estruturais e provetes de pequenas dimensões.

Para condições de madeira verde e de madeira seca ao ar, Alik et al. (2006) correlacionou provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos com provetes de dimensão estrutural. Apresentaram resultados de 0,56 e 0,55, respectivamente, para o coeficiente de determinação, na análise da correlação entre as tensões de rotura à flexão, para a espécie de *Dryobalanops*. Sendo os resultados dos provetes de pequenas dimensões superiores aos dos provetes de dimensão estrutural, o autor também atribuiu à existência de defeitos nos provetes de dimensão estrutural, a principal causa do desfasamento de resultados.

Ahmad et al. (2010), demonstraram que a média do módulo de elasticidade à flexão em provetes de dimensão estrutural, para a espécie de madeira de Kedondong, eram superiores à média obtida para provetes de pequenas dimensões. Em 2009, Lanvin et al., procederam a um

estudo semelhante, obtendo a expressão $Y=0,35X$, sendo Y equivalente a 90% do valor característico da tensão de rotura à flexão, obtido nos ensaios em provetes de dimensão estrutural e X o valor obtido da tensão de rotura à flexão dos provetes de pequenas dimensões. O autor afirmou que, pelo lado da segurança, se poderia assumir, para os provetes de dimensão estrutural, o valor do módulo de elasticidade obtido nos provetes de pequenas dimensões. Também Hugh, em 2010, sob a justificação de que o módulo de elasticidade à flexão seria uma propriedade menos dependente dos possíveis defeitos existente na madeira, propõe que esta possa ser determinada a partir de provetes de pequenas dimensões, sem qualquer correção de valores.

Já em 1930, Newlin indicava outro possível factor para a diferenciação de resultados, baseado na existência de esforços horizontais, capazes de provocar o cisalhamento da peça, quando esta, de dimensões estruturais, estava sujeita à flexão estática em 4 pontos.

Outros estudos debruçaram-se sobre a análise das normas de classificação visual para madeiras tropicais. Em 2006, Arriaga et al. analisaram a norma BS 5756 (2007), quanto aos limites definidos na medição e quantificação dos defeitos visuais, e respectiva atribuição da Classe de Resistência. Nesse trabalho, para além da caracterização de amostras de madeira de Tali, segundo a norma BS 5756 (2007), foi também utilizada a metodologia de ultrassons, com o emprego do equipamento Sylvatest Duo. Os provetes tinham de secção transversal $80 \times 80 \text{ mm}^2$ e $200 \times 250 \text{ mm}^2$, variando os seus comprimentos entre 1,8 e 7,2 m. Seguindo os procedimentos descritos na BS 5756 (2007), apesar da elevada dificuldade em se distinguir e quantificar os defeitos visuais de cada provete, com base nos seus limites admissíveis, houve a necessidade de rejeitar um elevado número de espécimes, 43%. Este facto levou o autor a propor modificações à norma, baseadas na majoração dos valores limitativos para os tamanhos dos nós e para a inclinação das fibras. Deste modo, a redução da percentagem de provetes a eliminar, passou para 9%. De uma forma geral, o autor concluiu que a classificação visual com as novas limitações permitiu atribuir a mesma classe de resistência para a espécie estudada, D50, com uma reprovação de provetes extremamente inferior.

Relativamente ao uso de ultrassons, à semelhança de outros estudos, Bucur et al., (1984), verificaram boas correlações entre a velocidade do ultrassom e o módulo de elasticidade à flexão, atingindo valores para o coeficiente de determinação de 0,74, em provetes com secção de $200 \times 250 \text{ mm}^2$. Quanto à correlação da velocidade com a tensão de rotura, verificou-se uma ausência de correlação, variando r^2 entre 0,07 e 0,12 entre as dimensões dos diferentes provetes. Curiosa foi ainda a correlação estabelecida entre a velocidade do ultrassom e a variação do comprimento dos provetes, situando-se num r^2 de 0,78. Desta forma, o autor concluiu que o método de ultrassons poderia ser utilizado como um parâmetro adicional para a classificação da qualidade da elasticidade da peça.

Em 2007, Kuilen et al. desenvolveram um estudo em que procuraram classificar madeiras tropicais, relativamente à sua resistência, independentemente da sua espécie. Os autores estudaram mais de 30 espécies, em mais de 1500 vigas (Kuilen et al., 2001), determinando as amplitudes de resistência, rigidez e massas volúmicas, através de procedimentos destrutivos e não-destrutivos. Foram utilizadas técnicas de inspeção visual, baseadas nas dimensões dos nós e no ângulo de inclinação das fibras com o eixo longitudinal dos elementos. Foram determinados os módulos de elasticidade dinâmicos com utilização do equipamento Timber Grader MTG, baseado na medição das frequências naturais de vibração das madeiras. Para os elementos de dimensões estruturais, foram determinadas as tensões de rotura à flexão e o correspondente módulo de elasticidade, segundo os procedimentos previstos na EN 408 (CEN, 2012a). O conjunto das espécies analisadas foi considerado como sendo uma população única a caracterizar.

Uma vez que a optimização do rendimento das madeiras de folhosas, através da inspeção visual, é dificilmente atingível, Kuile et al. (2007) concluíram que os procedimentos não destrutivos em madeiras de folhosas permitem obter classes de resistência mais elevadas, melhorando o rendimento das madeiras.

De uma forma geral, os estudos demonstram um potencial evidente para se poder estimar as propriedades de referência das madeiras tropicais, através de procedimentos alternativos aos propostos pela normalização europeia. Porém, os graus de incerteza e precisão nas estimativas realizadas com vista à máxima optimização do rendimento mecânico das madeiras, correlacionados com os critérios de segurança necessários ao dimensionamento estrutural, requerem um aprofundamento desses mesmos estudos.

3.4 O teor em água na madeira

Tendo por base o objetivo da caracterização mecânica de espécies tropicais, será relevante não esquecer as consequências que os factores do meio ambiente circundante poderão provocar na estabilidade dos elementos de madeira, nomeadamente, pela variação da temperatura ambiente e pela variação da humidade relativa do ar. Estes factores podem tornar-se relevantes no comportamento de elementos estruturais de madeira maciça, nomeadamente quando sujeitos a grandes amplitudes. Terão o poder de influenciar de forma significativa a variação do teor em água da madeira, conseqüentemente, expandindo-a ou retraindo-a, originando o aparecimento de tensões internas nos elementos, alterando, significativamente, as capacidades mecânicas do elemento.

A estabilidade dimensional da madeira representa a variação do seu volume, ou de determinada dimensão, em função da variação do seu teor em água (Júnior, 2006). As dimensões serão, segundo a direção dos seus eixos principais: radial, tangencial ou longitudinal. A estabilidade dimensional das madeiras deve ser estudada desde o seu estado anidro, até, aproximadamente 100% de teor em água, de forma a encontrar-se o valor do teor em água para a saturação das fibras (PSF, Ponto de Saturação das Fibras). Para além da massa volúmica e da estabilidade dimensional, as madeiras são também caracterizadas fisicamente pelo seu teor em água e higroscopicidade e pela sua reação e resistência ao fogo. Segundo Branco (2003) o aumento da massa volúmica implica uma diminuição na velocidade de combustão e um aumento no tempo de ignição. Anastácio (2010) diz, também, que o aumento da massa volúmica, associado ao aumento da humidade, implicam uma maior condutividade térmica da madeira, sendo, por isso, melhores isolantes as madeiras secas que possuem um teor em água constante.

3.4.1 A presença de água na madeira

A madeira, sendo uma matéria orgânica fruto do crescimento de um ser vivo, está dependente da água para o seu desenvolvimento, água essa que, após o corte da árvore, está em constante transmissão com o ambiente, de forma a estabelecer-se um equilíbrio entre as tensões internas das substâncias lenhosas e as tensões criadas pelo próprio ambiente.

Apesar das características anatómicas que diferenciam o grupo das madeiras de resinosas das de folhosas, a forma de retenção da água, na sua estrutura anatómica, é semelhante. Assim, nas estruturas celulares da madeira, pode-se encontrar três formas de localização da água: 1) *água constituinte*, 2) *água de saturação* e 3) *água livre*.

A água constituinte é um dos elementos da substância lenhosa e, como tal, a sua variação é praticamente nula. Relativamente à água de saturação, podemos encontrá-la nas membranas higroscópicas das células. É em relação à alteração dos teores de água de saturação que as madeiras são sensíveis, alterando as suas características físicas e mecânicas. Quando as membranas celulares estão completamente secas, sem qualquer percentagem de água, a madeira considera-se anidra. Pelo contrário, se as membranas celulares estiverem completamente saturadas de água, considera-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF), a partir do qual, o aumento de teor em água da madeira não alterará as suas características mecânicas. A partir do ponto de saturação das fibras, a madeira passa a armazenar a água nos espaços celulares e intercelulares, denominando-a por água livre. A Figura 3.25 procura esquematizar as fases da evaporação da água, desde o estado da madeira verde até ao seu ponto anidro.

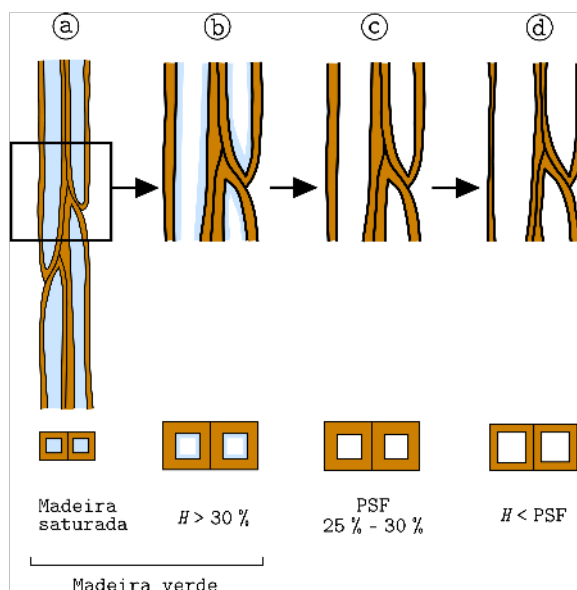


Figura 3.25: Fases de evaporação da água na madeira (LNEC, 1997).

A água livre apresenta-se com ligação fraca à substância lenhosa, fazendo com que tenha extrema facilidade em se libertar, sem praticamente provocar alterações mecânicas ou de dimensão no elemento de madeira. É relativamente à água de saturação que se observa a alteração no comportamento higroscópico da madeira. Pelo facto desta água se fixar nas membranas celulares, estabelece-se um campo de tensões que leva a que a sua variação não seja tão débil como a da água livre. Dada a existência de humidade no ambiente, apenas por meios mecânicos é possível conseguir-se a sua eliminação total.

A variação da água de saturação faz com que as próprias membranas variem de volume, alterando, desde logo, o volume da peça de madeira e o seu peso, conseqüentemente, a sua massa volúmica e o comportamento das fibras aos esforços mecânicos. Desta forma, a quantidade de água de saturação está diretamente relacionada com as características físicas e mecânicas das espécies. É com base nesta amplitude de comportamento da madeira, dependente do seu teor em água, que se assume como um material extremamente higroscópico e que, de forma a se poderem comparar as propriedades físicas e mecânicas entre espécies, se definiu um teor em água de referência de 12%.

3.4.2 Evolução do teor em água na secagem da madeira

Durante o período de vida da árvore, estarão presentes na estrutura molecular os três tipos de água, quer isto dizer que, aquando do seu abate, o teor em água será substancialmente superior ao ponto de saturação das fibras (PSF). Como referido anteriormente, ao PSF correspon-

derá o preenchimento total das membranas celulares. É costume denominar-se a madeira, imediatamente após o seu abate, por madeira verde, dado o elevado valor do teor em água existente. A partir deste momento, a madeira irá, rapidamente, perder a água livre, durante as fases de transporte, desdobro e aparelhamento, variando os valores de teor em água de 100 a 30% (Almeida, s.d.), até atingir o seu ponto de saturação. Durante este período, a madeira irá perder parte do seu peso, sem variar de volumetria e dimensões, dado que as suas fibras e membranas celulares se mantêm saturadas.

Após a evaporação total da água livre, começa o processo de remoção da água de saturação. Como descrito anteriormente, fruto das tensões internas nas membranas celulares, este processo vai desenrolar-se de forma lenta, até se encontrar um equilíbrio de tensões/pressões entre a humidade ambiente e a água de saturação presente na madeira. Apenas a título de exemplo, considerando uma temperatura ambiente de 20°C e humidade relativa do ar de 65%, na generalidade das espécies, o teor em água da madeira deverá rondar os 12%.

Durante esta fase, a madeira irá variar de peso e dimensões. De uma forma geral, as suas propriedades físicas e mecânicas alterar-se-ão, fruto da variação das membranas celulares. Ao valor de humidade com que a madeira estabiliza, é costume denominar-se por humidade de equilíbrio. Naturalmente que a temperatura ambiente está continuamente a alterar-se, tal como a sua humidade. Desta forma, também as transições de vapores de água, entre a madeira e o ambiente, estão continuamente a desenvolver-se, procurando o seu equilíbrio. Carvalho (1996) apresenta um ábaco (Figura 3.26) para estimar o teor em água de equilíbrio das madeiras portuguesas, em função da temperatura e da humidade relativa ambiente.

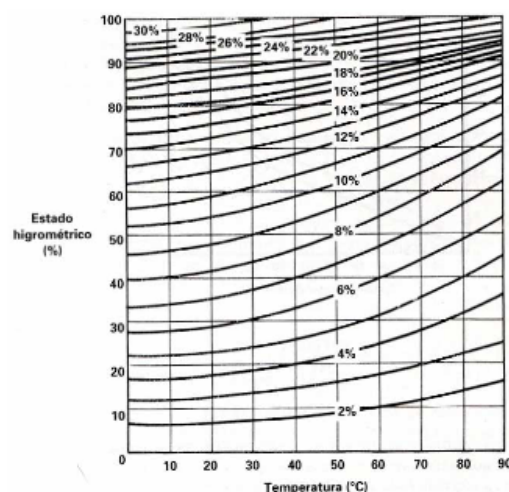


Figura 3.26: Curvas da humidade de equilíbrio da madeira (Carvalho, 1996).

Apesar da Figura 3.26 apresentar, apenas, como variáveis a temperatura e a humidade ambiente para influenciar o teor em água das madeiras, como referido anteriormente, também o estado de tensão e, ainda, a própria composição química da madeira, atuam no fenómeno de sorção da madeira (Jankowsky et al., 1979).

3.4.3 Retração da madeira

Como já foi descrito, à medida que a madeira vai secando, com o seu teor em água abaixo do PSF, o volume e a massa volúmica aparente vão diminuindo, havendo lugar à chamada retração da madeira.

Sendo a madeira um material anisotrópico, também a retração terá comportamentos distintos nas diferentes direções. Desta forma, é criado o conceito de retração linear que consiste no quociente da variação do comprimento de provetes pela sua dimensão, em situação anidra. Relativamente a estas, a retração manifesta-se com maior significado, segundo a direção tangencial, seguindo-se a direção radial. Na direção axial, o efeito de retração é normalmente considerado nulo, ou próximo dele.

No comportamento de retração, não será tão importante o valor absoluto em cada direção, para provocar deficiências ou empenos na madeira, mas sim a diferença entre as duas direções transversais. Para além da denominação de retração linear, é criado o conceito de anisotropia de retração que corresponde ao quociente entre a retração tangencial e a radial. A madeira em que a anisotropia de retração apresente valores mais altos, representará uma maior tendência para o seu empeno e deformação.

Referir ainda que, da mesma forma que existem as retrações lineares, o conceito também se aplicará ao volume do provete, dando origem ao conceito de retração volumétrica. Os valores de retração serão considerados totais, quando estes corresponderem à diminuição do teor em água, desde o seu PSF até ao ponto anidro. Para além disso, existe ainda o conceito de coeficiente de retração que representa a variação de dimensão ou volume do provete, para a diminuição de 1% no teor em água da madeira e serve de base para a classificação das madeiras, relativamente ao seu comportamento, tal como descrito na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Classificação das madeiras em função do seu coeficiente de retração volumétrica α_v (Carvalho, 1966).

Classe	α_v (%)	Comportamento da madeira
Madeira muito nervosa	1,00 a 0,75	Madeira muito sensível a variações de humidade (alto dinamismo higroscópico) (faia; eucalipto)
Madeira nervosa	0,75 a 0,55	Madeira preferencialmente serrada radialmente (carvalhos duros, de rápido crescimento; robínia)
Madeira medianamente nervosa	0,55 a 0,35	Madeira de construção normal (pinho heterogéneo; castanho bravo)
Madeira pouco nervosa	0,35 a 0,15	Madeira de marcenaria, escultura e torneamento (nogueira; resinosas homogéneas; folhosas brandas; carvalho mole, de crescimento lento)

Relembrar que, para além da determinação do correspondente coeficiente de retração volumétrica, será tão ou mais importante ainda a determinação da correspondente anisotropia de retração, de forma a aferir se estamos perante uma madeira difícil de preparar ou de elevada estabilidade global e conseqüente menor propensão para o aparecimento de fendas e empenos resultantes da sua retração. A variabilidade dos valores da retração, nas três direções, explica a maior parte dos defeitos que ocorrem durante a secagem da madeira (Affonso et al., 1999).

Para os conceitos de retração linear e volumétrica e correspondentes coeficientes, estão descritas e definidas as metodologias para os seus cálculos, na norma NP-615 (1973). Na mesma norma, é ainda apresentado o diagrama de retração, no qual se representa graficamente o comportamento geral da madeira quando sujeita à retração, permitindo determinar o PSF.

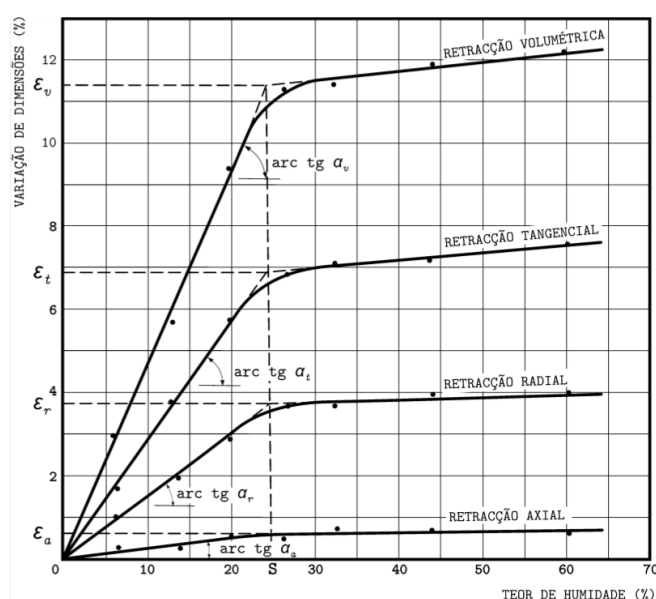


Figura 3.27: Diagrama de retração (NP-615, 1973).

Por fim, apenas referir que inversamente à retração, resultante do processo de secagem, existe a inchamento da madeira, que se verifica no aumento do teor em água abaixo do PSF. O permanente aumento e diminuição do teor em água das madeiras, na procura do seu equilíbrio não sobrepõe as respetivas curvas de adsorção e desadsorção, provocando uma histerese, explicada por Carvalho (1996) e representada na Figura 3.28.

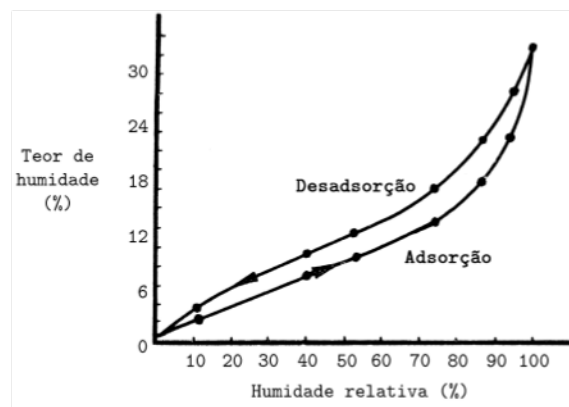


Figura 3.28: Sorção da madeira; Fenómeno de histerese (Carvalho, 1996).

Capítulo 4

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE PEQUENAS DIMENSÕES EM CÂMBALA E SAPELLI

RESUMO: Apresentam-se as campanhas experimentais realizadas, a fim de caracterizar amostras das espécies de Câmbala (*Milicia excelsa*) e de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*), utilizando provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. A caracterização destes provetes baseou-se na quantificação da massa volúmica e na realização de ensaios à flexão em três pontos. Procurou estabelecer-se correlações entre as características de cada espécie, incluindo a possibilidade destas serem definidas a partir de ensaios de ultrassom. Com os ensaios mecânicos, foram determinados o módulo de elasticidade à flexão estática (E_m) e a tensão de rotura à flexão (f_m). A massa volúmica (ρ) de cada provete ensaiado foi aferida e, recorrendo aos ensaios de ultrassom, determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}).

4.1 Introdução

O presente capítulo tem por objetivo caracterizar duas amostras de espécies de madeiras tropicais, recorrendo a ensaios mecânicos em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. As amostras pertencem a pequenos lotes de madeira de Câmbala (*Milicia excelsa*) e de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*), provenientes da República do Congo. Para além da caracterização das espécies, realizaram-se campanhas de ensaios com ultrassons, de modo a estudar a possibilidade de aferir as características mecânicas, com recurso a este método não destrutivo, baseado na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, a partir da velocidade de propagação do som, através do provete.

São descritos os procedimentos desenvolvidos nas campanhas de ensaios para a caracterização mecânica das amostras, através da quantificação da massa volúmica dos provetes, da determinação do módulo de elasticidade e da tensão de rotura à flexão. Com estas três características, denominadas por propriedades de referência, podem ser determinadas as restantes propriedades mecânicas que caracterizam as amostras (CEN, 2009a).

Sublinhar que, em muitos países, vai persistindo o sentimento de que a caracterização das espécies deverá ser realizada através de ensaios em provetes de pequenas dimensões. Dos seus resultados são realizadas deduções posteriores, para a aferição dos valores característicos a utilizar em projeto (Jamil et al., 2013).

4.2 Metodologia

As propriedades de referência das amostras de Câmbala e Sapelli foram obtidas a partir da pesagem e determinação do teor em água dos provetes e da realização de ensaios à flexão estática em 3 pontos, em provetes de pequenas dimensões. Adicionalmente, estudaram-se as possíveis correlações entre as propriedades de cada espécie e, destas, com os resultados de ensaios não destrutivos de ultrassons.

A seleção das amostras das madeiras foi realizada junto de uma empresa importadora de madeiras tropicais, a MT-Madeiras, com a exigência de que as duas espécies teriam a mesma proveniência. Para além disso e de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2010), a recolha das amostras deveria ser o mais equitativa possível, a partir de, pelo menos, 5 árvores diferentes. Desse modo, foram selecionados 5 toros de cada espécie, provenientes da República do Congo. A origem e a espécie da madeira foram identificadas pelos procedimentos de importação

da empresa. Cada toro pertencia a uma árvore diferente e, a partir de cada um, foram extraídos entre 80 a 100 provetes. Nas campanhas de ensaio, não foram definidas, com precisão, as alturas das zonas do lenho da árvore de onde eram provenientes os provetes. Este facto foi relegado, por não ser tido em conta na normalização europeia para a caracterização mecânica das espécies. Simplesmente foram selecionados toros dos corpos centrais das árvores, dos quais se extraíram os provetes.

No total foram selecionados e ensaiados 420 provetes de Câmbala e 495 de Sapelli. A preparação e seleção dos provetes para o ensaio à flexão estática seguiu o preconizado na norma ISO 3133 (ISO, 1975d). Faz-se ainda referência às normas ISO 3130 (ISO, 1975b) e ISO 3129 (ISO, 1975a) que definem os requisitos genéricos para o acondicionamento e preparação dos provetes, antes da realização dos ensaios mecânicos, nomeadamente em termos de temperatura ambiente e humidade relativa do ar.

Na Figura 4.1 apresenta-se um provete tipo utilizado na campanha experimental com secção transversal de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ e comprimento de 34 cm.



Figura 4.1: Provede tipo. a) Câmbala, b) Sapelli.

Na Tabela 4.1 resume-se a campanha experimental realizada, especificando as normas adoptadas em cada procedimento de ensaio.

Tabela 4.1: Campanha experimental realizada.

Propriedade	Norma
Teor em água (w)	ISO 3130
Massa volúmica (ρ)	ISO 3131
Módulo de elasticidade (E) e tensão de rotura (f_m) em flexão	ISO 3133
Ultrassom (UPV)	—

Previamente à realização dos ensaios, os provetes foram acondicionados em câmara climática. De acordo com a norma ISO 3129 (ISO, 1975a), a câmara climática foi regulada para uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar de 65%, de modo a que os provetes atingissem o seu ponto de equilíbrio para um teor em água próximo dos 12%.



Figura 4.2: Câmara climática (Fitoclima walk-in) usada para o acondicionamento dos provetes.

Selecionaram-se, aleatoriamente, 10 provetes de cada espécie, nos quais se fizeram pesagens sucessivas, intercaladas com um mínimo de 6 horas, até estabilizarem. Foi considerado que os provetes estariam em equilíbrio quando, em pesagens sucessivas, a diferença entre as mesmas fosse inferior a 0,5% (ISO, 1975b).

Após todo o processo de recolha, acondicionamento, secagem e estabilização dos provetes, deu-se início à campanha de ensaios, começando-se pela pesagem dos provetes, seguindo-se a realização dos ensaios de ultrassons. Posteriormente, realizaram-se os ensaios à flexão estática até à rotura e, no final, foi cortada uma amostra de cada provete, pesada e colocada numa estufa, até secar completamente, de modo a ser calculado o seu teor em água, aquando da realização dos ensaios.

4.2.1 Determinação do teor em água e da massa volúmica

Apesar da existência de diferentes normas para a determinação da massa volúmica (ρ), considerou-se adequado seguir o procedimento preconizado pela ISO 3131 (ISO, 1975c), dado que, para a determinação do módulo de elasticidade, se optou por seguir a ISO 3133 (ISO, 1975d). Além disso, a norma EN 384 (CEN, 2010) que, mais tarde, será aplicada na determinação das propriedades mecânicas em provetes de dimensões estruturais (ver Capítulo 5), sugere a utilização da ISO 3131 (ISO, 1975b), para a aferição da massa volúmica.

Assim, começou por registar-se as dimensões e pesos dos provetes. Depois dos ensaios de flexão estática, foi cortada uma amostra de 2,5 cm de comprimento de cada provete, o mais

próximo possível da zona de rotura e colocada em estufa a 103° C. Em seguida, as amostras de cada provete foram sendo pesadas, em intervalos mínimos de 6 horas, até estabilizarem e serem consideradas completamente secas. Também para esta situação, segundo a norma ISO 3131 (ISO, 1975b), considerou-se que os provetes estariam em equilíbrio quando, em pesagens sucessivas, a diferença entre as mesmas fosse inferior a 0,5%. As pesagens dos provetes e das pequenas amostras de 2,5 cm retiradas de cada um deles, foram realizadas, usando uma balança de precisão igual a 0,01 g.



Figura 4.3: Balança utilizada para as pesagens dos provetes e das suas amostras.

Os resultados desta análise permitiram verificar desvios significativos em relação ao valor objetivo de teor em água. Consequentemente, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos foram corrigidos para o teor em água de referência. Para a sua correção foram seguidos e comparados os procedimentos preconizados nas normas EN 384 (CEN, 2010) e ISO 3131 (ISO, 1975b). Mais tarde, assumiu-se unicamente a correção realizada através da norma EN 384 (CEN, 2010), devido, essencialmente, à possibilidade de se manter como válidos mais 75 resultados, como se verá nas secções seguintes.

Antes de cada pesagem, as amostras eram colocadas num exsiccador com sílica para arrefecerem sem permuta do teor em água com o ambiente. Após o arrefecimento, eram pesadas de imediato, para evitar alterações da humidade na peça em mais de 0,1%. Segundo a norma ISO 3130 (ISO, 1975b), o teor em água foi calculado a partir da seguinte fórmula:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100 \quad (4.1)$$

em que w representa o teor em água do provete; m_1 a massa do provete antes da secagem; e m_2 , a massa do provete depois de seco.

Com o valor das pesagens dos provetes inteiros (2x2x34 cm³) e com o valor do teor em água de cada um deles, foi possível quantificar a massa volúmica dos mesmos, a partir da expressão 4.2.

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (4.2)$$

em que ρ_w representa a massa volúmica da madeira com o teor em água w ; m_w a massa da madeira com o teor em água w ; e a_w , b_w e l_w , as dimensões do provete com o teor em água w . A norma EN 384 (CEN, 2010), no seu ponto 8, sugere que a correção do valor da massa volúmica seja feita através da redução de 0,5% do valor da pesagem do provete para teores em água acima dos 12%, sendo que abaixo dos 12%, esta correção deva implicar um aumento 0,5% da leitura do seu peso por cada percentagem.

Para efeitos comparativos, optou-se também por se efetuar a correção do valor da massa volúmica, através da norma ISO 3131 (ISO, 1975c). Segundo esta norma, a correção deverá obedecer à fórmula que a seguir se apresenta:

$$\rho_{12} = \rho_w \left[1 - \frac{(1-k)(w-12)}{100} \right] \quad (4.3)$$

em que ρ_{12} representa a massa volúmica da madeira com teor em água de 12%; ρ_w a massa volúmica da madeira com o teor em água w ; k , o coeficiente de volumetria; e w o teor em água na altura do ensaio.

4.2.2 Ensaio com utilização de ultrassom

Após a estabilização dos provetes e da sua medição e pesagem, realizaram-se os ensaios de ultrassom. Estes ensaios consistem na medição do tempo que uma onda de som demora a percorrer o provete na direção longitudinal (direção das fibras). Para a realização do ensaio de ultrassom, foi utilizado o aparelho PROCEQ – Ultrasonic Testing-Tico (Figura 4.4).

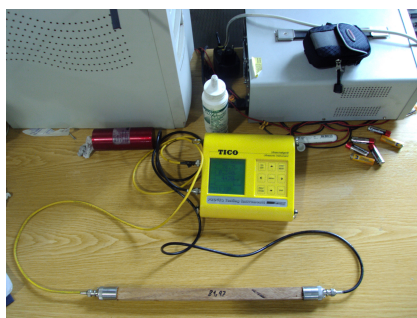


Figura 4.4: Equipamento de ultrassom PROCEQ – Ultrasonic Testing-Tico.

O procedimento de ensaio consiste em acoplar nas extremidades de topo dos provetes, dois sensores de onda. Um dos sensores emite uma onda ultrassónica com frequência de 22 kHz, tendo o outro sensor a função de a receber, medindo o tempo que a onda demora a percorrer o provete. Para um melhor comportamento e percepção da onda, os sensores foram acoplados

aos topos do provete, usando um gel. Com o tempo do percurso da onda e sabendo o comprimento do provete, determinou-se a velocidade de propagação através da seguinte expressão:

$$v = \frac{l}{t} \quad (4.4)$$

em que l corresponde ao comprimento do provete; e t ao tempo que a onda ultrassónica demora a percorrer o provete.

Com a velocidade de propagação da onda ao longo do provete e a sua massa volúmica, é determinada a constante dinâmica, também denominada por módulo de elasticidade dinâmico:

$$C = v^2 \cdot \rho_w \cdot 10^{-6} \quad (4.5)$$

em que C corresponde à constante dinâmica, também representada por E_{din} ; v a velocidade de propagação da onda; e ρ_w a massa volúmica do provete com teor em água w .

De sublinhar que na realização do ensaio do ultrassom, dada a sua sensibilidade e a possível variabilidade de resultados, foram realizadas 3 leituras do tempo de percurso da onda para cada provete, considerando-se como valor final a média entre elas.

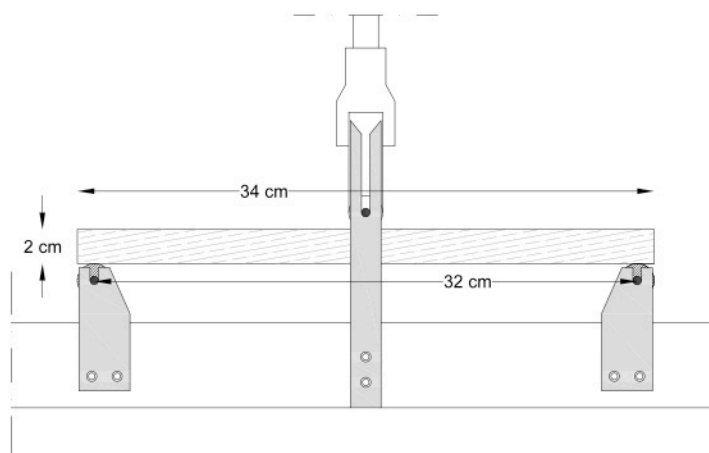
4.2.3 Ensaio à flexão em três pontos

Os ensaios à flexão em três pontos tiveram lugar imediatamente após a realização dos ensaios com o ultrassom, de modo a minimizar a variação do teor em água.

Para a realização dos ensaios à flexão, foram seguidos os procedimentos preconizados na norma ISO 3133 (ISO, 1975d). Esta norma tem por objectivo a determinação da carga máxima requerida para a rotura de um provete e o cálculo da tensão correspondente instalada. De acordo com a norma, os provetes têm que ser em forma prismática, de secção $2 \times 2 \text{ cm}^2$, e o seu comprimento compreendido no intervalo de 30 a 38 cm. A máquina de ensaios consiste num modelo de 2 apoios que, segundo a norma, deveriam ter os seus eixos afastados entre 12 a 16 vezes a altura da secção do provete. Para a campanha de ensaios, foi definido o limite máximo possível para o intervalo de afastamento entre os apoios, de 32 cm. Foi a partir da definição do intervalo entre os apoios que se definiu que o comprimento dos provetes seria de 34 cm.

Cada provete é colocado de forma simétrica entre os apoios e, a meio-vão, é exercida uma carga até à sua rotura. Tanto os apoios, como a superfície de atuação da carga, são de forma cilíndrica. A aplicação da carga é feita a uma velocidade constante, estimada em função da

carga máxima prevista para a rotura. Na Figura 4.5, apresenta-se o sistema de apoio dos provetes com o pêndulo a atuar a meio do vão.



a)



b)

Figura 4.5: Ensaio à flexão em 3 pontos. a) Esquema de ensaio; b) Exemplo de provete a ser ensaiado.

De acordo com a norma ISO 3133 (ISO, 1975d), o limite de resistência do provete deveria ser atingido em 90 segundos, com uma tolerância de mais ou menos 30 segundos, cronometrados desde o princípio do carregamento. Dado o elevado número de provetes de cada espécie e a variabilidade de massas volúmicas entre eles, seria expectável uma grande amplitude entre os valores das cargas de rotura, provocando constantes alterações da velocidade de ação da carga entre os ensaios. Por este motivo, considerou-se adequado a divisão da população total de cada espécie em amostras limitadas pela massa volúmica dos provetes. Baseando-se nas pesagens que foram sendo realizadas antes de se proceder aos ensaios, considerou-se para as duas espécies, 4 grupos de provetes. O primeiro grupo destinou-se aos provetes com menos de 85 g; o segundo, aos provetes compreendidos entre 85 e 100 g; o terceiro, entre 100 e

115 g; e por fim, o quarto grupo para todos os provetes com mais de 115 g. A Tabela 4.2, apresenta os provetes ensaiados para cada espécie, divididos nos 4 grupos definidos.

Tabela 4.2: Divisão da amostra total, em grupos delimitados pelo peso, para efeitos de realização do ensaio à flexão.

Grupos	Espécie	
	Câmbala	Sapelli
≤ 85 g	66	0
> 85 g e ≤ 100 g	95	80
> 100 g e ≤ 115 g	200	344
> 115 g	59	71
Total	420	495

Partindo do valor da carga, imediatamente antes da rotura, para a qual se atingiu a máxima deformação do provete a meio vão, calculou-se a tensão interna com:

$$f_{mw} = \frac{3P_{max}l}{2bh^2} \quad (4.6)$$

em que f_{mw} representa a tensão última à flexão para o teor em água w do provete; P_{max} , a carga de rotura; l , a distância entre os apoios; b , a largura da secção do provete; e h , a altura da secção transversal do provete.

Tal como mencionado, as características mecânicas da madeira são referenciadas para um valor de teor em água de 12%. Apesar de se procurar que todos os provetes ensaiados tivessem exatamente esta percentagem de teor em água, através do seu acondicionamento na câmara climática, esse valor raramente era atingido com precisão. Para a correção dos valores da tensão de rotura para o teor em água de referência, utilizou-se a expressão 4.7, prevista na norma ISO 3133 (ISO, 1975d).

$$\sigma_{b12} = \sigma_{bw} [1 + \alpha(w-12)] \quad (4.7)$$

em que σ_{bw} representa a tensão última à flexão para o teor em água do provete de 12%; α o factor corretivo do teor em água, e w o teor em água da madeira, aquando da realização do ensaio, determinado de acordo com a norma ISO 3130 (ISO, 1975b).

No entanto, este não é o único procedimento de correção do valor da tensão de rotura disponível na literatura. A norma EN 348 (CEN, 2010) sugere que não se aplique qualquer correção de valor da tensão de rotura para os provetes com teor em água superior a 8%, considerando a impossibilidade de correlação para os que sejam ensaiados abaixo dessa percentagem.

Durante a realização de cada ensaio, o equipamento fazia o registo contínuo do valor da força atuante e da deformação provocada a meio vão do provete. Partindo destes registos, foi possível definir graficamente, para cada provete, a relação força-deformação a meio vão. A deformação era registada pelo mesmo eixo que aplicava a força no provete, através de um defletómetro acoplado (ver Figura 4.5).

Na Figura 4.6 apresenta-se um exemplo das curvas experimentais força-deformação registadas nos ensaios de flexão. A totalidade dos resultados da presente campanha de ensaios à flexão em 3 pontos, pode ser consultada no Anexo C da presente tese.

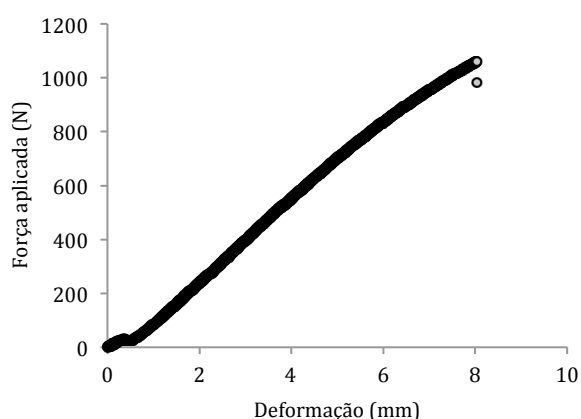


Figura 4.6: Curva experimental força-deformação do ensaio à flexão de um provete de Câmbala (C019).

Definida a curva experimental força-deformação a meio vão, calculou-se o declive, a fim de se determinar o módulo de elasticidade à flexão (E_m). Para isso, procurou assumir-se um princípio que estivesse preconizado nas normas e que fosse o mais semelhante possível. Nesse sentido, aplicou-se a norma EN 408 (CEN, 2012a), referente a vigas de madeira sujeitas à flexão estática, em quatro pontos. Esta norma sugere que o módulo de elasticidade à flexão (E_m) corresponda ao declive da expressão linear adaptada ao gráfico força-deformação. Assim, para cada provete, delimitou-se, no gráfico força-deformação, o intervalo compreendido entre 10 a 40% da força máxima e calculou-se o coeficiente de correlação correspondente. A partir daí, foi utilizada a expressão 4.8 que se apresenta em seguida.

$$E = \frac{l^3(P_2 - P_1)}{48I(w_2 - w_1)} \quad (4.8)$$

em que l representa o vão entre apoios; P_1 corresponde a 10% da força máxima; P_2 , corresponde a 40% da força máxima; w_1 a deformação a meio-vão provocada por P_1 ; e w_2 a deformação a meio vão provocada por P_2 .

Segundo a norma EN 408 (CEN, 2012a), assume-se que a aproximação do E_m ao tramo delimitado está correta, desde que o valor do coeficiente de correlação seja superior a 0,99, caso contrário a norma sugere que o intervalo de delimitação seja reduzido, compreendendo-o entre 20 a 30% da força máxima. Também, para este segundo intervalo, terá de se verificar a regra do coeficiente de correlação ser superior a 0,99. Caso isso não suceda, considera-se não ser possível a obtenção do correspondente E_m , ao ensaio em questão. De referir que para todos os provetes foi possível obter-se o correspondente módulo de elasticidade à flexão.

4.3 Resultados da caracterização mecânica

Nesta secção, apresentam-se os principais resultados experimentais obtidos através dos procedimentos de ensaio descritos no subcapítulo 4.2. Tendo por objetivo a caracterização mecânica das amostras das espécies em estudo, utilizando provetes de pequenas dimensões, foram determinadas as três propriedades de referência: massa volúmica (ρ), módulo de elasticidade à flexão (E_m) e tensão de rotura à flexão (f_m).

4.3.1 Massa volúmica (ρ)

Como descrito no secção 4.2.1, a massa volúmica foi aferida através da pesagem dos provetes, após a sua estabilização e o seu teor em água determinado a partir de uma pequena amostra, retirada de cada provete, com 2,5 cm de comprimento, depois da realização dos ensaios à flexão. Com o valor da pesagem dos provetes e dividindo-os pelos respetivos volumes, determinaram-se as massas volúmicas aparentes.

Para a correção dos valores da massa volúmica para o teor em água de 12%, seguiram-se os procedimentos preconizados nas normas ISO 3131 (ISO, 1975c) e EN 384 (CEN, 2010). De salientar que, segundo a norma ISO 3131 (ISO, 1975c), a correção apenas pode ser efetuada nos provetes cujo teor em água esteja compreendido entre os 7 e os 17%. Segundo a norma EN 384 (CEN, 2010), a mesma correção pode ser feita para todos os provetes, independentemente do teor em água, aquando da realização dos ensaios.

Na Tabela 4.3, apresentam-se os resultados da massa volúmica (ρ), antes e após a correção do teor em água (w) para 12%, segundo os procedimentos preconizados nas normas ISO 3131 (ISO, 1975c) e EN 384 (CEN, 2010) (ρ_{12}).

Tabela 4.3: Valores da massa volúmica dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.

Espécie	Resultados da amostra	No ensaio	Valor do teor em água dos provetes	ISO 3131 (7%<w<17%)	EN 384 (sem limites)
		ρ (kg/m ³)	w (%)	ρ_{12} (kg/m ³)	ρ_{12} (kg/m ³)
Câmbala (420 provetes)	Média	747,27	13,10	748,82	743,12
	C.V. (%)	11,90	17,00	11,80	12,10
	Min.	528,9	8,20	528,33	528,38
	Max.	948,53	22,90	950,16	952,75
	Excluídos	—	—	21	0
Sapelli (495 provetes)	Média	780,61	14,20	778,56	772,2
	C.V. (%)	7,70	17,70	8,00	8,00
	Min.	640,88	8,00	636,93	628,73
	Max.	938,24	22,90	932,89	927,74
	Excluídos	—	—	54	0

Constata-se que a correção do teor em água, através do preconizado pela norma ISO 3131 (ISO, 1975c), obriga a excluir 21 resultados de Câmbala e 54 resultados de Sapelli. No entanto, o resultado final acaba por não se diferenciar da metodologia preconizada pela norma EN 384 (CEN, 2010), havendo uma diferença em relação às médias das massas volúmicas de 0,76% para a Câmbala e de 0,82% para a Sapelli. O facto da diferença ser inferior a 1% entre os dois modelos de correção e considerando a necessidade de abdicar de alguns resultados, segundo o modelo da ISO 3131 (ISO, 1975c), optou-se por assumir a metodologia da norma EN 384 (CEN, 2010), para a correção do teor em água. Nesse sentido, assumiu-se que os valores médios da massa volúmica para a Câmbala e para a Sapelli, correspondentes a um teor em água de 12%, seriam de 743,12 e 772,20 kg/m³, respectivamente.

4.3.2 Determinação da Tensão de Rotura em Flexão (f_m)

A tensão de rotura à flexão foi aferida através da realização do ensaio à flexão em três pontos, utilizando o procedimento de ensaio já descrito anteriormente. De salientar, uma vez mais, a necessidade que existiu de corrigir os valores obtidos nos ensaios para o teor em água de 12%, adoptando as normas ISO 3133 (ISO, 1975d) e a EN 384 (CEN, 2010). Na Tabela 4.4, são apresentados os resultados da tensão de rotura em flexão (f_m) antes da correção do teor em água (w) e após correção para o teor em água para 12%, segundo os procedimentos preconizados nas normas ISO 3133 (ISO, 1975d) e EN 384 (CEN, 2010) (f_{m12}).

Tabela 4.4: Valores da tensão de rotura em flexão dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.

Espécie	Resultados da amostra	No ensaio	Valor do teor em água dos provetes	ISO 3133 (sem limites)	EN 384 (w<8%)
		f_m (MPa)	w (%)	f_{m12} (MPa)	f_{m12} (MPa)
Câmbala (420 provetes)	Média	105,3	13,10	106,45	105,3
	C.V. (%)	31,60	17,00	31,50	31,60
	Min.	16,62	8,20	17,09	16,62
	Max.	171,78	22,90	175,4	171,78
	Excluídos	—	—	0	0
Sapelli (495 provetes)	Média	118,59	14,20	121,08	118,59
	C.V. (%)	19,90	17,70	19,70	19,90
	Min.	39,42	8,00	40	39,42
	Max.	172,74	22,90	175,84	172,74
	Excluídos	—	—	0	0

Relativamente às correções efectuadas para o teor em água de 12%, a norma EN 384 (CEN, 2010) impõe que esta só se possa realizar em provetes cujo teor em água, aquando da realização do ensaio, não seja inferior a 8%. Para os resultados em questão, não houve necessidade de excluir qualquer ensaio. Relativamente aos resultados finais apresentados por cada procedimento de correção, é possível constatar que a diferença é pouco significativa, situando-se em 1,08% para a Câmbala e 2,06% para a Sapelli. Nos capítulos seguintes, vai poder-se constatar que o motivo da escolha da norma para a correção dos valores da tensão de rotura à flexão se prenderá com as correlações realizadas com as outras características, fazendo recair a escolha pelo procedimento preconizado na norma EN 384 (CEN, 2010).

4.3.3 Determinação do Módulo de Elasticidade em Flexão (E_m)

De acordo com o descrito na secção 4.2.3, também a determinação do módulo de elasticidade em flexão, foi realizada a partir dos ensaios à flexão em 3 pontos. Relativamente à correção dos valores apresentados para o teor em água de 12%, refira-se que a mesma só está prevista na EN 384 (CEN, 2010). Segundo a norma, só é possível a correção dos valores para os provetes ensaiados com um teor em água superior a 8%. Desse modo, para o intervalo de 8 a 18% do teor em água, o E_m deve variar na ordem de 1%, por cada valor percentual a ser corrigido, aumentando E_m , se o real valor do teor em água for superior a 12%. Para provetes com teor em água superior a 18%, a correção deve ser feita considerando o teor em água equivalente a 18%.

Na Tabela 4.5, apresentam-se os resultados finais das amostras em Câmbala e Sapelli, relativas ao módulo de elasticidade à flexão (E_m), antes e após correção do teor em água (w) para 12%, segundo a norma EN 384 (CEN, 2010).

Tabela 4.5: Valores do módulo de elasticidade em flexão dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.

Espécie	Resultados da amostra	No ensaio	Valor do teor em água dos provetes	EN 384 (w<8%)
		E_m (GPa)	w (%)	E_{m12} (GPa)
Câmbala (420 provetes)	Média	9,85	13,10	9,95
	C.V. (%)	18,60	17,00	18,50
	Min.	3,7	8,20	3,8
	Max.	13,67	22,90	13,86
	Excluídos	—	—	0
Sapelli (495 provetes)	Média	10,37	14,20	10,56
	C.V. (%)	16,80	17,70	16,30
	Min.	5,68	8,00	5,76
	Max.	15,74	22,90	15,75
	Excluídos	—	—	0

4.3.4 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_{din})

O módulo de elasticidade dinâmico dos provetes foi determinado a partir da velocidade de propagação das ondas de ultrassom e da massa volúmica dos mesmos. Seguindo o procedimento descrito na secção 4.2.2, da realização dos ensaios do ultrassom, registaram-se os tempos que as ondas ultrassónicas necessitam para percorrer o provete longitudinalmente. Sabendo que o seu comprimento é de 34 cm, calculou-se a velocidade da onda.

Esta velocidade é também influenciada pelo teor em água presente nos provetes. Segundo Sandoz (1989), após a realização de ensaios numa espécie conífera, a velocidade de propagação da onda variou na ordem de 0,8%, por cada percentagem de variação do teor em água, sendo esta correção apenas possível no intervalo entre 5 a 30% de teor em água. Também Machado (2000) concluiu que para o Pinho bravo (*Pinus pinaster*), a velocidade da onda diminui com o aumento do teor em água. Na ausência de propostas mais credíveis para a correção da velocidade do ultrassom, em função do teor em água, optou-se por adoptar a correlação definida por Sandoz (1989).

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados da velocidade da onda de ultrassom (v) antes da correção do teor em água (w) para 12% e após a correção do teor em água (v_{12}), obtidas através dos ensaios de ultrassom para os provetes das duas espécies de madeira em estudo.

Tabela 4.6: Valores da velocidade de propagação da onda ultrassônica ao longo dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.

Espécie	Resultados da amostra	No ensaio	Valor do teor em água dos provetes	Sandoz (1989) (5%<w<30%)
		v (m/s)	w (%)	v_{12} (m/s)
Câmbala (420 provetes)	Média	4598,61	13,10	4599,04
	C.V. (%)	8,70	17,00	8,70
	Min.	2791,46	8,20	2791,26
	Max.	5695,14	22,90	5695,47
	Excluídos	—	—	0
Sapelli (495 provetes)	Média	4875,28	14,20	4876,13
	C.V. (%)	6,80	17,70	6,80
	Min.	3244,27	8,00	3244,8
	Max.	5448,72	22,90	5448,75
	Excluídos	—	—	0

Considerando as metodologias de correção do teor em água das normas ISO 3131 (ISO, 1975b) e EN 384 (CEN, 2010) e a correlação admitida por Sandoz (1989) entre a velocidade da propagação da onda ultrassônica e o teor em água, apresentam-se na Tabela 4.7 os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), antes da correção do teor em água (w) para 12% e após a correção do teor em água através das normas ISO 3131 (ISO, 1975b) e EN 384 (CEN, 2010) (E_{din12}).

Tabela 4.7: Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes antes e após a correção para o teor em água para 12%.

Espécie	Resultados da amostra	No ensaio	Valor do teor em água dos provetes	Sandoz (1989) ISO 3131	Sandoz (1989) EN 384
		E_{din} (GPa)	w (%)	E_{din12} (GPa)	E_{din12} (GPa)
Câmbala (420 provetes)	Média	15,97	13,10	16,03	15,88
	C.V. (%)	20,90	17,00	20,90	21,00
	Min.	4,91	8,20	4,83	4,84
	Max.	28,72	22,90	28,67	28,62
	Excluídos	—	—	21	0
Sapelli (495 provetes)	Média	18,69	14,20	18,64	18,49
	C.V. (%)	16,10	17,70	16,40	16,30
	Min.	7,11	8,00	7,08	7,07
	Max.	26,04	22,90	26,04	26,03
	Excluídos	—	—	54	0

Mais uma vez, constata-se que a correção dos resultados, sugerida pelas normas ISO 3131 (ISO, 1975c) e EN 384 (CEN, 2010), tendo em conta os valores do teor em água, apresenta diferenças mínimas, quer para a Câmbala quer para a Sapelli, sendo de 0,94% e 0,8%, respectivamente.

4.4 Correlações entre as propriedades

Neste subcapítulo, apresentam-se os procedimentos de análise das possíveis relações entre as propriedades das espécies de madeira determinadas na campanha experimental. É também analisada a possibilidade de, através de ensaios de ultrassom, se caracterizar a madeira quanto às suas propriedades fundamentais: massa volúmica (ρ), módulo de elasticidade em flexão (E_m) e tensão de rotura em flexão (f_m).

4.4.1 Procedimentos gerais para o estabelecimento das correlações

Determinadas as propriedades de referência e os módulos de elasticidade dinâmicos dos provetes, procuraram-se estabelecer relações entre estas propriedades. Desse modo, numa primeira fase, determinaram-se as expressões lineares de correlação entre as diferentes propriedades, tendo em conta os resultados obtidos diretamente das campanhas de ensaios, sem qualquer tipo de correção do teor de água dos provetes.

Numa segunda fase, foram estudadas as mesmas relações entre as propriedades, mas agora utilizando os valores após a correção do teor em água para 12%. Esta correção visa ir ao encontro das orientações internacionais que definem que os resultados das propriedades da madeira deverão ser referenciados para um teor em água de 12%, de forma a homogeneizar-se internacionalmente as condições de aferição das respectivas propriedades e poderem estabelecer-se comparações entre as diferentes espécies.

A correção dos valores para o teor em água de 12%, foi realizada segundo a metodologia prevista na norma EN 384 (CEN, 2010), em detrimento do procedimento preconizado pela ISO 3133 (ISO, 1975d). A opção deveu-se à conjugação dos resultados obtidos, após a correção dos mesmos, para as diferentes propriedades. Relativamente à correção do valor da massa volúmica, constatou-se que, ao optar-se pelo definido na norma ISO 3131 (ISO, 1975b), haveria a necessidade de serem dispensados 21 resultados de provetes Câmbala e 54 Sapelli (perfazendo um total de 75 resultados), uma vez que, nestes ensaios, o valor do teor em água se encontrava fora do intervalo admissível pela norma para a sua correção (de 7% a 17% de

teor em água do provete). Em relação à correção prevista pela norma EN 384 (CEN, 2010), não é imposta qualquer condição. Desta forma, não se procedeu à dispensa de qualquer resultado, sendo uma mais valia, em termos de dimensão de amostra a analisar.

Quanto à correção do valor de f_m , a norma ISO 3133 (ISO, 1975d) não impõe qualquer intervalo limitativo ao teor em água, para que possa ser efectuada a correção do valor. Segundo a norma EN 384 (CEN, 2010), este limite é imposto, impossibilitando a correção de valores obtidos de provetes que, aquando da realização do ensaio, exibissem teores em água inferiores a 8%. Dado que nenhum provete apresentou um teor em água abaixo dos 8%, aquando da realização do ensaio, não houve lugar à dispensa de resultados. Considerando que f_m seria correlacionada com a massa volúmica e com o E_m , não seria lógico optar-se por diferentes normas na correção dos valores de teor em água, aquando da correlação entre as propriedades. Por estes motivos, também para a propriedade de f_m , se optou por fazer a correção dos valores pelo procedimento da norma EN 384 (CEN, 2010).

Por último, ao analisar o E_{din} , é necessário ter em conta que esta propriedade está dependente da velocidade de propagação da onda de som e da massa volúmica. Relativamente à velocidade da onda, não existe qualquer norma que descreva procedimentos de ensaios, para a determinação das características mecânicas das madeiras, baseados no seu cálculo, ou que proponha a correção do seu valor para o teor em água de 12%. Assim, e como descrito anteriormente, assumiu-se o definido por Sandoz (1989), para a correção do teor em água de 12%. Em relação à massa volúmica, já havia sido assumida e explicada a opção pela correção preconizada pela EN 384 (CEN, 2010). Deste modo, a correção do valor do E_{din} foi assumida através da aplicação da norma EN 384 (CEN, 2010) e do procedimento previsto por Sandoz (1989).

4.4.2 Defeitos em provetes não detetáveis a olho nu e erros na realização dos ensaios

Analisando, pormenorizadamente, os resultados obtidos para as diferentes propriedades, ao longo das amostras, eram observados alguns valores pouco expectáveis. Na procura de uma explicação para esses resultados, foram assumidas três possibilidades: 1) dada a natureza do material, colocou-se a possibilidade do próprio provete conter algum defeito não detetável a olho nu; 2) devido à sensibilidade dos ensaios e em especial do ensaio de ultrassons, colocou-se a possibilidade de, na realização dos mesmos, algum procedimento tivesse sido executado de forma diferenciada; 3) à possibilidade de transcrição errada de valores, por parte do operador, chamados de erros aleatórios ou sistemáticos.

Com a exceção dos valores não expectáveis para a massa volúmica, das três possibilidades apresentadas, procurou detetar-se e eliminar-se, os erros devido à sensibilidade dos ensaios. Entendeu-se que a exclusão dos valores não expectáveis deveria estar dependente das propriedades correlacionadas. Desta forma, se um determinado valor não expectável para uma propriedade, também o fosse na propriedade com a qual se estaria a correlacionar, esse valor não seria excluído, entendendo-se que seria resultante da característica da madeira. Em seguida são apresentados os procedimentos de exclusão dos valores não expectáveis, considerados “anormais”.

4.4.2.1 Massa volúmica

Para a massa volúmica, no caso desta se verificar fora de um determinado intervalo, admitiu-se que os valores anormais fossem resultado da existência de nós não detetados a olho nu ou de vazios. No caso da massa volúmica ser substancialmente superior ao espectável, assumiu-se a possibilidade de existência de lenho de reação. Deste modo, considerou-se para a massa volúmica o conceito de variável independente e determinaram-se os seus valores máximos admissíveis, inferior e superior, usando (Ryan, 2009; Velleman et al., 1981):

$$Outlier(inf) = Q25 - 1,5(Q75 - Q25) \quad (4.9)$$

$$Outlier(sup) = Q75 + 1,5(Q75 - Q25) \quad (4.10)$$

Os *outliers* detetados foram excluídos uma vez, por ter-se entendido que, pela reduzida dimensão dos provetes, qualquer defeito na constituição da massa volúmica iria perturbar o estudo das correlações a estabelecer.

Para a Câmbara não foi detetado qualquer valor anormal, enquanto que para a Sapelli foram detetados dois valores anormais, superiores aos máximos expectáveis, fazendo supor a possibilidade destes provetes conterem lenho de reação.

4.4.2.2. Módulo de elasticidade (E_m) e tensão de rotura em flexão (f_m)

Para além da possibilidade de existência dos defeitos referidos para a massa volúmica, que também afetariam os valores expectáveis de E_m e f_m , a inclinação das fibras em relação ao eixo, defeito de difícil detecção a olho nu em madeiras de folhosas (Ravenshorst et al., 2013), é também uma possibilidade para o aparecimento de resultados substancialmente inferiores ao expectável.

Para a detecção dos valores anormais, na correlação de E_m e f_m com a propriedade da massa volúmica, assumiu-se uma evidência constatada nos resultados apresentados em subcapítulos seguintes. Foi constatado que os resultados destas duas propriedades apresentam uma de-

pendência minimamente moderada com a massa volúmica, permitindo estabelecer uma dependência direta dos seus resultados com os da variação da propriedade da massa volúmica. Desta forma, calcularam-se as expressões das regressões lineares que mais se aproximassem das correlações da massa volúmica com o E_m e da massa volúmica com a f_m . Partindo de cada expressão linear, foram determinados os resíduos da diferença entre os valores expectáveis da expressão definida e os valores reais obtidos dos ensaios. A expressão 4.11 apresenta o modelo de cálculo dos resíduos.

$$\text{Resíduo} = \text{valor obtidos da eq. linear} - \text{valor obtido pelo ensaio} \quad (4.11)$$

Sobre os resíduos, aplicaram-se as expressões 4.9 e 4.10, para a detecção de valores anormais, quer para o E_m , quer para a f_m .

Quando a correlação a estudar se realiza entre estas duas propriedades, uma vez que ambas são obtidas pelo mesmo procedimento de ensaio, e que os possíveis defeitos físicos da madeira afetariam ambas, optou-se, de igual forma, por determinar uma primeira expressão de regressão linear, a partir da qual se determinaria a f_m , em função do E_m . Partindo da expressão linear, calcularam-se os resíduos, de acordo com a expressão 4.11, resultantes da diferença entre o valor expectável de f_m e o valor real obtido. Por fim, aplicaram-se as expressões 4.9 e 4.10, para a determinação dos valores anormais.

Para a correlação destas variáveis com a velocidade de propagação da onda de som, o procedimento baseou-se, numa primeira fase, na exclusão dos valores anormais devidos à sensibilidade da execução do ensaio de ultrassom. Em seguida, para a detecção dos valores anormais de E_m ou f_m , determinaram-se os resíduos da diferença entre os valores expectáveis de E_m ou f_m , em função da velocidade de propagação da onda de som, definidos a partir da expressão da regressão linear obtida da correlação entre a velocidade da onda e o E_m ou f_m . Sobre os resíduos aplicaram-se as expressões 4.9 e 4.10, definindo os resultados dos provetes a excluir.

4.4.2.3 Velocidade de propagação do ultrassom

Relativamente à velocidade de propagação da onda de ultrassom, apesar de não se observar uma correlação linear evidente com a massa volúmica dos provetes, é possível constatar que, de uma forma geral, a velocidade tende a ser maior com o aumento da massa volúmica. Em relação ao ensaio de ultrassom, foi verificada uma enorme sensibilidade na execução do mesmo. Pequenas variações, quer na pressão aplicada às sondas, no segurar destas contra os topos dos provetes, quer na sua centralização, provocavam, imediatamente, alterações nas velocidades de propagação das ondas.

Desse modo, assumiu-se que se os ensaios de ultrassom fossem realizados todos com a mesma qualidade, ter-se-ia obtido uma maior homogeneidade de resultados para a velocidade, em intervalos delimitados pela variação da massa volúmica. Para esta consideração haveria que encontrar uma lógica para a limitação de grupos dentro da amostra, balizados pela massa volúmica dos provetes. Essa lógica foi baseada nos valores das médias das massa volúmicas que delimitam as diferentes Classes de Resistência, previstas na norma EN 338 (CEN, 2009a). Desta forma, foram delimitados 5 grupos dentro das amostras de Câmbala e Sapelli. Um primeiro grupo, para os provetes com massa volúmica inferior à média da Classe de Resistência D30, até a um sexto grupo em que a massa dos provetes estaria compreendida entre as médias das massas volúmicas das Classes de Resistência D50 e D60.

Após a divisão dos provetes por cada grupo, considerou-se ainda que, se o valor anormal da velocidade coincidissem com um valor anormal de E_m ou f_m , não se estaria perante um erro de ensaio, mas de uma confirmação de defeito da madeira. O valor da velocidade só seria considerado anormal se, em cada grupo, os valores anormais não coincidissem com valores anormais de E_m ou de f_m . Desse modo, para cada grupo foram detetados os valores anormais do E_m e da f_m , através das expressões 4.9 e 4.10, aplicadas aos resíduos resultantes das diferenças entre os valores expectáveis da expressão linear da correlação entre estas duas propriedades. Para a velocidade, os valores anormais eram detetados, aplicando as expressões 4.9 e 4.10 em cada intervalo delimitado pelas massas volúmicas das Classes de Resistência.

Desse modo, considerou-se possível detetar valores anormais para a velocidade do ultrassom, quer fossem motivados pela sensibilidade dos ensaios, quer pelos defeitos da madeira não detetados a olho nu. De forma resumida:

- Se um valor anormal detetado na velocidade de propagação da onda coincidissem com um valor anormal detetado no E_m ou na f_m , para cada intervalo, delimitado pelas médias das massas volúmicas das Classes de Resistência, deveria considerar-se esse valor, resultante de defeito da madeira;
- Se um valor anormal fosse apenas detetado na velocidade da propagação da onda, deveria considerar-se resultante da sensibilidade da execução do ensaio.

Para a amostra de Câmbala, foram detetados 14 valores anormais, resultantes da sensibilidade da execução dos ensaios. Para a Sapelli, foram detetados 26 valores. De frisar que no processo de eliminação dos valores anormais em todas as correlações, apenas se procedeu à remoção do primeiro grupo, mesmo que após o reajustamento dos resultados se originassem novos valores anormais.

4.4.3 Eliminação de 5% dos resultados

Por fim, considerou-se a possibilidade de se excluírem os 5% dos resultados que mais se afastassem das expressões de regressão linear obtidas das correlações entre as diferentes propriedades, após eliminação dos respectivos valores anormais. Este princípio foi baseado na definição dos valores característicos da norma EN 384 (CEN, 2010). Para a determinação dos valores característicos das propriedades de resistência, são eliminados os 5% dos valores mais baixos, assumindo-se por valor característico o valor mais baixo, após a eliminação destes valores. Para as expressões de regressão linear, eliminando-se 5% dos valores mais afastados da expressão linear, no máximo, estão a retirar-se os valores mais baixos das propriedades correlacionadas, fazendo coincidir com os 5% dos resultados que se excluíam para a determinação do valor característico da propriedade analisada.

A referida consideração é também utilizada por outros autores, nomeadamente Ravenshorst et al. (2013), aquando do seu estudo sobre a possibilidade de agrupar espécies tropicais dentro do mesmo género, abordado na secção 3.3.3 do presente trabalho. O autor, para a definição da expressão matemática para a correlação entre os valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo a EN 408 (CEN, 2012a), em provetes de dimensão estrutural, com valores médios de tensão de rotura à flexão, em provetes de pequenas dimensões, opta por não englobar 5% dos resultados mais baixos, atendendo à definição de valor característico para as propriedades de resistência mecânica das madeiras.

4.5 Resultados das correlações estabelecidas

Os valores das correlações que, em seguida, se apresentam, dividem-se em 4 fases: 1) numa primeira fase apresentam-se as correlações entre as propriedades a analisar, sem qualquer correção do teor em água, aquando da realização dos ensaios; 2) uma segunda fase em que é feita a correção para o teor em água de 12% dos resultados dos provetes; 3) uma terceira fase em que são excluídos os valores anormais das propriedades a correlacionar, de acordo com descrito na secção 4.4.2; 4) por fim, uma quarta fase em que são excluídos os 5% dos resultados mais afastados da expressão de regressão linear, obtidos na terceira fase da correlação entre as propriedades.

4.5.1 Correlação entre massa volúmica (ρ) com E_m e f_m

Considerando as características determinadas através dos ensaios à flexão em três pontos, nomeadamente o E_m e a f_m , procurou definir-se a correlação de cada uma delas com a massa volúmica e entre elas.

4.5.1.1 Correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m

Para as amostras das duas espécies, a Figura 4.7 apresenta a correlação entre a massa volúmica e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

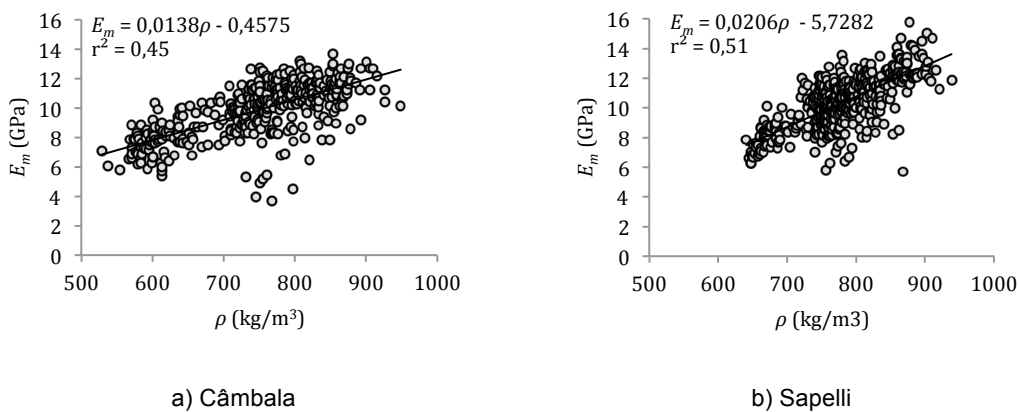


Figura 4.7: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

Em seguida, procedeu-se à correção dos valores para o teor em água de 12%, de acordo com o descrito na secção 4.4.1 (2ª Fase).

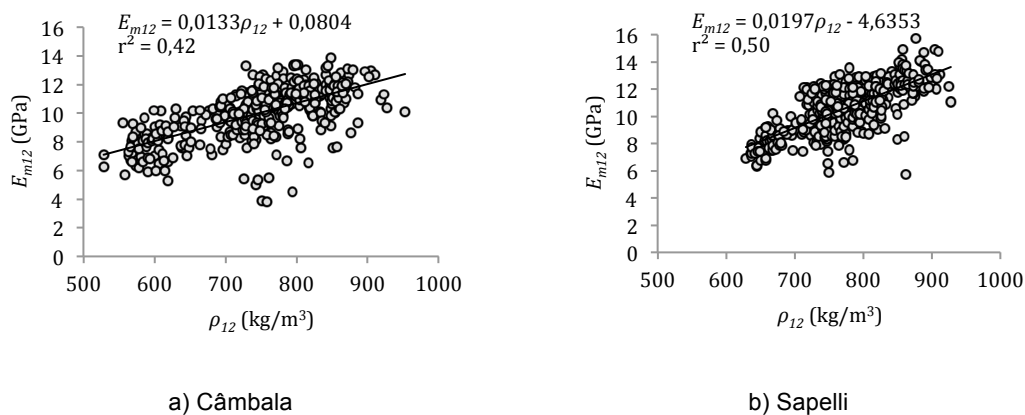


Figura 4.8: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

Após a correção dos resultados, procedeu-se à determinação e eliminação dos valores anormais das duas características, de acordo com o descrito na secção 4.4.2, determinando-se em seguida as novas correlações (3ª Fase).

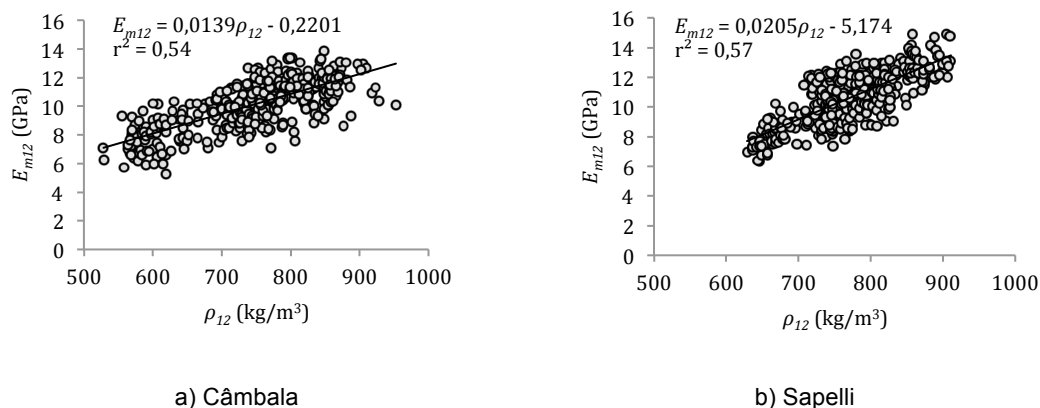


Figura 4.9: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

Por fim, eliminaram-se os 5% dos resultados que mais se afastavam da reta de regressão linear, aferida na 3ª Fase (4ª Fase).

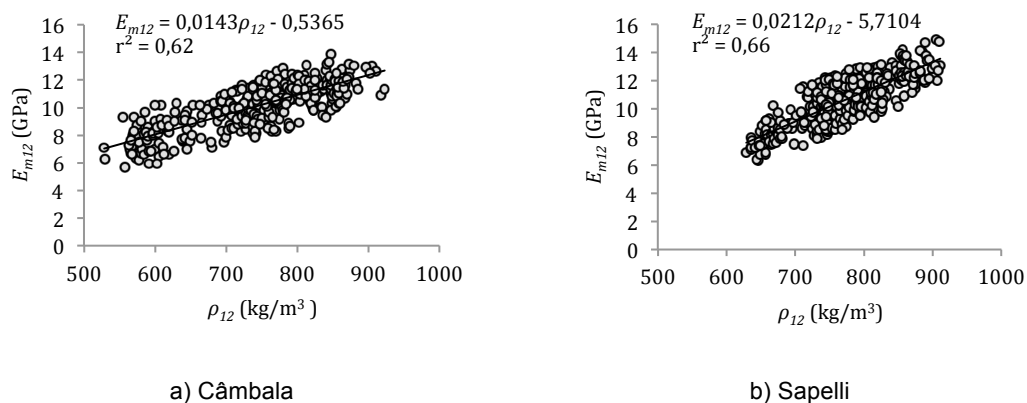


Figura 4.10: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e o E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

A Tabela 4.8, apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 4.8: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m .

Espécie	$\rho - E_m$	Número de provetes	Expressão Regressão linear: $\rho - E_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$E_m = 0,0138\rho - 0,4575$	0,452	0,00%
	2ª Fase	420	$E_m = 0,0133\rho - 0,0804$	0,421	0,00%
	3ª Fase	408	$E_m = 0,0139\rho - 0,2201$	0,544	2,86%
	4ª Fase	388	$E_m = 0,0143\rho - 0,5365$	0,623	4,90%
	Total retirados				7,62%
Sapelli	1ª Fase	495	$E_m = 0,0206\rho - 5,7282$	0,508	0,00%
	2ª Fase	493	$E_m = 0,02\rho - 4,8817$	0,505	0,40%
	3ª Fase	484	$E_m = 0,0205\rho - 5,174$	0,573	1,83%
	4ª Fase	460	$E_m = 0,0212\rho - 5,7104$	0,655	4,96%
	Total retirados				7,07%

4.5.1.2 Correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m

Para o estudo da correlação entre massa volúmica e a f_m , os procedimentos foram muito semelhantes aos descritos na secção anterior. Apresentam-se em seguida, as correlações gráficas, sem correção do teor em água dos provetes (1ª Fase).

A Figura 4.11, apresenta a correlação entre as propriedades sem qualquer correção do teor em água. Na Figura 4.12 as correlações entre as duas características são apresentadas, após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

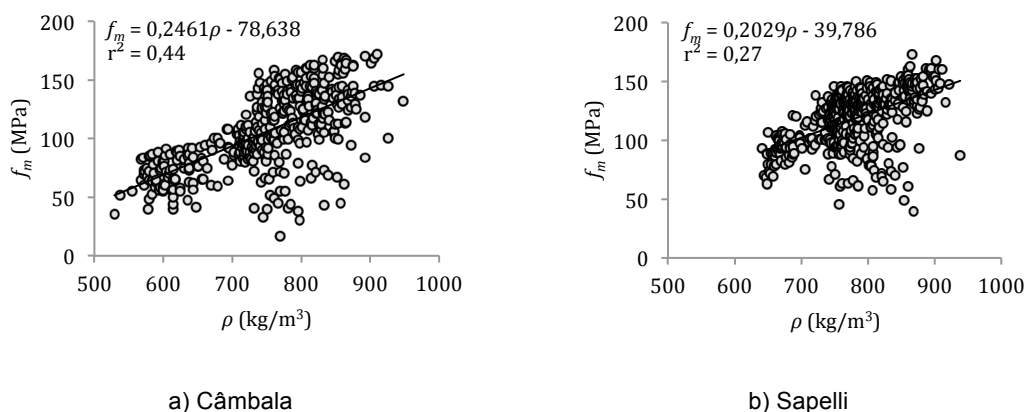


Figura 4.11: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

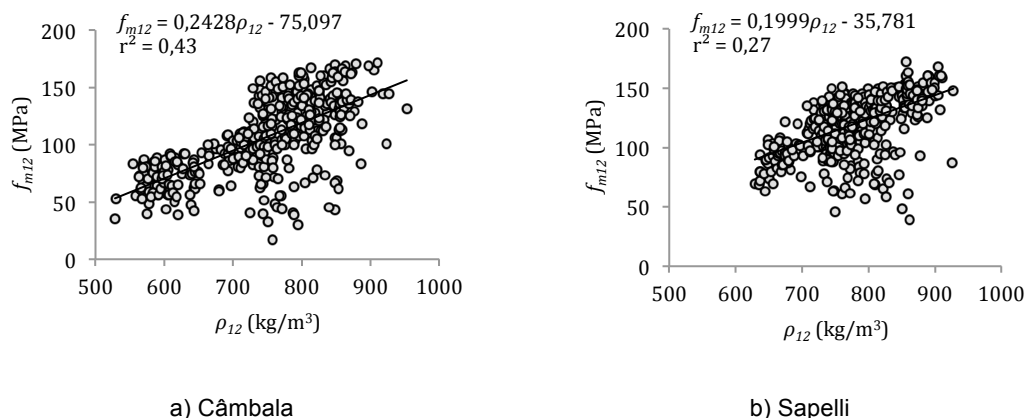


Figura 4.12: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

Em seguida, excluíram-se os valores anormais das duas características, determinando-se as respectivas correlações (3ª Fase).

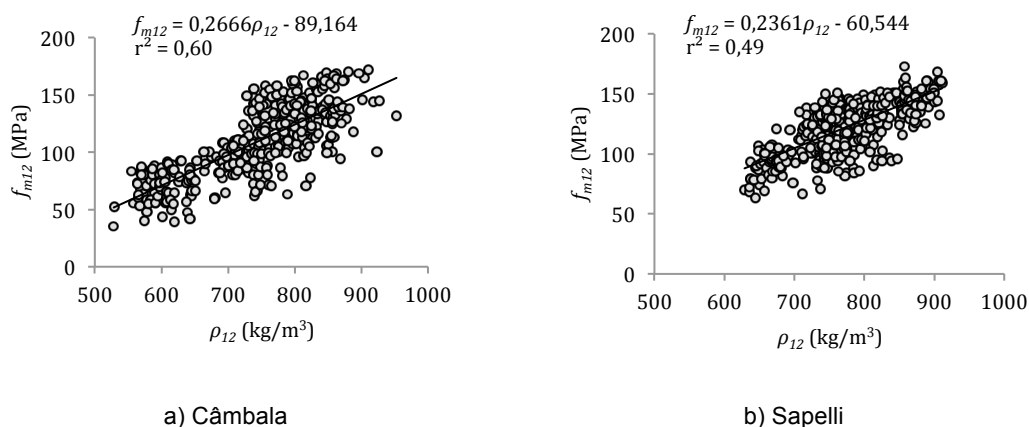


Figura 4.13: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

Por fim, excluíram-se os 5% dos valores mais afastados da equação de regressão linear determinada na 3ª Fase (4ª Fase).

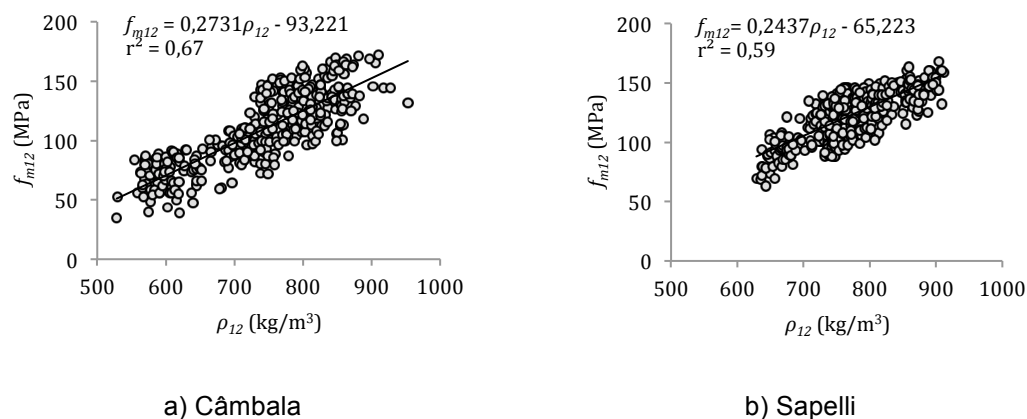


Figura 4.14: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e a f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Resumidamente, na Tabela 4.9, apresentam-se os resultados obtidos em cada fase.

Tabela 4.9: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m

Espécie	$\rho - f_m$	Número de provetes	Expressão de Regressão linear: $\rho - f_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$f_m = 0,2461\rho - 78,638$	0,437	0,00%
	2ª Fase	420	$f_m = 0,2428\rho - 75,097$	0,432	0,00%
	3ª Fase	399	$f_m = 0,266\rho - 89,164$	0,600	5,00%
	4ª Fase	380	$f_m = 0,2731\rho - 93,221$	0,675	4,76%
	Total retirados				9,52%
Sapelli	1ª Fase	495	$f_m = 0,2029\rho - 39,786$	0,265	0,00%
	2ª Fase	493	$f_m = 0,2052\rho - 39,772$	0,282	0,40%
	3ª Fase	469	$f_m = 0,2361\rho - 60,544$	0,487	4,87%
	4ª Fase	446	$f_m = 0,2437\rho - 65,223$	0,586	4,90%
	Total retirados				9,90%

4.5.2 Correlação do E_m com f_m

A Figura 4.15 apresenta o tratamento gráfico da correlação entre as propriedades do E_m e da f_m , sem a correção do teor em água (1ª Fase).

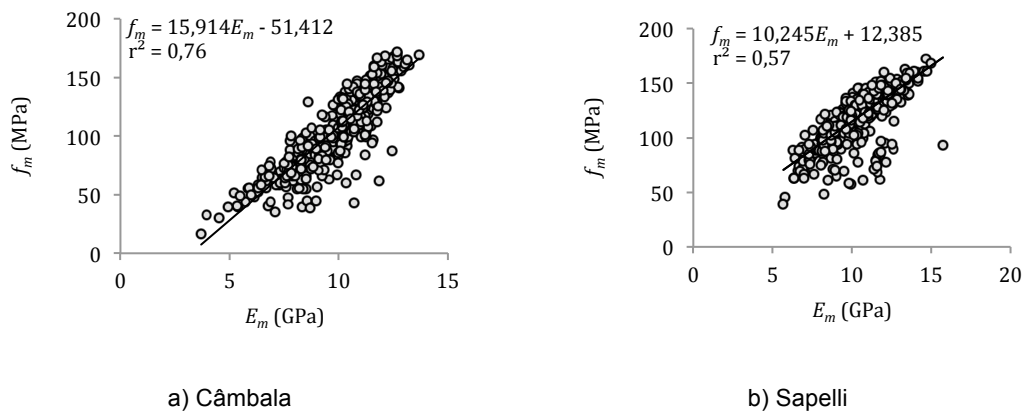


Figura 4.15: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

Procede-se, em seguida, à correção dos valores para o teor em água de referência. A Figura 4.16 apresenta os seus resultados (2ª Fase).

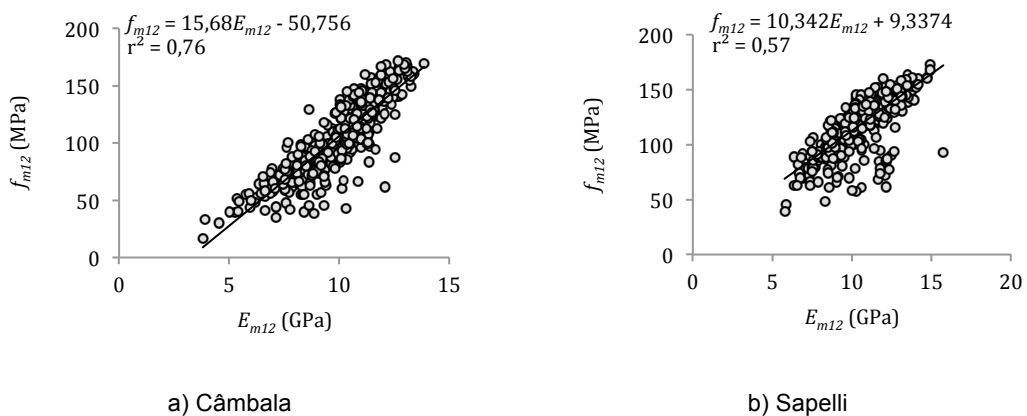


Figura 4.16: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

Em seguida são determinados, simultaneamente, os valores anormais das duas propriedades, de acordo com o descrito na secção 4.4.2, calculando os resíduos em função das expressões de regressão linear definidas na Figura 4.16, e sobre estes aplicando-se as expressões 4.9 e 4.10. Obtiveram-se as novas correlações (3ª Fase), apresentadas na Figura 4.17. Por fim, são excluídos os 5% dos resultados mais afastados das regressões lineares apresentadas graficamente na Figura 4.18 (4ª Fase).

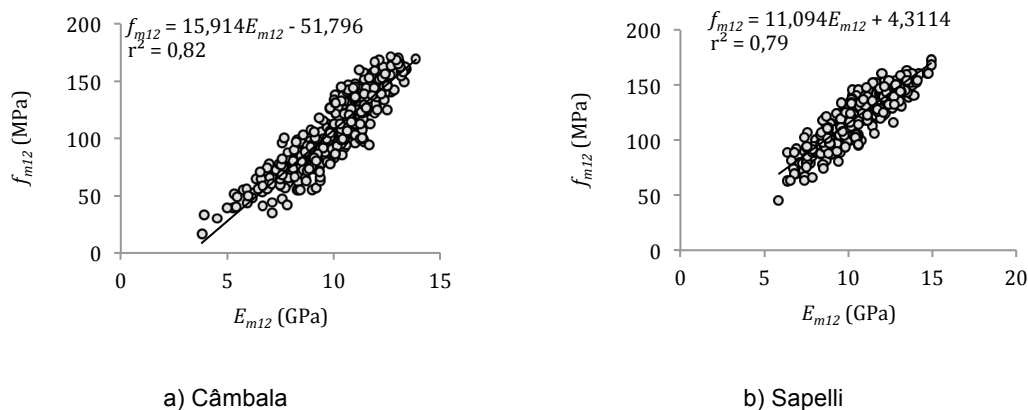


Figura 4.17: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

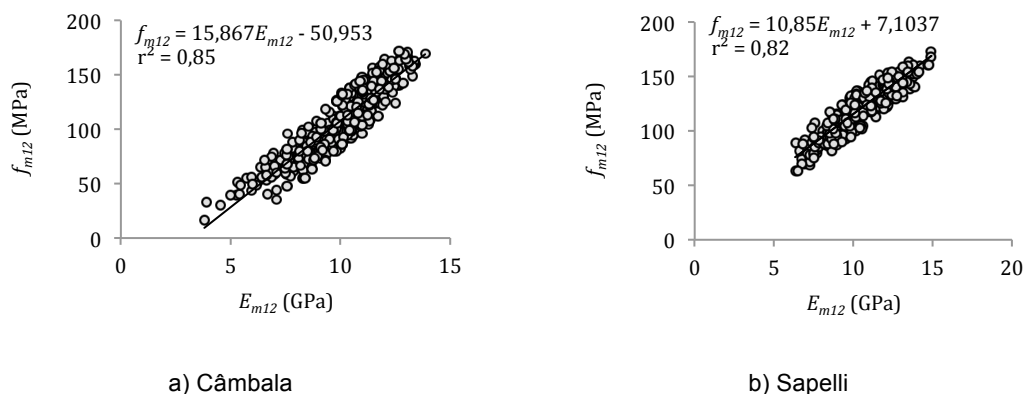


Figura 4.18: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Na Tabela 4.10, é apresentado o resumo dos resultados de todo o procedimento desenvolvido.

Tabela 4.10: Resumo da correlação entre E_m e f_m .

Espécie	$E_m - f_m$	Número de provetes	Expressão de Regressão linear: $E_m - f_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$f_m = 15,914E_m - 51,412$	0,765	0,00%
	2ª Fase	420	$f_m = 15,68E_m - 50,756$	0,756	0,00%
	3ª Fase	408	$f_m = 15,914E_m - 51,796$	0,818	2,86%
	4ª Fase	388	$f_m = 15,867E_m - 50,953$	0,852	4,90%
	Total retirados				7,62%
Sapelli	1ª Fase	495	$f_m = 10,245E_m + 12,385$	0,567	0,00%
	2ª Fase	495	$f_m = 10,342E_m + 9,3374$	0,566	0,00%
	3ª Fase	467	$f_m = 11,094E_m + 4,3114$	0,787	5,66%
	4ª Fase	444	$f_m = 10,85E_m + 7,1037$	0,823	4,93%
	Total retirados				10,30%

4.5.3 Correlação da velocidade de ultrassom (v) com a massa volúmica (ρ)

Nesta secção, estabeleceram-se as correlações entre a velocidade da onda ultrassónica (v), quantificada no ensaio de ultrassom, com a massa volúmica (ρ). Das correlações estabelecidas para as duas amostras, obtiveram-se valores extremamente baixos para os coeficientes de determinação das duas amostras, em todas as fases de procedimento. Por esse motivo, remetam-se as figuras gráficas e os respetivos resultados para o Anexo D do presente trabalho.

À semelhança das correlações anteriores, numa primeira fase, correlacionaram-se as duas propriedades sem correção do teor em água dos provetes, obtendo-se os valores de 0,03 e 0,07, para os coeficientes de determinação (r^2) da Câmbala e da Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.1). Numa segunda fase, foram corrigidos os resultados para o teor em água de referência de 12%. Obtiveram-se os valores de r^2 de 0,03 para a Câmbala e 0,06 para a Sapelli (consultar Anexo D, Figura D.2). Relativamente à propriedade da velocidade de propagação da onda do ultrassom, é importante relembrar a enorme sensibilidade a que este tipo de ensaio está sujeito. Qualquer ação diferenciada, por mais ligeira que seja, dos procedimentos técnicos realizados, pode originar resultados completamente discrepantes dos valores expectáveis (Júnior, 2006) (Feio, 2005). Assim, numa terceira fase, para além dos valores anormais da massa volúmica, excluíram-se os erros de execução dos ensaios de ultrassom, de acordo com o descrito na secção 4.4.2. Determinaram-se os novos r^2 , obtendo-se os valores de 0,01, para a Câmbala e de 0,09, para a Sapelli (consultar Anexo D, Figura D.3). Por fim, excluíram-se os 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear determinadas na fase anterior, obtendo-se os valores de r^2 de 0,03 para a Câmbala e 0,11 para a Sapelli (consultar Anexo D, Figura D.4).

4.5.4 Correlação da velocidade da propagação da onda de som (v) com E_m e f_m

Em seguida, são apresentadas as correlações entre a velocidade do ultrassom com as propriedades do E_m e da f_m . Neste ponto, procurou encontrar-se correlações significativas que permitissem estimar as características mecânicas das espécies em estudo, através do ensaio não destrutivo de ultrassom.

4.5.4.1 Correlação da velocidade de propagação da onda de som (v) com E_m

Nesta secção, tal como na anterior, pelos baixos valores obtidos nas diferentes fases das correlações, remeteram-se as figuras gráficas e os respetivos resultados para o Anexo D do presente trabalho.

Numa primeira fase, começou por estabelecer-se a correlação entre a velocidade do ultrassom e o E_m , sem correção do teor em água dos provetes. Para as amostras de ambas as espécies em estudo, obtiveram-se os valores de 0,31 e 0,24 para os coeficientes de determinação (r^2) da Câmbara e da Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.5).

Numa segunda fase, procedeu-se à correção da velocidade do ultrassom e do E_m para o teor em água de referência de 12% (consultar Anexo D, Figura D.6). Os coeficientes de determinação foram de 0,3 e 0,25, para a Câmbara e para a Sapelli, respectivamente.

Numa terceira fase excluíram-se os valores anormais relativos à velocidade do ultrassom, considerados erros de execução do ensaio. São ainda calculados os resíduos da regressão linear e excluídos os seus valores anormais, utilizando as expressões 4.9 e 4.10. Estes valores serão considerados como os outliers do E_m . No final, obtiveram-se os valores r^2 de 0,47 para a Câmbara e 0,29 para a Sapelli (consultar Anexo D, Figura D.7).

Por fim, numa quarta fase, retiram-se os 5% dos valores mais afastados das retas de regressão lineares determinadas a partir das correlações obtidas na terceira fase, obtendo-se os valores de r^2 de 0,56 para a Câmbara e de 0,36 para a Sapelli (consultar Anexo D, Figura D.8).

4.5.4.2 Correlação da velocidade de propagação da onda de som (v) com f_m

Também para a correlação da velocidade de propagação da onda de som, com a tensão de rotura à flexão obtiveram-se valores de r^2 pouco significativos, remetendo-se as figuras gráficas e os respectivos resultados para o Anexo D do presente trabalho.

O processo desenvolvido para a correlação da velocidade de propagação da onda de som com a f_m , desenrolou-se de forma similar à correlação anterior. Numa primeira fase, começou por determinar-se a correlação entre a velocidade do ultrassom com a f_m , sem correção do teor em água dos provetes, obtendo-se valores de r^2 de 0,15 e 0,18, para a Câmbara e Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.9).

Numa segunda fase, procedeu-se à correção dos valores para o teor em água de 12%, obtendo-se valores de r^2 semelhantes, de 0,15 e 0,18, para a Câmbara e Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.10).

Partindo das novas expressões de regressão linear, numa terceira fase, começou por excluir-se os valores anormais da velocidade de ultrassom. Determinou-se a nova expressão de regressão linear e, em seguida, foram determinados os seus resíduos e calculados os seus valores “anormais”, de acordo com o descrito na secção 4.4.2. Estes pares de resultados foram

considerados como sendo os valores anormais da f_m . Obtiveram-se valores de r^2 de 0,24 e 0,28 para a Câmbala e Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.11).

Numa quarta fase, excluíram-se os 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear, definidas na fase anterior. Obtiveram-se valores de r^2 de 0,35 e 0,38 para a Câmbala e Sapelli, respectivamente (consultar Anexo D, Figura D.12).

4.5.5 Correlação da velocidade de propagação do som e massa volúmica com E_m e f_m

Por fim, associou-se a massa volúmica à velocidade do ultrassom. Esta conjugação permite que se determine o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) das madeiras.

4.5.5.1 Correlação de E_{din} com E_m

À semelhança de todas as outras correlações, começou por determinar-se a correlação entre E_{din} e E_m , sem correção do teor em água (Figura 4.19) (1ª Fase).

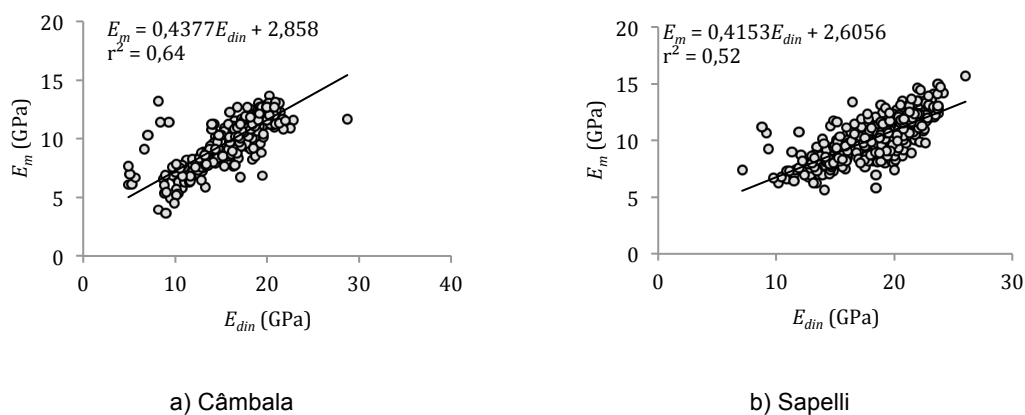
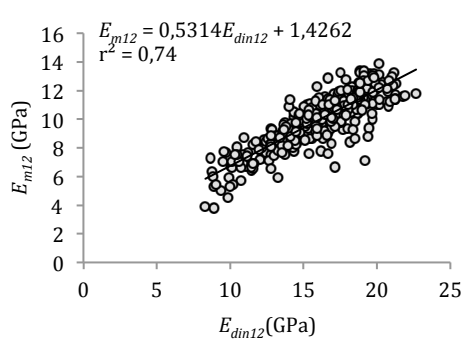
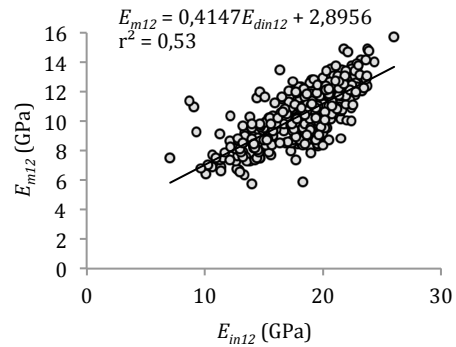


Figura 4.19: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

Em seguida, procedeu-se à correção dos valores para o teor em água de 12% (Figura 4.20) (2ª Fase).



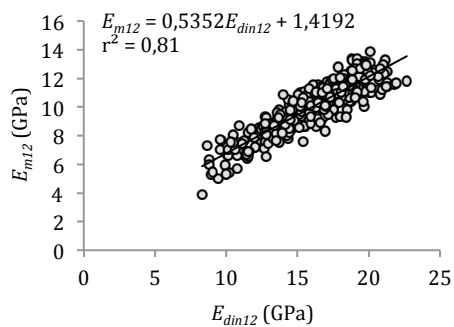
a) Câmbala



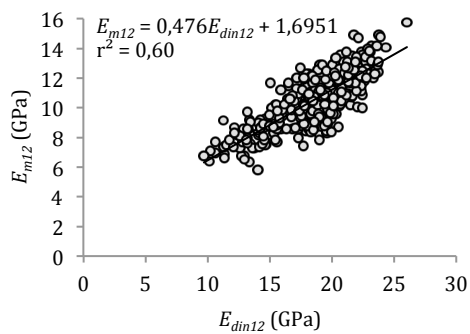
b) Sapelli

Figura 4.20: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

Foram depois determinados e excluídos os valores anormais das propriedades envolvidas. Na Figura 4.21 apresentam-se as novas correlações (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 4.21: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

No final, foram excluídos os 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear, determinadas na fase anterior. A Figura 4.22 apresenta graficamente as novas correlações (4ª Fase).

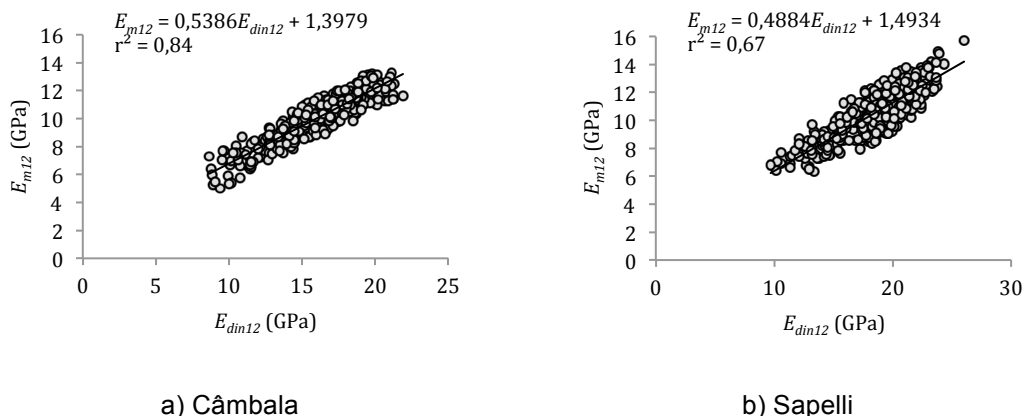


Figura 4.22: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

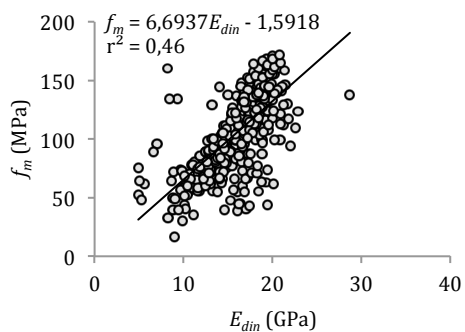
Apresenta-se o resumo dos resultados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resumo da correlação entre E_{din} e E_m .

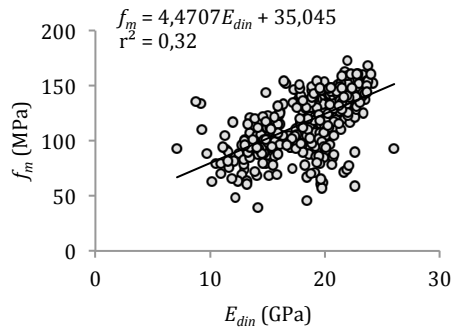
Espécie	$E_{din} - E_m$	Número de provetes	Expressão de Regressão linear: $E_{din} - E_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$E_m = 0,4377E_{din} + 2,858$	0,640	0,00%
	2ª Fase	420	$E_m = 0,4349E_{din} + 3,0454$	0,620	0,00%
	3ª Fase	391	$E_m = 0,5352E_{din} + 1,4192$	0,806	6,90%
	4ª Fase	372	$E_m = 0,5386E_{din} + 1,3979$	0,841	4,86%
	Total retirados				11,43%
Sapelli	1ª Fase	495	$E_m = 0,4153E_{din} + 2,6056$	0,518	0,00%
	2ª Fase	495	$E_m = 0,4147E_{din} + 2,8956$	0,529	0,00%
	3ª Fase	464	$E_m = 0,476E_{din} + 1,6951$	0,600	6,26%
	4ª Fase	441	$E_m = 0,4884E_{din} + 1,4934$	0,671	4,96%
	Total retirados				10,91%

4.5.5.2 Correlação de E_{din} com f_m

Na correlação de E_{din} com f_m , seguiu-se um procedimento similar à correlação anterior, entre E_{din} e E_m . Começou por calcular-se a correlação entre as duas variáveis, E_{din} e f_m , sem alteração do teor em água dos provetes (Figura 4.23) (1ª Fase). Seguiu-se a correção dos valores para o teor em água de 12%. A Figura 4.24 apresenta as novas correlações (2ª Fase).

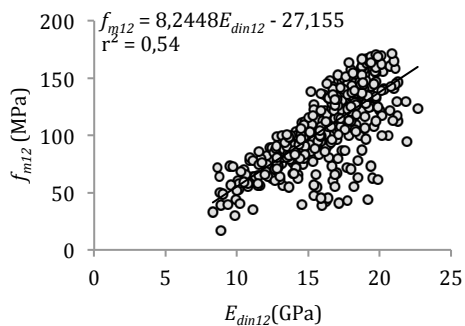


a) Câmbala

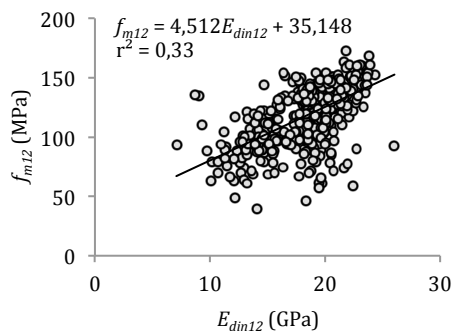


b) Sapelli

Figura 4.23: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , em correção do teor em água (1ª Fase).



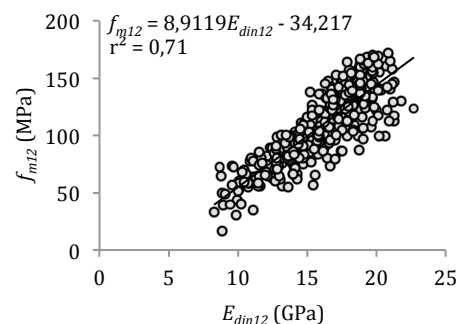
a) Câmbala



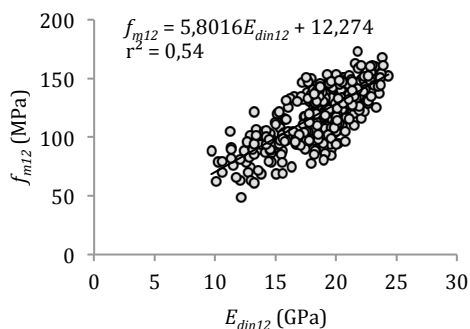
b) Sapelli

Figura 4.24: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

Em seguida, são excluídos os valores anormais das características envolvidas (Figura 4.25) (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 4.25: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

À semelhança de todos os outros procedimentos de correlação no final, foram excluídos os 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear, determinadas na fase anterior (4ª Fase). A Figura 4.26 apresenta graficamente as correlações finais.

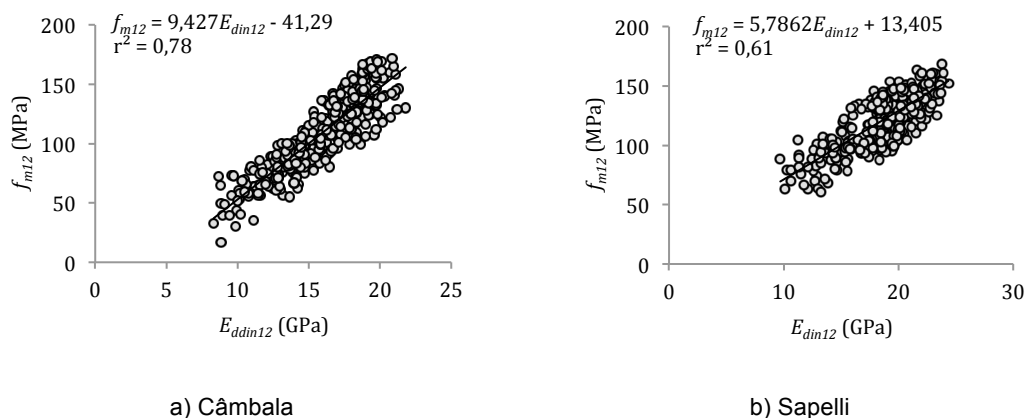


Figura 4.26: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Apresenta-se em seguida, o resumo dos resultados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Resumo da correlação entre E_{din} e f_m .

Espécie	$E_{din} - f_m$	Número de provetes	Expressão de Regressão linear: $E_{din} - f_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$f_m = 6,6937E_{din} - 1,5918$	0,455	0,00%
	2ª Fase	420	$f_m = 6,6927E_{din} - 1,0045$	0,452	0,00%
	3ª Fase	383	$f_m = 8,9119E_{din} - 34,217$	0,708	8,81%
	4ª Fase	364	$f_m = 9,427E_{din} - 41,29$	0,781	4,96%
	Total retirados				13,33%
Sapelli	1ª Fase	495	$f_m = 4,4707E_{din} + 35,045$	0,324	0,00%
	2ª Fase	495	$f_m = 4,512E_{din} + 35,148$	0,331	0,00%
	3ª Fase	447	$f_m = 5,8016E_{din} + 12,274$	0,542	9,70%
	4ª Fase	425	$f_m = 5,7862E_{din} + 13,405$	0,610	4,92%
	Total retirados				14,14%

Capítulo 5

CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DE DIFERENTES ESCALAS E ENSAIOS

—

RESUMO: No presente capítulo é descrita a campanha de ensaios em provetes de dimensão estrutural das espécies Câmbala e Sapelli. Posteriormente, foram extraídos provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos e realizada nova campanha de ensaios semelhante à preconizada no Capítulo 4. Pretendeu correlacionar-se os resultados de ensaios à flexão, obtidos dos provetes de dimensões estruturais, com os de provetes de pequenas dimensões. Os resultados experimentais do presente capítulo são também correlacionáveis com os obtidos no Capítulo 4. Por fim, foram ainda extraídos mesoprovetes dos provetes de dimensões estruturais, que se sujeitaram a ensaios à tração na direção das fibras. O seus resultados foram correlacionados com os resultados obtidos dos ensaios à flexão, em provetes de dimensões estruturais.

5.1 Introdução

O presente capítulo tem por principal objectivo a caracterização de amostras das espécies Câmbala e Sapelli, provenientes do mesmo país, República do Congo, das amostras de provetes de pequenas dimensões, analisadas no Capítulo 4. Desta vez, para além da caracterização de amostras, tendo por base provetes de pequenas dimensões, foram também ensaiadas à flexão 5 vigas, à escala real de cada espécie, de acordo com o procedimento descrito na norma EN 408 (CEN, 2012a). Foi também realizada uma campanha de ensaios à tração, na direcção paralela das fibras, a partir da preparação de mesoprovetes, extraídos dessas mesmas vigas.

O facto de se escolherem as mesmas espécies de madeira e com a mesma origem, prendeu-se com o objetivo de avaliar a homogeneidade das propriedades de referência, dentro da mesma espécie. Nesse sentido, foram comparados os resultados do presente capítulo, com os obtidos no Capítulo 4, resultantes de amostras recolhidas de diferentes lotes de madeira, apesar de serem ambas provenientes do mesmo país. Este objectivo tem relevância, pelo facto de as florestas tropicais serem caracterizadas pela elevada heterogeneidade de espécies e pela influência direta do meio envolvente nas propriedades físicas dos espécimes, podendo influenciar, de forma acentuada, as características mecânicas das madeiras, dentro da mesma espécie (Zimmerman et al., 2012; Ouinsavia and Sokpon, 2010).

Os ensaios aqui descritos têm ainda por objetivo estabelecer tendências de correlação entre as várias propriedades quantificadas. Procurando reduzir ao máximo os factores que poderiam influenciar a determinação das correlações, os provetes de pequenas dimensões sem defeitos e os mesoprovetes foram extraídos dos provetes de dimensão estrutural.

Das correlações estudadas, procurou estabelecer-se um procedimento simples, fiável e económico, que permitisse aferir os valores de cálculo a utilizar em projeto de estruturas, para a aplicação das madeiras da mesma espécie e com a mesma proveniência das amostras ensaiadas.

5.2 Metodologia

Tendo presente o principal objectivo da campanha de ensaios a realizar, para cada espécie houve a necessidade de os provetes de pequenas dimensões serem extraídos de, pelo menos, 5 árvores diferentes, de acordo com a EN 384 (CEN, 2010). Por esse motivo, junto da mesma empresa que forneceu as amostras para a campanha de ensaios do Capítulo 4, MT-Madeiras, foram seleccionados 5 toros de árvores diferentes. De cada toro foi extraída uma viga para ensaio à flexão. Mais uma vez, não foram definidas com precisão as zonas do lenho da árvore de

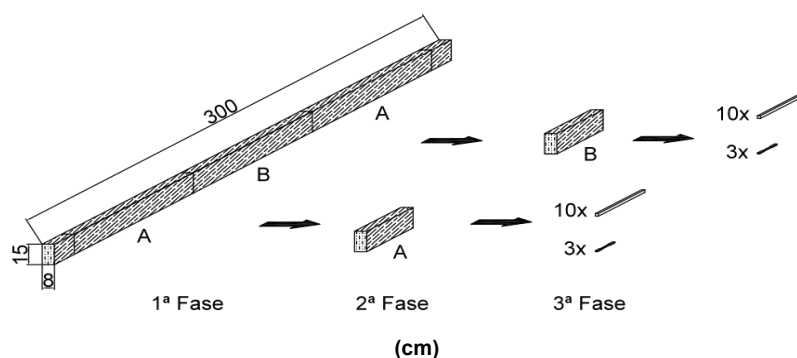
onde eram provenientes os provetes. Foram selecionados toros dos corpos centrais das árvores, dos quais se extraíram os provetes de dimensão estrutural.

Relativamente à extração das vigas dos toros, houve a preocupação com que as mesmas preenchessem todos os requisitos visuais impostos pela norma BS 5756 (2007), para que às vigas se pudesse atribuir a Classe de Resistência D40, de acordo com o descrito para as espécies de Câmbala e Sapelli.

As vigas foram armazenadas no laboratório de estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde permaneceram cerca de 30 dias, antes se proceder à inspeção visual. Em seguida, foram ensaiadas à flexão estática em 4 pontos, até à rotura. Após a realização dos ensaios, extraíram-se pequenos blocos das vigas, a partir dos quais foram preparados provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, para serem sujeitos a ensaios de flexão. Dos mesmos blocos, foram ainda preparados mesoprovetes para serem ensaiados à tração na direção das fibras. Tendo em conta que as vigas foram sujeitas a ensaios de flexão em 4 pontos, procurou-se que um dos blocos fosse extraído da parte central da viga, zona de rotura (entre carregamentos) e um segundo, próximo das zonas de apoio.

Esta preocupação prendeu-se com o facto de, na zona de rotura, a viga estar apenas sujeita a esforços de flexão, enquanto que nas zonas próximas dos apoios, apesar do esforço de flexão ser menor, as vigas estavam também sujeitas a esforços transversos. De cada bloco, foi possível preparar-se 10 provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos e 3 mesoprovetes. Desta forma, por cada viga ensaiada à flexão em 4 pontos, foram realizados mais 20 ensaios à flexão, em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos e 6 ensaios à tração paralela às fibras, em mesoprovetes.

Na Figura 5.1, apresenta-se a proveniência dos blocos de madeira, dos provetes de pequenas dimensões ensaiados à flexão e dos mesoprovetes ensaiados à tração paralela às fibras.



Legenda: A) Zona compreendida entre o apoio e a primeira ação de força; B) Zona de rotura (entre as forças); 1ª Fase) Elementos estruturais de viga; 2ª Fase) 1 bloco retirado da zona A e outro da zona B; 3ª Fase) Extração de 10 provetes de pequenas dimensões e 3 mesoprovetes de cada bloco.

Figura 5.1: Modelo de proveniência dos provetes de pequenas dimensões após ensaio à flexão das vigas à escala real.

A Tabela 5.1 procura resumir o número de provetes para cada campanha de ensaios.

Tabela 5.1: Número de provetes por campanha de ensaios.

Espécie	Vigas à escala real	Provetes de pequenas dimensões	Mesoprovetes
Câmbala	5	98	27
Sapelli	5	98	29

5.2.1 Classificação visual das vigas

De acordo com o descrito na secção anterior, antes de se proceder aos ensaios de flexão das vigas, realizou-se a classificação visual, segundo os critérios definidos na norma BS 5756 (2007). Sublinhar uma vez mais que, com base nesta norma, é atribuída às espécies de Câmbala, oriunda de toda a África Ocidental, e de Sapelli, proveniente da África Central Ocidental, a Classe de Resistência D40.

Para além da confirmação das espécies dos provetes e da sua proveniência, um dos primeiros aspectos a ser verificado são as dimensões da peça e os seus desvios admissíveis. Para a verificação deste requisito, a norma EN 336 (CEN, 2013a) preconiza os procedimentos necessários.

Para além das dimensões das vigas, foram analisadas as seguintes características visuais: existência de nós e as suas dimensões, segundo a própria BS 5756 (2007); o ângulo de desvio do alinhamento das fibras em relação ao eixo longitudinal dos elementos, segundo a EN 1310 (CEN, 1997c); o descaio das arestas, segundo as expressões 3.8 e 3.9 do presente trabalho, previstas na BS 5756 (2007); a medição das fissuras na altura da classificação das vigas, segundo a EN 1310 (CEN, 1997c); a presença de manchas na madeira; e a existência de possíveis empenos em arco de face, de canto, em hélice, ou em meia cana.

Das 5 vigas de cada espécie, 4 delas preencheram todos os requisitos exigidos pela norma BS 5756 (2007), os quais se resumem na Figura 5.2. As vigas número 1 de ambas as espécies (numeração que identificará as vigas no tratamento e análise dos resultados dos ensaios), apresentaram fendas, ao longo dos elementos, que ultrapassavam os limites admissíveis definidos na norma e que viriam a provocar a ruptura destas para valores significativamente inferiores aos obtidos pelas restantes vigas.

Tabela 5.2: Limites permitidos para as classes de resistência, para os elementos estruturais em madeira de folhosa tropical (BS 5756, 2007).

Característica	Valor
Dimensões	Secção transversal mínima 2000 mm ² . Espessura mínima 20 mm.
Nós	
Tamanho	Inferior a 1/4 da largura da secção em que se encontra.
Separação longitudinal	São considerados nós cumulativos se a separação longitudinal for inferior a duas vezes a largura da sua secção, ou se o fio não estiver totalmente recuperado do desalinhamento.
Inclinação do fio	Inferior a 1/11. Fibras entre nós não devem ter inclinação superior a 1/4.
Fendas	
sem ser através da espessura	Não superior a 1 m ou 1/4 do comprimento da peça, o que for menor.
através da espessura	Só permitido nos topos com um comprimento inferior à largura da peça.
Descaio	As dimensões totais dos topos e das faces não devem ser reduzidas para menos de 2/3 das dimensões da peça. O comprimento do descaio é ilimitado.
Empenos	
em arco de face	Não superior a 10 mm num comprimento de 2 m.
em arco de canto	Não superior a 8 mm num comprimento de 2 m.
em hélice	Não superior a 1 mm por largura de 25 mm, ao longo de um comprimento de 2 m.
em meia-cana	Ilimitado
Casca inclusa e bolsas de floema:	
cruzando o fim	Não superior à largura da peça.
não cruzando o fim	Não superior a 1,5 vezes a largura, ou não superior a 0,2 vezes o comprimento da peça, o que for menor.
Coração encravado	Não permitido se a espessura da peça for de 100 mm ou menos, ou se a largura for de 225 mm ou menos.
Danos biológicos e outros defeitos	Orifícios de vermes ou pequenos orifícios são permitidos, desde que estejam de acordo com os requisitos em 4.8. Não é permitida infestação ativa. Nenhuma decadência é permitida além de nós não saudáveis. Decaimento sem mancha, permitida (ver 4.8).
Outros defeitos	Ver 4.8
Nota: O comprimento das fissuras e a quantidade de distorção estão ligados ao teor de humidade, portanto, os limites fornecidos só podem ser aplicáveis no momento da classificação.	

Assim, segundo norma, com a exceção das vigas 1, foi atribuída a Classe de Resistência de D40 às vigas de ambas as espécies.

5.2.2 Ensaio à flexão em vigas

Os ensaios das vigas à flexão tiveram como objectivo, para além da caracterização dos provetes segundo os procedimentos previstos na norma EN 408 (CEN, 2012a), a possibilidade de se avaliar uma tendência de correlação com os resultados obtidos através dos ensaios à flexão, em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.

Uma vez que a ambas as espécies é atribuída a Classe de Resistência D40, optou-se por seguir os procedimentos previstos na norma EN 408 (CEN, 2012a), de forma a poder comparar-se os resultados finais com os valores característicos previstos na EN 338 (CEN, 2009a).

Relativamente ao número de provetes a ensaiar, a norma EN 384 (CEN, 2010) define o número mínimo de 34 para a verificação da média do módulo de elasticidade e de 40 para a verificação da tensão de rotura. Ambos os valores estarão dependentes do coeficiente de variação (COV) da amostra, podendo, no limite, ser de 140, para um COV > 35%, no caso da média do módulo de elasticidade; e de 411, para um COV > 40%, no caso da tensão de rotura à flexão. No entanto, o elevado custo das madeiras mas, acima de tudo, a intenção de se desenvolver um procedimento expedito que consumisse o mínimo de madeira possível, indo ao encontro da atual realidade da importação de pequenos lotes de madeiras tropicais da mesma espécie, levou a que se optasse por ensaiar 5 vigas de cada espécie.

Foram seguidos os procedimentos preconizados pela norma EN 408 (CEN, 2012a) e já descritos na secção 3.1.1 do presente estudo. A Figura 5.2, resume o esquema de ensaio realizado.

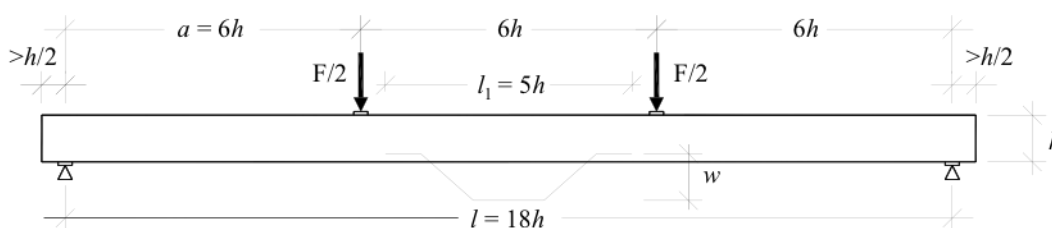


Figura 5.2: Esquema de ensaio à flexão de vigas à escala estrutural (CEN, 2012a).

Após a recepção das vigas, estas foram armazenadas no laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho durante, aproximadamente, 30 dias. Este facto, teve por objetivo, procurar estabilizar as madeiras para um teor em água de 20%. Teor este, previsto, como um valor médio nos elementos estruturais de madeira.

O equipamento de ensaio foi constituído por um pórtico metálico, onde estava fixado, ao centro da viga superior, um actuador hidráulico, responsável pela aplicação da carga. O actuador continha um dispositivo interno para a medição do deslocamento aplicado. Este dispositivo serviu para validar os valores da deformação registados pelo LVDT aplicado a meio vão da viga.

A Figura 5.3 apresenta um exemplo de um dos ensaios à flexão realizados em vigas.



Figura 5.3: Exemplo de um ensaio à flexão de uma viga.

Após a realização de cada ensaio, foram aferidos os valores do teor em água das vigas, o mais próximo possível da zona de rotura da peça e a correspondente massa volúmica. Para a determinação do teor em água, seguindo a norma EN 408 (CEN, 2012a), procedeu-se de acordo com o preconizado na norma EN 13183-1 (CEN, 2002). De cada viga, foi cortado um paralelepípedo com 20 mm de aresta, numa secção situada perto da zona de rotura. Em seguida, pesaram-se as amostras retiradas das vigas e secaram-se a uma temperatura de 103°C. Foram-se fazendo pesagens intercaladas, com o mínimo de duas horas, até que a diferença entre pesagens sucessivas fosse inferior a 0,1% da massa.

Para a determinação do valor do teor em água, aplicou-se a expressão 4.1, referida no Capítulo 4 e semelhante à referenciada pela ISO 3130 (ISO, 1975b). A massa volúmica foi aferida aquando da preparação dos provetes de pequenas dimensões e após serem realizados os ensaios à flexão em 3 pontos.

Seguindo-se os procedimentos preconizados na norma EN 408 (CEN, 2012a), foi possível determinar a tensão de rotura e dois tipos de módulos de elasticidade à flexão. Um primeiro, correspondendo à deformação registada entre as duas cargas aplicadas, denominado por módulo de elasticidade à flexão local ($E_{m,l}$) e um segundo módulo, tendo em conta a deformação total da viga, denominado por módulo de elasticidade à flexão global ($E_{m,g}$).

A tensão de rotura à flexão (f_m) foi determinada a partir da carga de rotura, aplicando a expressão 5.1 (CEN, 2012a).

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (5.1)$$

em que F corresponde à força máxima aplicada no carregamento da viga; a corresponde à distância entre um dos carregamentos e o apoio mais próximo; b à largura da secção; e h à altura da secção .

Para o cálculo de $E_{m,l}$ foi utilizada a expressão 5.2 (CEN, 2012a).

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (5.2)$$

em que F_1 e F_2 representam o incremento de carga na equação da regressão linear com coeficiente de correlação igual ou superior a 0,99; w_1 e w_2 , o incremento da deformação, em milímetros, correspondente ao percurso de F_1 a F_2 , tal como representado na Figura 5.4.

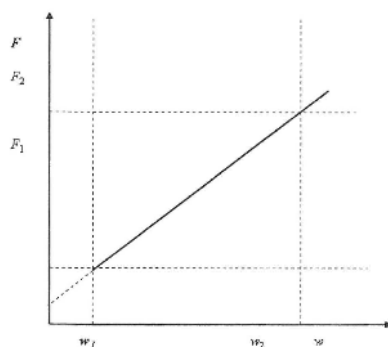


Figura 5.4: Diagrama força-deformação para o intervalo da quantificação do módulo de elasticidade (CEN, 2012a).

F_1 e F_2 deverão corresponder a $0,1F_{max}$ e $0,4F_{max}$, respectivamente, sendo F_{max} , a carga de rotura da viga. Se para este intervalo não for possível definir uma reta com coeficiente de correlação igual ou superior a 0,99, então a norma permite reduzir o intervalo de amplitude entre F_1 e F_2 , para $0,2F_{max}$ e $0,3F_{max}$, respectivamente. Se, mesmo assim, não se conseguir obter um coeficiente de correlação igual ou superior a 0,99, então a norma considera o valor indeterminável.

Para o cálculo do módulo de elasticidade global ($E_{m,g}$), de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012a), utilizou-se a expressão 5.3.

$$E_{m,g} = \frac{2at^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (5.3)$$

em que G , corresponde ao módulo de distorção.

Por fim, de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2010), o módulo de elasticidade à flexão (E_m) da viga, deverá ser calculado com base no módulo de elasticidade global ($E_{m,g}$) corrigido de acordo com a expressão referida no Capítulo 3 (expressão 3.5), por forma a incluir a correção em relação ao módulo de elasticidade em flexão pura.

5.2.3 Ensaio realizados nos provetes de pequenas dimensões

Após a realização dos ensaios à flexão nas vigas, foram extraídos dois blocos com pouco mais de 32 cm cada, medidos no eixo longitudinal da viga; um perto da zona de rotura, entre os dois pontos de ação das cargas e um segundo, perto de uma das zonas de apoio. A partir de cada bloco, foi possível extrair 10 provetes prismáticos, isentos de defeitos, de secção transversal $2 \times 2 \text{ cm}^2$ e de comprimento 32 cm.

Todo o processo de ensaio dos provetes decorreu de forma idêntica ao descrito no Capítulo 4. Após serem cortados os 10 provetes de cada bloco, foram colocados numa câmara climática, à temperatura de 20°C e com humidade relativa do ar de 65%, de forma a estabilizar o seu teor em água. Selecionaram-se, aleatoriamente, 10 provetes de cada espécie, que foram sendo pesados de duas em duas horas, até que a diferença entre pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%. Após a estabilização dos provetes, deu-se início à campanha experimental.

Como referido, tendo em conta a campanha experimental apresentada no Capítulo 4, adoptaram-se procedimentos idênticos na nova campanha de ensaios, de forma a tornar evidente a comparação entre os resultados obtidos nas duas campanhas. Desse modo, após a estabilização dos pesos dos provetes, cada amostra foi dividida em 4 grupos. Esta ação pretendeu ir ao encontro da exigência da norma ISO 3133 (ISO, 1975d), para que os ensaios se realizassem em 1,5 min, com uma tolerância de ± 30 seg. Nesse sentido, teve-se em atenção a probabilidade dos provetes mais pesados demorarem mais tempo até à rotura, implicando um incremento de carga mais acelerado. O balizamento dos intervalos de cada grupo foi semelhante ao adoptado no Capítulo 4, fazendo a respectiva proporcionalidade, para o facto de terem menos 2 cm de comprimento. A Tabela 5.3 apresenta o resumo do número de provetes por cada grupo, para as duas espécies, destacando-se a enorme homogeneidade da amostra de Sapelli, com 92 provetes, no intervalo compreendido entre 80 e 95g.

Tabela 5.3: Divisão das amostras de provetes de pequenas dimensões em grupos delimitados pelo peso, para efeito de realização dos ensaios à flexão.

Grupos	Espécie	
	Câmbala	Sapelli
≤ 80 g	11	1
> 80 g e ≤ 95 g	26	92
> 95 g e ≤ 110 g	55	5
> 110 g	6	0
Total	98	98

A seguir à pesagem dos provetes, realizaram-se os ensaios do ultrassom. Para isso, e repetindo o procedimento exposto na secção 4.2.2, foram alocados aos topos dos provetes, com a ajuda de um gel, um emissor de onda ultrassónica e um receptor. Foi medido o tempo que uma onda ultrassónica de frequência de 22 kHz demorava a percorrer um provete longitudinalmente. A partir do tempo de percurso da onda, foi calculada a velocidade do ultrassom (expressão 4.4).

O equipamento utilizado foi o mesmo PROCEQ-Ultrasonic Testing-Tico. Dada a sensibilidade destes ensaios, as medições do ultrassom foram repetidas três vezes, para cada provete, tendo sido considerado como resultado final a média das três leituras. Para a correção dos valores da velocidade, para o teor em água de 12%, foi aplicada a teoria de Sandoz (1989) que propõe uma variação de 0,8% da velocidade da onda por cada 1% de variação do teor em água da madeira.

Em seguida, realizaram-se os ensaios à flexão em 3 pontos, de acordo com o procedimento definido na norma ISO 3133 (ISO, 1975d). O desenvolvimento dos ensaios foi idêntico ao descrito na secção 4.2.3.

Por fim, foi aferido o teor em água dos provetes. Para tal, foi cortada uma pequena amostra de 2,5 cm de comprimento de cada provete, pesada e colocada numa estufa até secar por completo. Todo o procedimento foi idêntico ao já descrito na secção 4.2.1.

5.2.4 Ensaio à tração paralela às fibras em mesoprovetes

Como referido, de cada bloco extraído das vigas, para além dos 10 provetes prismáticos para os ensaios à flexão em 3 pontos, foram também preparados 3 mesoprovetes, para serem ensaiados à tração paralela às fibras.

Na Figura 5.5 apresenta-se um mesoproveto tipo, retirado de um dos blocos das vigas. Da figura pode contatar-se as reduzidas dimensões, comparativamente com o preconizado pela norma EN 408 (CEN, 2012a), para as dimensões do provete a ensaiar aos mesmos valores de resistência.

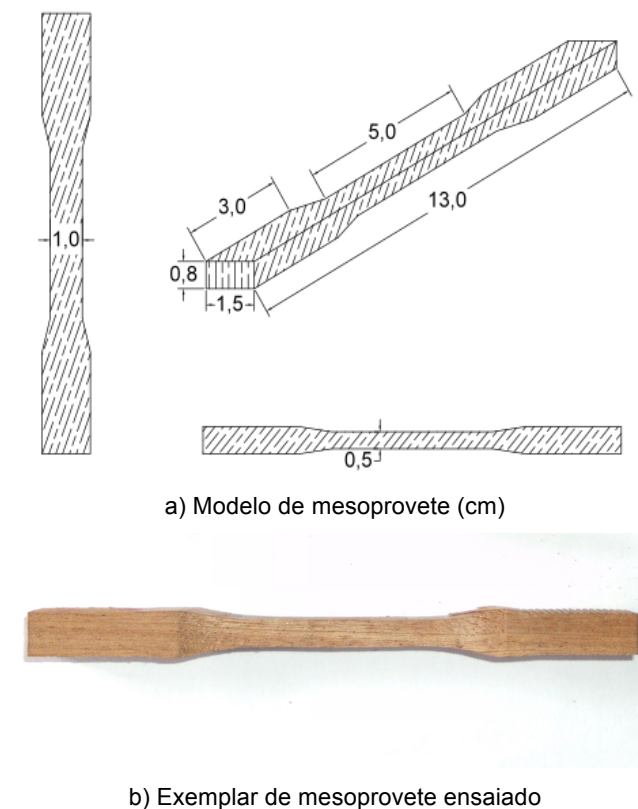


Figura 5.5: Mesoproveto tipo utilizado nos ensaios à tração paralela às fibras.

Os mesoprovetes foram sujeitos à ação de um esforço de tração até à sua rotura, aplicado nas suas extremidades, através das garras de um equipamento mecânico.

O valor da carga transmitida pelo equipamento, aquando da rotura do mesoproveto, foi dividido pela área da secção transversal do provete a meio vão (zona de rotura), para quantificação da tensão de rotura à tração paralela às fibras. Foi ainda aplicado um extensómetro com amplitude de 5 mm, a meio do comprimento do mesoproveto, de modo a medir a sua deformação desde o momento da aplicação da carga até à sua rotura. Partindo dos dados da carga aplicada e da deformação do mesoproveto, foi construído o gráfico força-deformação, a partir do qual, foi possível calcular o correspondente módulo de elasticidade à tração na direção das fibras ($E_{t,0}$).

Na Figura 5.6 é apresentado o equipamento mecânico e as respectivas amarras de fixação dos mesoprovetes para a aplicação dos esforços de tração.



Figura 5.6: Equipamento utilizado na realização dos ensaios de tração em mesoprovetes.

O módulo de elasticidade à tração paralela às fibras foi calculado usando um procedimento semelhante ao descrito para o módulo de elasticidade à flexão. Começou por procurar-se um intervalo de tramo, cuja equação de regressão linear tivesse um coeficiente de determinação superior a 0,99. A primeira hipótese colocada foi a do intervalo entre 10% e 40% da carga de rotura. Não se verificando um coeficiente de determinação superior a 0,99, encurtou-se o intervalo para 20% a 30% da carga de rotura. Não se verificando também para este intervalo, entendeu-se assumir o maior tramo, onde fosse possível uma regressão linear, com um valor do coeficiente de correlação igual ou superior a 0,99.

Resumindo, a partir do ensaio de tração em mesoprovetes, foram quantificados a tensão de rotura ($f_{t,0}$) e o módulo de elasticidade à tração ($E_{t,0}$), paralelos às fibras.

5.3 Resultados experimentais

Descritos os procedimentos seguidos para a realização das diferentes campanhas de ensaios, designadamente: ensaios à flexão com vigas à escala real; ensaios de ultrassom e de flexão em 3 pontos, em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos; determinação das massas volúmicas; e ensaios à tração paralela às fibras em mesoprovetes, nesta secção, apresentam-se os seus principais resultados.

5.3.1 Resultados dos ensaios em vigas

Dos ensaios em vigas à flexão em 4 pontos, definiu-se, como principal objectivo, a procura de relações a estabelecer com os resultados obtidos, a partir dos provetes de pequenas dimensões extraídos das vigas.

Tal como relatado na secção 5.2.2, dos ensaios às vigas foi possível aferir os valores de três propriedades mecânicas, nomeadamente, a tensão de rotura à flexão (f_m), o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,l}$) e o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g}$). Na Tabela 5.4, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de flexão das 5 vigas de cada espécie. É também apresentado o teor em água na zona de rotura, aquando da realização dos ensaios, determinado a partir da norma EN 13183-1 (CEN, 2002). Como se verifica, da leitura das tensões de rotura apresentadas na tabela, as vigas 1 eram de qualidade inferior, anteriormente aferida pela inspeção visual.

Tabela 5.4: Resultados da campanhas de ensaios de vigas.

Espécie	Viga	F (kN)	f_m (MPa)	$E_{m,l}$ (GPa)	$E_{m,g}$ (GPa)	W (%)
Câmbala	1	24,62	36,93	10,95	12,28	20,11
	2	41,05	61,58	15,36	15,48	27,03
	3	43,17	64,76	14,61	14,29	27,87
	4	36,68	55,02	10,40	10,64	28,11
	5	40,71	61,07	11,52	12,71	26,94
Sapelli	1	11,24	16,86	9,70	10,36	22,01
	2	44,2	66,30	9,17	10,60	20,83
	3	49,32	73,98	13,63	13,43	20,42
	4	50,38	75,57	14,97	15,25	19,86
	5	48,33	72,50	12,41	13,14	20,15

Em seguida, pela aplicação da norma EN 384 (CEN, 2010), procedeu-se à correção dos valores experimentais para um teor em água de 12%. Lembra-se que o valor final do módulo de elasticidade das vigas, E_m , é obtido após correção do valor do módulo de elasticidade global, $E_{m,g}$, através da expressão 3.5. Para além das referidas propriedades, através de pequenas amostras dos provetes de pequenas dimensões, foram determinadas as massas volúmicas de cada provete, considerando que, para cada viga, a respetiva massa volúmica corresponderá às médias das massas volúmicas dos provetes extraídos dessa mesma viga. A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos valores.

Tabela 5.5: Resultados das campanhas de ensaios de vigas corrigidos para um teor em água de 12%.

Espécie	Vigas	ρ (kg/m ³)	f_m (MPa)	E_{mi} (GPa)	E_{mg} (GPa)	Correção E_{mg} E_m (GPa)
Câmbala	1	725,04	36,93	11,61	13,02	14,24
	2	807,78	61,58	16,28	16,41	18,64
	3	749,64	64,76	15,48	15,14	17,00
	4	619,13	55,02	11,03	11,28	11,97
	5	801,78	61,07	12,21	13,47	14,82
	Média	740,67	55,87	13,32	13,86	15,33
	C.V. (%)	10,3%	20,0%	17,9%	14,3%	16,8%
	Min. Max.	619,13 807,78	36,93 64,76	11,03 16,28	11,28 16,41	11,97 18,64
Sapelli	1	714,88	16,86	10,28	11,40	12,13
	2	698,14	66,30	9,72	11,54	12,31
	3	659,16	73,98	14,45	14,56	16,24
	4	647,14	75,57	15,86	16,45	18,69
	5	652,69	72,50	13,16	14,21	15,78
	Média	674,40	61,04	12,69	13,63	15,03
	C.V. (%)	4,5%	40,9%	20,9%	15,8%	18,6%
	Min. Max.	647,14 714,88	16,86 75,57	9,72 15,86	11,40 16,45	12,13 18,69

Dos resultados obtidos, podemos constatar que as vigas 1 de cada espécie traduzem, no valor das suas tensões de rotura à flexão, a existência dos defeitos na madeira, mencionados na secção 5.2.1, aquando da inspeção visual. Apesar dos defeitos se refletirem nos valores das tensões de rotura à flexão, para os valores dos módulos de elasticidade, quer local, quer global, o mesmo já não sucede, imiscuindo-se os resultados entre os valores obtidos nas restantes vigas.

5.3.2 Resultados dos ensaios em provetes de pequenas dimensões

Das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, foram aferidas as propriedades de referência e a velocidade de ultrassom.

Na Tabela 5.6 resumem-se os resultados obtidos das amostras de Câmbala e Sapelli, na determinação da massa volúmica dos provetes, antes e depois da correção do teor em água, recorrendo às normas ISO 3131 (ISO, 1975b) e EN 384 (CEN, 2010).

Tabela 5.6: Massa volúmica dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.

Espécie	Total da amostra: 98 provetes	ρ com teor em água de w% (kg/m ³)	ρ_{12} ISO 3131 (kg/m ³)	ρ_{12} EN 384 (kg/m ³)
Câmbala	Média	748,97	750,17	741,23
	C.V. (%)	10,7%	10,6%	11,0%
	Min.	553,91	552,45	536,10
	Max.	876,56	871,53	870,47
	Provetes excluídos	--	14	0
Sapelli	Média	673,32	675,11	674,84
	C.V. (%)	5,5%	5,5%	5,5%
	Min.	624,77	621,05	620,59
	Max.	773,13	771,51	775,40
	Provetes excluídos	--	1	0

A seguir ao processo da pesagem dos provetes, após a sua estabilização, procedeu-se à realização dos ensaios de ultrassom. A Tabela 5.7 apresenta o resumo dos valores correspondentes à campanha de ensaios, antes e depois de efectuada a correção dos valores para o teor em água de 12%.

Tabela 5.7: Velocidade do ultrassom em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.

Espécie	Total da amostra: 98 provetes	v com teor em água de w% (m/s)	v_{12} Sandoz (1989) (m/s)
Câmbala	Média	4301,94	4302,67
	C.V. (%)	7,8%	7,8%
	Min.	3429,80	3430,42
	Max.	5055,29	5055,81
	Provetes excluídos	—	0
Sapelli	Média	4457,47	4457,31
	C.V. (%)	4,7%	4,7%
	Min.	4035,31	4035,42
	Max.	4992,20	4993,02
	Provetes excluídos	—	0

Tendo os valores da massa volúmica e da velocidade dos ultrassons, foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico. Apresenta-se, em seguida, a Tabela 5.8 com os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), antes e depois da correção do teor em água para 12% (E_{din12}).

Tabela 5.8: E_{din} em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.

Espécie	Total da amostra: 98 provetes	E_{din} com teor em água de w% (GPa)	E_{din12} Sandoz (1989) ISO 3131 (GPa)	E_{din12} Sandoz (1989) EN 384 (GPa)
Câmbala	Média	13,93	13,94	13,79
	C.V. (%)	18,8%	19,0%	18,9%
	Min.	8,43	8,31	8,29
	Max.	20,54	20,50	20,49
	Provetes excluídos	—	14	0
Sapelli	Média	13,41	13,44	13,44
	C.V. (%)	11,5%	11,4%	11,3%
	Min.	11,05	11,05	11,05
	Max.	18,58	18,45	18,40
	Provetes excluídos	—	1	0

Após a realização dos ensaios de ultrassons, efetuaram-se os ensaios à flexão em 3 pontos. Todo o processo desenvolvido foi semelhante ao descrito na secção 4.2.3. A partir da campanha de ensaios à flexão, foram determinados os valores da tensão de rotura (f_m) e do módulo de elasticidade à flexão (E_m). A correção dos valores de f_m , para o teor em água de 12%, foi feita através das normas ISO 3133 (ISO, 1975d) e EN 384 (CEN, 2010).

Na Tabela 5.9 são apresentados os resultados das amostras para f_m , antes e depois da correção dos valores.

A correção dos valores do módulo de elasticidade em flexão, para o teor em água de 12%, foi realizada usando o procedimento preconizado na norma EN 384 (CEN, 2010).

Na Tabela 5.10 são apresentados os resultados dos módulos de elasticidade (E_m) para as amostras em Câmbala e Sapelli, antes e depois da correção dos valores, para o teor em água de 12% (E_{m12}).

Tabela 5.9: f_m em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água para 12%.

Espécie	Total da amostra: 98 provetes	f_m com teor em água de $w\%$ (MPa)	f_{m12} ISO 3133 (MPa)	f_{m12} EN 384 (MPa)
Câmbala	Média	80,36	81,90	80,36
	C.V. (%)	24,8%	24,2%	24,8%
	Min.	18,28	18,90	18,28
	Max.	126,45	129,19	126,45
	Provetes excluídos	—	0	0
Sapelli	Média	97,40	97,00	97,40
	C.V. (%)	11,2%	11,8%	11,2%
	Min.	62,44	62,41	62,44
	Max.	119,76	123,08	119,76
	Provetes excluídos	—	0	0

Tabela 5.10: E_m em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, antes e depois da correção do teor em água de 12%.

Espécie	Total da amostra: 98 provetes	E_m com teor em água de $w\%$ (GPa)	E_{m12} EN 384:2010 (GPa)
Câmbala	Média	8,81	8,97
	C.V. (%)	21,7%	21,2%
	Min.	3,72	3,85
	Max.	13,75	13,72
	Provetes excluídos	—	0
Sapelli	Média	9,79	9,74
	C.V. (%)	12,8%	13,4%
	Min.	5,41	5,41
	Max.	12,57	12,83
	Provetes excluídos	—	8

Na secção 6.2, será feita uma análise aos resultados obtidos na presente secção, e comparativamente com os resultados experimentais apresentados no Capítulo 4.

5.3.3 Resultados dos ensaios em mesoprovetes

Para além dos provetes de pequenas dimensões prismáticos, isentos de defeitos, foram também produzidos 3 mesoprovetes de cada bloco retirado das vigas ensaiadas. Os mesoprovetes foram ensaiados à tração paralela às fibras, sendo determinados os valores da tensão de rotura à tração ($f_{t,0}$) e do módulo de elasticidade à tração ($E_{t,0}$), na direção paralela às fibras.

As Tabela 5.11, apresenta os resultados experimentais das amostras para a tensão de rotura à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$) e para o módulo de elasticidade igualmente à tração paralela às fibras ($E_{t,0}$).

Tabela 5.11: Valores médios de $f_{t,0}$ em mesoprovetes por viga.

Espécie	Vigas	n.º prov.	$f_{t,0}$ média/viga (MPa)	$f_{t,0}$ média (MPa)	$E_{t,0}$ média/viga (GPa)	$E_{t,0}$ média (GPa)
Câmbala	1	5	120,5	93,3	10,4	12,7
	2	6	72,7		12,4	
	3	5	97,2		14,5	
	4	5	114,0		14,5	
	5	6	61,9		11,5	
Sapelli	1	6	71,3	84,9	14,6	12,9
	2	6	80,4		10,3	
	3	5	88,1		10,9	
	4	6	83,3		12,6	
	5	6	101,6		16,3	

Para além dos resultados apresentados na Tabela 5.11, referentes ao valores médios por viga, a Tabela 5.12 mostra o resumo dos valores da totalidade dos mesoprovetes ensaiados. As ligeiras diferenças entre as médias totais da Tabela 5.12, para as médias da Tabelas 5.11, devem-se ao facto de, em algumas das vigas, apenas se terem conseguido realizar os ensaios de tensão de rotura à tração, de forma correta, em 5 mesoprovetes, ao contrário dos expectáveis 6. A média das vigas de 5 provetes entraram com o mesmo peso de ponderação para o cálculo das médias nas Tabela 5.11. O cálculo das médias da Tabela 5.12, fez-se pelo número total de mesoprovetes ensaiados, ignorando a viga de proveniência de cada um.

Tabela 5.12: Valores finais de $f_{t,0}$ e $E_{t,0}$ das amostras de mesoprovetes.

Espécie		$f_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,0}$ (GPa)
Câmbala (27 Mesoprovetes)	Média	91,35	12,58
	C.V. (%)	37,7%	33,3%
	Min.	21,04	3,98
	Max.	154,64	20,07
Sapelli (29 Mesoprovetes)	Média	84,82	13,01
	C.V. (%)	27,9%	33,4%
	Min.	51,78	4,58
	Max.	139,28	22,52

Da Tabela 5.12, torna-se evidente uma elevada dispersão de resultados para ambas as propriedades, em ambas as espécies.

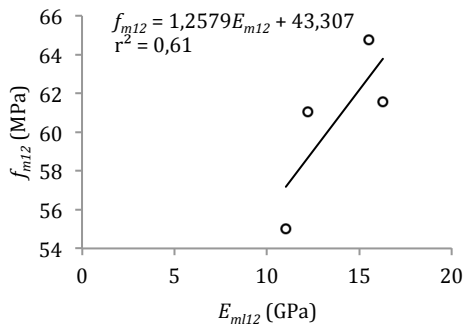
5.4 Correlação das propriedades em cada campanha de ensaios

Neste subcapítulo pretende correlacionar-se os resultados obtidos em cada campanha de ensaios, de forma a estudar a possibilidade de se poderem aferir as características de cada espécie, através de ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos.

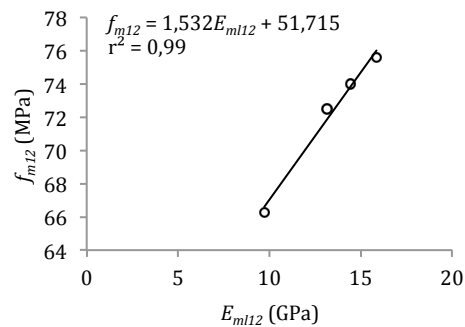
5.4.1 Correlações obtidas nos ensaios das vigas

Para cada ensaio efetuado em vigas à escala real, como se viu na secção 5.3.1, obtiveram-se os resultados da tensão de rotura à flexão (f_m), e dos módulos de elasticidade local ($E_{m,l}$) e global ($E_{m,g}$), em flexão. Nesta secção, procurou estabelecer-se correlações entre estas propriedades (ver Figuras 5.7, 5.8 e 5.9), após correção dos seus valores, para um teor em água de 12%. Refira-se o facto de nos módulos de elasticidade global, ter sido já feita a correção em relação ao módulo de elasticidade em flexão pura, de acordo com o previsto na EN 384 (CEN, 2010).

Pelo facto das vigas 1 de cada espécie terem apresentado roturas precoces em consequência da presença de defeitos, optou-se por, sempre que se correlacionasse a propriedade da tensão de rotura à flexão, estas vigas não fossem incluídas.

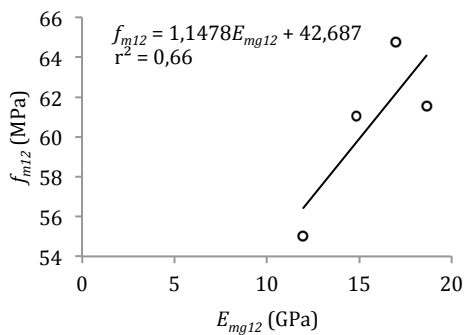


a) Câmbala

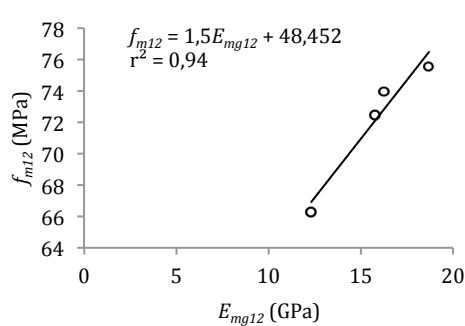


b) Sapelli

Figura 5.7: Correlação entre o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,12}$) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.

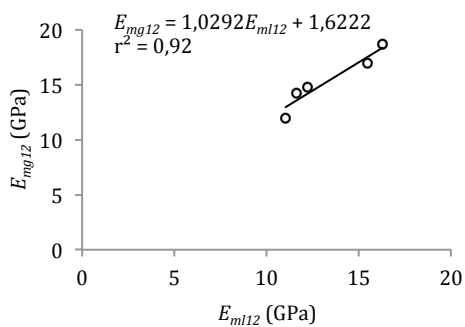


a) Câmbala

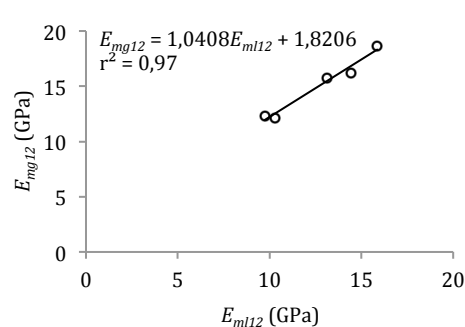


b) Sapelli

Figura 5.8: Correlação entre o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 5.9: Correlação entre o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,12}$) e o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$), após correção do teor em água para 12%.

As propriedades mecânicas foram também correlacionadas com as massas volúmicas, obtidas pela médias das massas volúmicas dos provetes extraídos de cada viga. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, apresentam as correlações das massas volúmicas, com as tensões de rotura à flexão, módulos de elasticidade à flexão locais e módulos de elasticidade à flexão globais, respectivamente.

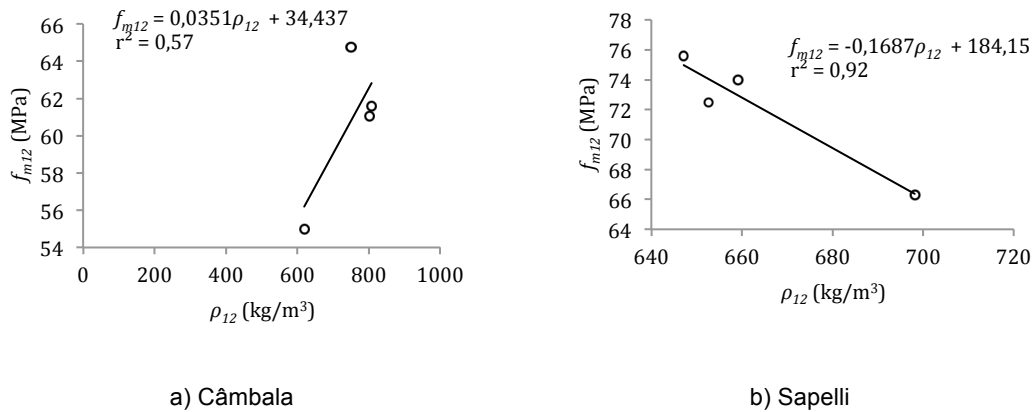


Figura 5.10: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e a tensão de rotura à flexão (f_{m12}), após correção do teor em água para 12%.

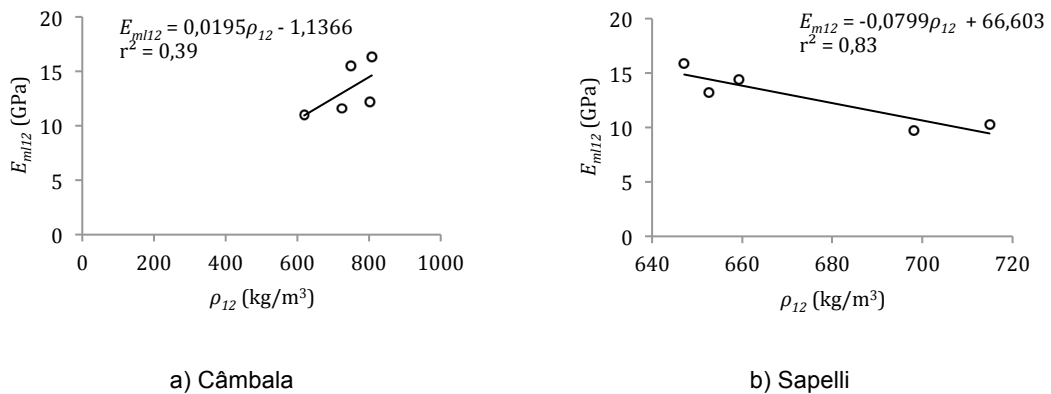


Figura 5.11: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e o módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,112}$), após correção do teor em água para 12%.

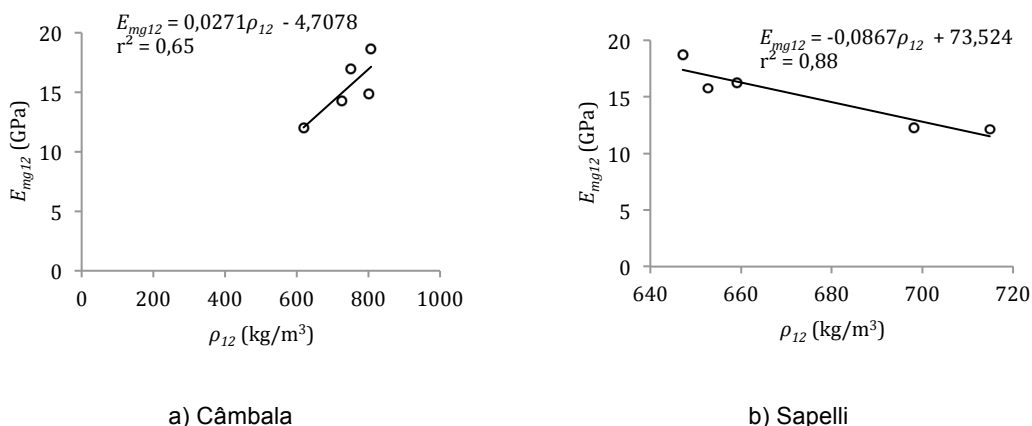


Figura 5.12: Correlação entre a massa volúmica (ρ_{12}) e o módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g12}$), após correção do teor em água para 12%.

Dos gráficos apresentados para as correlações com as massas volúmicas, depreende-se, pelo sentido negativo das retas de regressão linear, obtidas para a espécie de Sapelli, a pouca ou nenhuma credibilidade em concluir-se sobre a existência de algum tipo de correlação entre as propriedades. Por certo, o principal motivo residirá no facto da amostra ter uma dimensão muito reduzida, de apenas 4 vigas. Naturalmente que o aumento da dimensão da amostra anulará este efeito. Porém, poderá começar a formar-se a ideia de que a massa volúmica das espécies, apesar de poder acompanhar o incremento das capacidades resistentes das madeiras, não o fará na mesma dimensão.

Em seguida, é apresentada a Tabela 5.13, onde se resumem as expressões de correlação entre as diferentes propriedades e se mostram os respetivos valores dos coeficientes de determinação.

Tabela 5.13: Resumo das correlações estabelecidas entre as propriedades aferidas das vigas.

Espécie	Relação	Expressão de correlação linear	r^2
Câmbala	$f_{m12} - E_{m12}$	$f_{m12} = 1,2579E_{m12}+43,307$	0,61
	$f_{m12} - E_{mg12}$	$f_{m12} = 1,478E_{mg12}+42,687$	0,66
	$E_{mg12} - E_{m12}$	$E_{mg12} = 1,0292E_{m12}+1,6222$	0,92
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,351\rho_{12}+34,437$	0,57
	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0195\rho_{12}-1,1366$	0,39
	$\rho_{12} - E_{mg12}$	$E_{mg12} = 0,0271\rho_{12}-4,7078$	0,65
Sapelli	$f_{m12} - E_{m12}$	$f_{m12} = 1,532E_{m12}+51,715$	0,99
	$f_{m12} - E_{mg12}$	$f_{m12} = 1,5E_{mg12}+48,452$	0,94
	$E_{mg12} - E_{m12}$	$E_{mg12} = 1,0408E_{m12}+1,8206$	0,97
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = -0,1687\rho_{12}+184,15$	0,92
	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = -0,0799\rho_{12}+66,603$	0,83
	$\rho_{12} - E_{mg12}$	$E_{mg12} = -0,0867\rho_{12}+73,524$	0,88

5.4.2 Correlações obtidas nos ensaios dos provetes de pequenas dimensões

Na campanha de ensaios realizada com provetes de pequenas dimensões, as propriedades determinadas foram: massa volúmica (ρ), tensão de rotura à flexão (f_m), módulo de elasticidade à flexão (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}).

As correlações que se apresentam estabelecem as relações entre as diferentes propriedades, ao longo de 4 fases de tratamento dos resultados, de acordo com o exposto na secção 4.4. As 1ª e 2ª Fases correspondem às correlações estabelecidas, antes e após a correção do teor em água dos provetes para 12%, respetivamente (utilizando a norma EN 384 (CEN, 2010) e a proposta de Sandoz (1989) para a correção da velocidade do ultrassom). A 3ª Fase corresponde à exclusão dos valores anormais, resultantes de defeitos da madeira, não visíveis a olho nu, ou de erros de realização de ensaios. Por fim, a 4ª Fase, corresponde à eliminação dos 5% dos resultados mais afastados da reta de regressão linear, definida após eliminação dos valores anormais.

Em seguida são apresentadas as correlações e correspondentes figuras gráficas em que os coeficientes de determinação (r^2) mostram valores significativos. No final, apresentam-se os resultados das restantes correlações, remetendo para o Anexo E a consulta das correspondentes figuras gráficas.

5.4.2.1 Correlação do E_m com f_m

À semelhança do verificado na campanha de ensaios descrita no Capítulo 4, novamente as correlações entre o módulo de elasticidade e a tensão de rotura à flexão, na direção das fibras, apresentam valores significativos para os coeficientes de determinação, desde a 1ª Fase, como se pode constatar através da consulta da Figura 5.13.

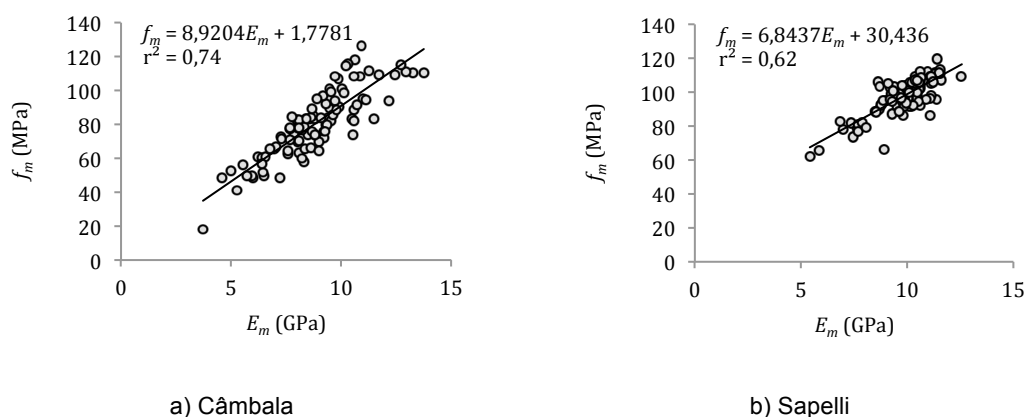


Figura 5.13: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

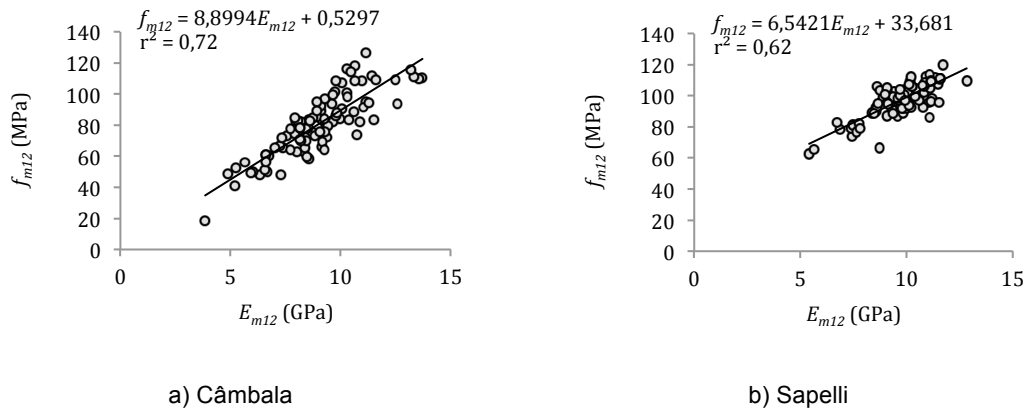


Figura 5.14: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

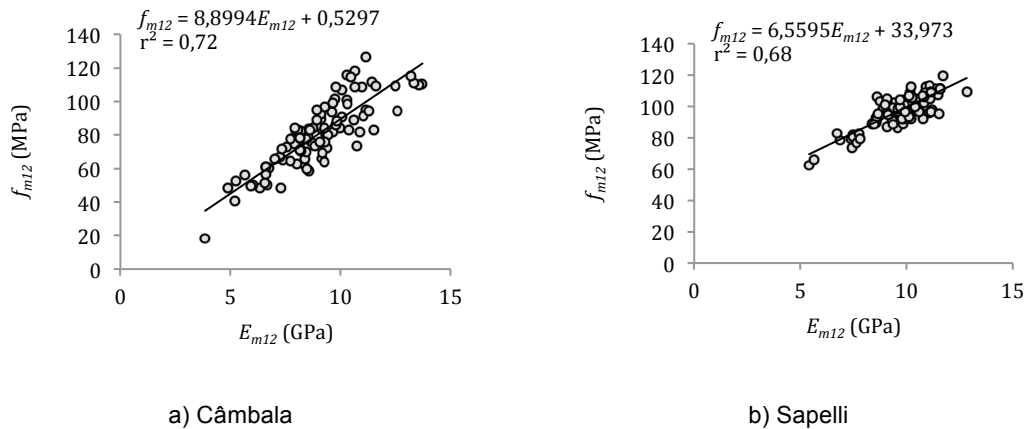


Figura 5.15: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

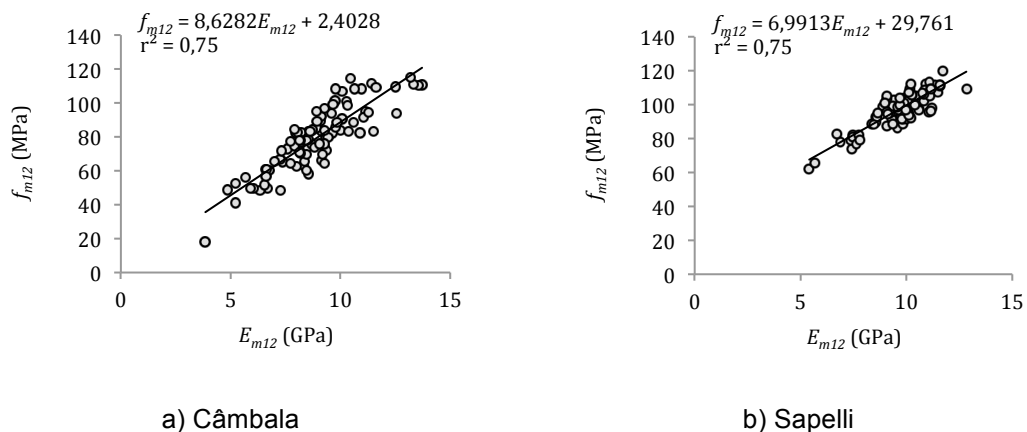


Figura 5.16: Correlação entre as propriedades E_m e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

A Tabela 5.14, apresenta o resumo dos resultados.

Tabela 5.14: Resumo da correlação entre E_m e f_m em provetes extraídos das vigas.

Espécie	$E_m - f_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $E_m - f_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$f_m = 8,9204E_m + 1,7781$	0,736	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 8,8994E_m + 0,5297$	0,725	0,00%
	3ª Fase	98	$f_m = 8,8994E_m + 0,5297$	0,725	0,00%
	4ª Fase	94	$f_m = 8,6282E_m + 2,4028$	0,754	4,08%
	Total retirados				4,08%
Sapelli	1ª Fase	98	$f_m = 6,8437E_m + 30,436$	0,625	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 6,5421E_m + 33,681$	0,618	0,00%
	3ª Fase	96	$f_m = 6,5595E_m + 33,973$	0,675	2,04%
	4ª Fase	92	$f_m = 6,9913E_m + 29,761$	0,746	4,17%
	Total retirados				6,12%

5.4.2.2 Correlação do E_{din} com E_m

Na correlação entre os módulos de elasticidade E_{din} com E_m , é de sublinhar a discrepância entre as duas espécies, uma vez que a espécie de Câmbala apresenta elevados valores de coeficientes de determinação, ao contrário da espécie de Sapelli, com valores praticamente insignificantes. Os resultados podem ser consultados nas Figuras 5.17 a 5.20.

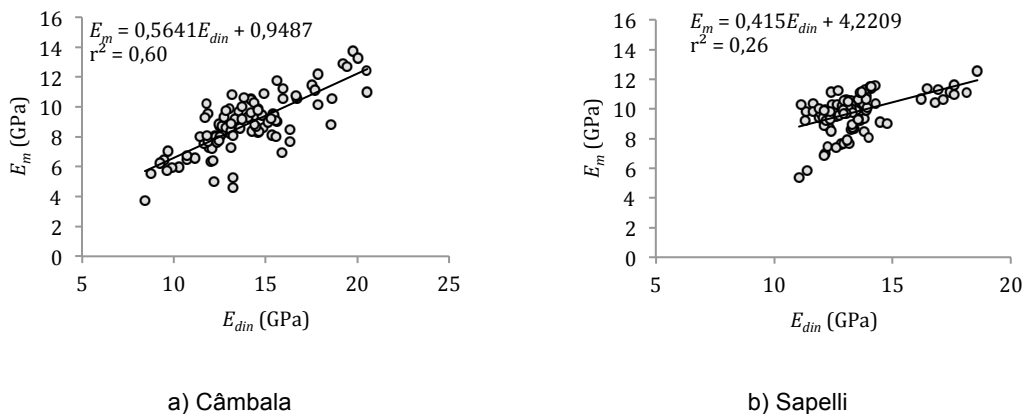
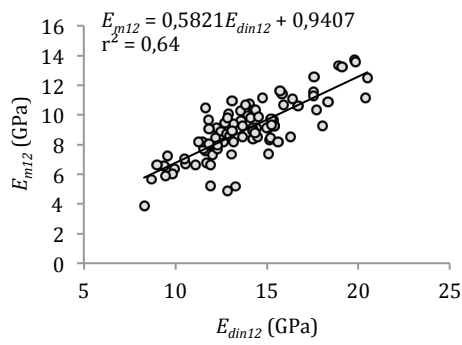
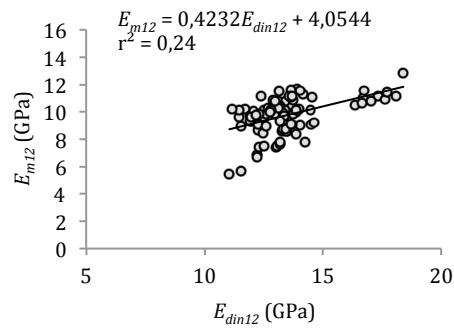


Figura 5.17: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

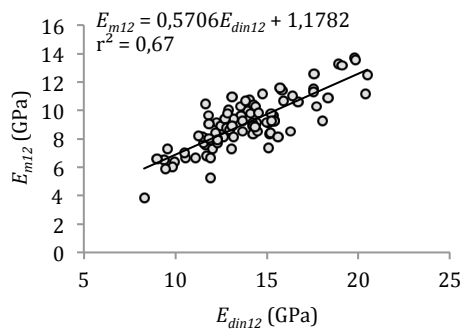


a) Câmbala

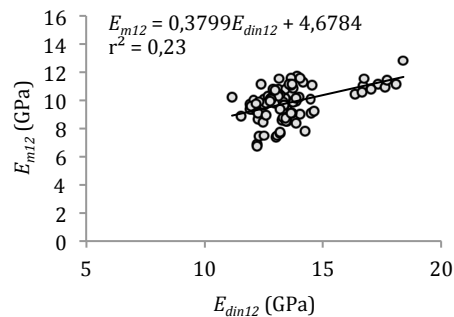


b) Sapelli

Figura 5.18: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

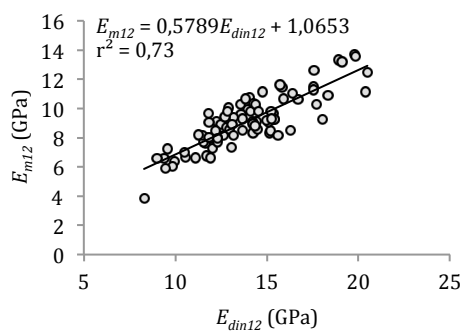


a) Câmbala

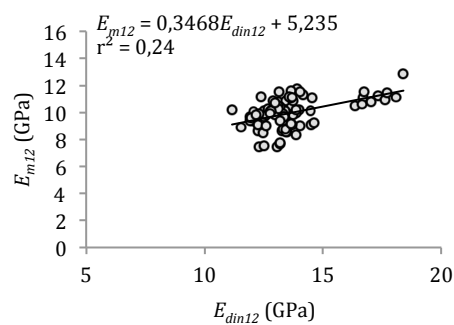


b) Sapelli

Figura 5.19: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 5.20: Correlação entre as propriedades E_{din} e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

A Tabela 5.15, apresenta o resumo dos resultados das correlações estabelecidas entre E_{din} e E_m , nas 4 Fases do tratamento de resultados.

Tabela 5.15: Resumo da correlação entre E_{din} e E_m em provetes extraídos das vigas.

Espécie	$E_{din} - E_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $E_{din} - E_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$E_m = 0,5641E_{din} + 9487$	0,597	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,5821E_{din} + 9407$	0,636	0,00%
	3ª Fase	95	$E_m = 0,5706E_{din} + 1,1782$	0,667	3,06%
	4ª Fase	91	$E_m = 0,5789E_{din} + 1,0653$	0,730	4,21%
	Total retirados				7,14%
Sapelli	1ª Fase	98	$E_m = 0,415E_{din} + 4,2209$	0,258	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,4232E_{din} + 4,0544$	0,241	0,00%
	3ª Fase	93	$E_m = 0,3799E_{din} + 4,6784$	0,225	5,10%
	4ª Fase	89	$E_m = 0,3468E_{din} + 5,235$	0,239	4,30%
	Total retirados				9,18%

5.4.2.3 Restantes correlações

Para as restantes correlações, apresenta-se a Tabela 5.16 com as expressões finais das regressões lineares obtidas na 2ª fase e os respectivos coeficientes de determinação. Os resultados das restantes Fases podem ser consultados no Anexo E.

Tabela 5.16: Expressões para as correlações entre propriedades dos provetes de pequenas dimensões extraídos das vigas exceptuando as correlações de E_m com f_m e E_{din} com E_m .

Espécie	Relação	Expressão de correlação linear	r^2
Câmbala	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0131\rho - 0,7195$	0,310
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,1218\rho - 9,911$	0,246
	$V_{12} - \rho_{12}$	$\rho = -0,0126v + 795,39$	0,003
	$V_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0032v - 4,7927$	0,316
	$V_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,0215v - 12,308$	0,131
	$E_{din12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 4,414E_{din12} + 19,474$	0,334
Sapelli	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = -0,0014\rho + 10,82$	0,001
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,0157\rho + 87,818$	0,019
	$V_{12} - \rho_{12}$	$\rho = -0,0029v + 687,83$	0,000
	$V_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0035v - 5,6476$	0,301
	$V_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,0155v + 28,444$	0,087
	$E_{din12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 2,2637E_{din12} + 66,989$	0,100

5.4.3 Correlações obtidas nos ensaios dos mesoprovetes

Na secção 5.2.4, relativa aos ensaios em mesoprovetes, são descritos os procedimentos com vista à aferição dos valores da tensão de rotura ($f_{t,0}$) e do módulo de elasticidade ($E_{t,0}$) à tração, paralelos às fibras, envolvendo a totalidade dos resultados dos mesoprovetes ensaiados, de cada espécie. Uma vez que não se verificaram correlações entre estas duas características, a consulta das figuras dos seus resultados pode ser feita no Anexo E (Figura E.25).

5.5 Correlação dos resultados entre as diferentes campanhas de ensaios

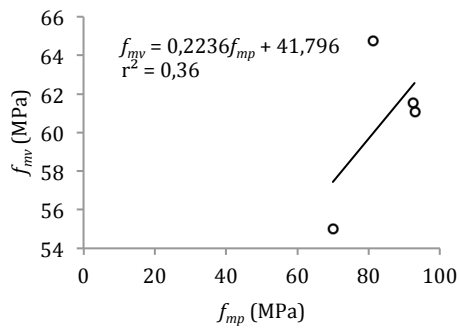
Na presente secção procedeu-se à análise das correlações entre as propriedades aferidas nas diferentes campanhas de ensaios, tendo por objetivo a previsão das características das vigas, a partir dos ensaios realizados nos provetes de pequenas dimensões sujeitos à flexão e em mesoprovetes submetidos à tração. Lembra-se que, para a definição do módulo de elasticidade à flexão em vigas, são assumidos os valores dos módulos de elasticidade à flexão global, corrigidos pela expressão 3.5, de acordo com o previsto na EN 384 (CEN, 2010).

5.5.1 Correlação entre vigas e provetes de pequenas dimensões

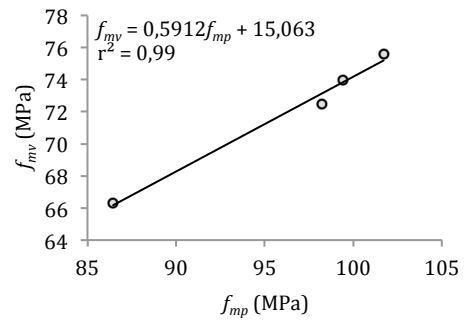
Para se poder correlacionar os resultados entre as campanhas de ensaios, foi necessário calcular a média dos valores obtidos dos provetes de cada viga ensaiada. Deste modo, são correlacionados os resultados das propriedades obtidas das vigas, com as médias dos resultados das propriedades obtidas dos provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, extraídos das próprias vigas, após estas serem ensaiadas até à rotura. Todas as correlações foram realizadas, considerando os resultados após a correção do teor em água para 12%.

5.5.1.1 Correlações para a aferição da tensão de rotura à flexão (f_{mv})

Para a aferição da tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}), foram estudadas as suas correlações com as propriedades obtidas dos ensaios em provetes de pequenas dimensões. Nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23, podem ser observadas as correlações estabelecidas entre f_{mv} , com a tensão de rotura à flexão dos provetes de pequenas dimensões (f_{mp}), o módulo de elasticidade à flexão dos provetes de pequenas dimensões (E_{mp}) e a massa volúmica (ρ).

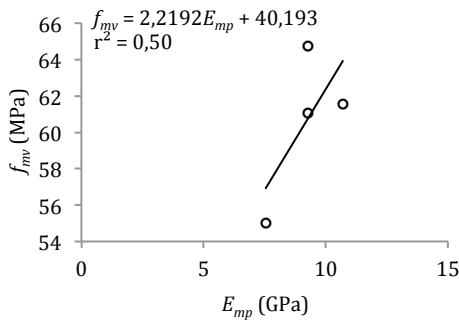


a) Câmbala

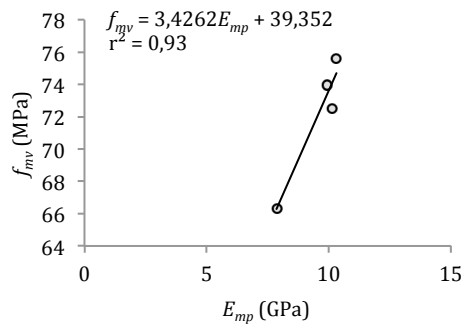


b) Sapelli

Figura 5.21: Correlação entre a tensão de rotura à flexão dos provetes extraídos das vigas (f_{mp}) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).

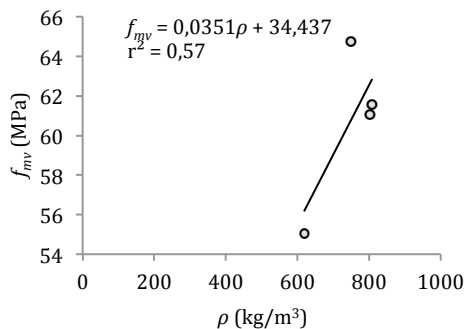


a) Câmbala

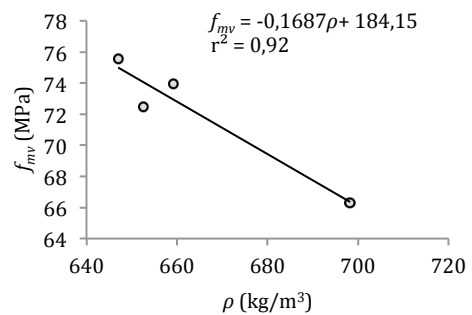


b) Sapelli

Figura 5.22: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão dos provetes extraídos das vigas (E_{mp}) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 5.23: Correlação entre a massa volúmica (ρ) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).

Tal como havia sido efectuado para as correlações internas das vigas, voltam a excluir-se as vigas 1 de ambas as espécies, para as correlações com a tensão de rotura à flexão, por não terem preenchido os requisitos da norma BS 5756 (2007).

Da Figura 5.23, pode observar-se que a correlação com a massa volúmica para a espécie de Sapelli se apresenta pouco provável, pelo sentido negativo do declive da expressão linear. Uma vez mais, na linha de raciocínio apresentada na secção 5.4.1, o facto da dimensão da amostra ser bastante pequena, será a justificação mais relevante para este resultado. Nesse sentido, em seguida, ao contrário de se apresentar a correlação de tensão de rotura à flexão dos provetes de dimensões estruturais, com o módulo de elasticidade dinâmico, em provetes de pequenas dimensões, optou-se por apresentar a correlação estabelecida com a velocidade do ultrassom. Isto, porque a influência da massa volúmica, na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, iria retirar sentido à correlação a estabelecer.

Da correlação entre a tensão de rotura das vigas, com a velocidade de ultrassom dos provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, observam-se resultados completamente antagónicos entre as duas espécies. A uma ausência de correlação observada para a espécie de Câmbala, verifica-se uma correlação muito forte para a Sapelli. Na Figura 5.24, é possível observar os referidos resultados.

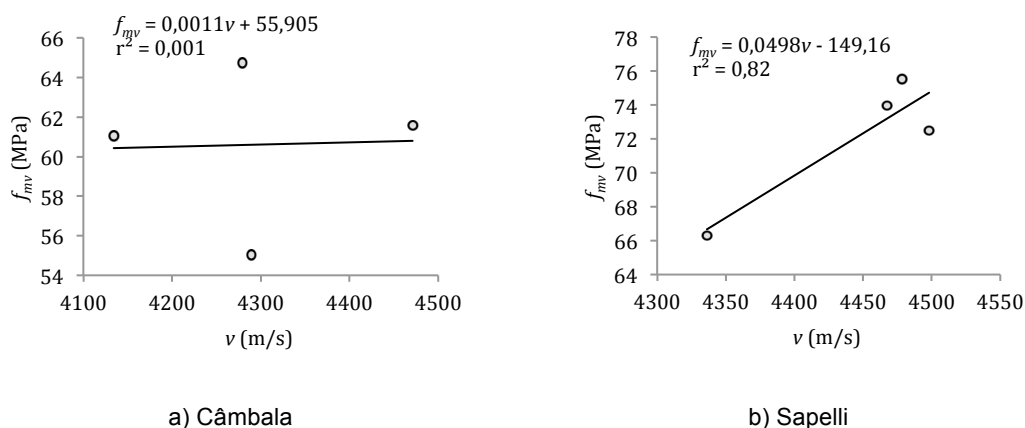


Figura 5.24: Correlação entre a velocidade de ultrassom (v) e a tensão de rotura à flexão das vigas (f_{mv}).

Mais uma vez, a pequena dimensão da amostra, para propriedades que podem ter pequenas variações com o evoluir das características da madeira, pode, facilmente, promover ausências de correlações, ou mesmo, correlações negativas, como é o facto observado também para a massa volúmica.

A Tabela 5.17, apresenta o resumo dos resultados das relações entre as tensões de rotura das duas campanhas de cada espécie.

Tabela 5.17: Resultados das tensões de rotura à flexão por viga (f_{mv}), e das médias das tensões de rotura dos provetes de pequenas dimensões (f_{mp}), por viga.

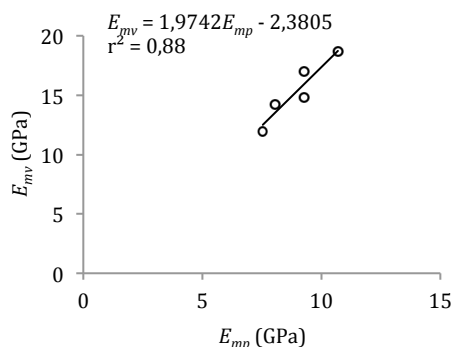
Espécie		Vigas f_{mv} (MPa)	Provetes f_{mp} (MPa)	$(f_{mp}-f_{mv})/f_{mp}$ %
Câmbala	N.º Viga			
	2	61,58	92,35	33%
	3	64,76	81,22	20%
	4	55,02	69,97	21%
	5	61,07	92,89	34%
	Média	60,61	84,11	27%
	C.V.	7%	13%	48%
	Min.	55,02	69,97	21%
	Max.	64,76	92,89	30%
Sapelli	N.º Viga			
	2	66,30	86,45	23%
	3	73,98	99,38	26%
	4	75,57	101,71	26%
	5	72,50	98,24	26%
	Média	72,09	96,44	25%
	C.V.	6%	7%	20%
	Min.	66,30	86,45	23%
	Max.	75,57	101,71	26%

Apesar do número de resultados para o estabelecimento das correlações ser extremamente reduzido, ao observar-se as Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24, sobressaem os elevados valores atingidos para os coeficientes de determinação das correlações estabelecidas na espécie de Sapelli, com a exceção da correlação com a massa volúmica. Relativamente aos valores apresentados na Tabela 5.17, é de sublinhar a evidência da superioridade constante dos valores da tensão de rotura apresentados pelos provetes de pequenas dimensões, em relação aos provetes de dimensões estruturais. Referir ainda, a baixa dispersão dos resultados das tensões de rotura das campanhas, sendo ainda mais notória para a espécie de Sapelli (6 e 7%).

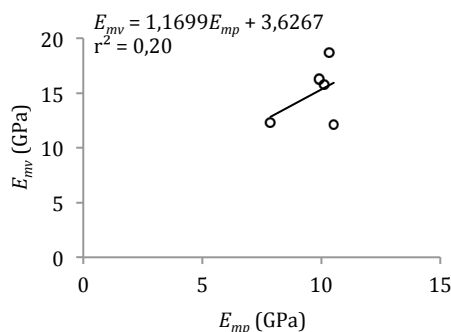
5.5.1.2 Correlações para a aferição do módulo de elasticidade à flexão (E_{mv})

Em seguida são analisadas as correlações do módulo de elasticidade das vigas (E_{mv}), com as propriedades obtidas nos ensaios em provetes de pequenas dimensões. As Figuras 5.25 e 5.26, apresentam as correlações estabelecidas entre E_{mv} , com o módulo de elasticidade à flexão obtido a partir do ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos (E_{mp}), e com a massa volúmica (ρ).

As vigas 1 de cada espécie voltam a ser excluídas por não terem preenchido os requisitos da norma BS 5756 (2007).

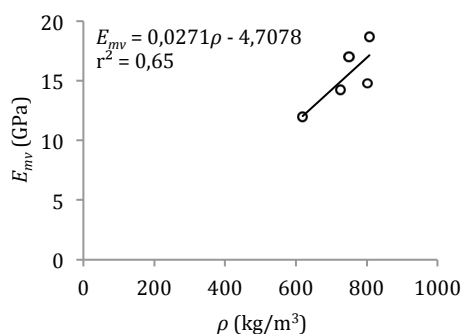


a) Câmbala

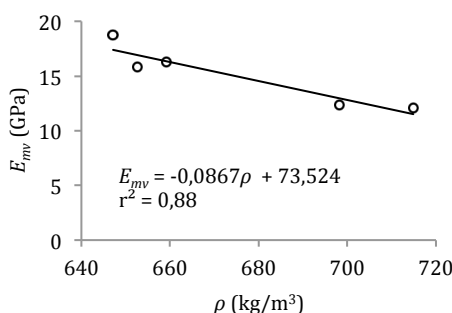


b) Sapelli

Figura 5.25: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão dos provetes extraídos das vigas (E_{mp}), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura 5.26: Correlação entre a massa volúmica determinada em provetes de pequenas dimensões (ρ), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).

Importa aqui abordar o resultado da correlação entre os módulos de elasticidade à flexão dos provetes de dimensão estrutural e de pequenas dimensões, para a espécie de Sapelli. Na verdade, o resultado que se observa para o coeficiente de determinação apresenta-se significativamente baixo, 0,20. Porém, será relevante abordar o facto de que a viga 1 não cumpriu com os requisitos da norma BS 5756 (2007), tendo sido dispensada na análise dos resultados da tensão de rotura, mas, pelo facto de apresentar um módulo de elasticidade à flexão semelhante às restantes 4 vigas de Sapelli, tem sido considerada nas análises que envolvam o módulo de elasticidade à flexão. Frisa-se este aspeto, porque, no caso da viga 1 não ser considerada na correlação entre os módulos de elasticidade, o valor do coeficiente de determinação seria de 0,86, valor esse muito semelhante ao obtido na espécie de Câmbala, de 0,88.

Relativamente à relação com a massa volúmica, uma vez mais, pelo valor negativo, inverosímil, do coeficiente de determinação para a espécie de Sapelli, na Figura 5.27, é apresentada a correlação do módulo de elasticidade à flexão em provetes de dimensões estruturais, com a velocidade do ultrassom, obtida dos provetes de pequenas dimensões.

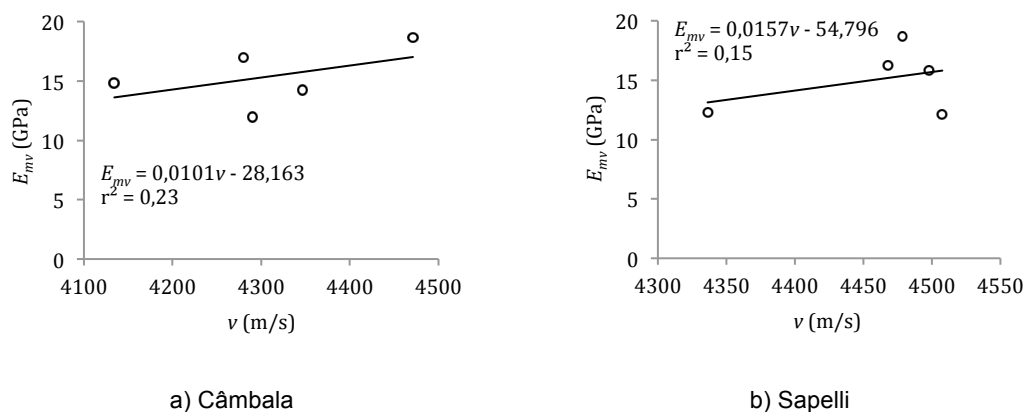


Figura 5.27: Correlação entre a velocidade de ultrassom determinada em provetes de pequenas dimensões (v), e o módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_{mv}).

A Tabela 5.18 apresenta o resumo dos resultados para os módulos de elasticidade à flexão, das duas campanhas de ensaios, para as duas espécies.

Tabela 5.18: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão por viga (E_{mv}), e das médias dos módulos de elasticidade dos provetes de pequenas dimensões (E_{mp}), por viga.

Espécie		Vigas E_{mv} (GPa)	Provetes E_{mp} (GPa)	$(E_{mp}-E_{mv})/E_{mp}$ (%)	
Câmbala	N.º Viga	1	14,24	8,07	-76%
		2	18,64	10,70	-74%
		3	17,00	9,28	-83%
		4	11,97	7,54	-59%
		5	14,82	9,27	-60%
	Média	15,33	8,97	-71%	
	C.V.	17%	14%	-23%	
	Min.	11,97	7,54	-59%	
	Max.	18,64	10,70	-74%	
Sapelli	N.º Viga	1	12,13	10,52	-15%
		2	12,31	7,86	-57%
		3	16,24	9,91	-64%
		4	18,69	10,32	-81%
		5	15,78	10,13	-56%
	Média	15,03	9,75	-54%	
	C.V.	19%	11%	-68%	
	Min.	12,13	7,86	-54%	
	Max.	18,69	10,52	-78%	

Dos valores observados, acima de tudo importa realçar a forte correlação entre os módulos de elasticidade, justificada anteriormente nesta secção. No entanto, mais uma vez se sublinha o facto de o número de resultados ser muito reduzido, traduzido no valor inverosímil da correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade para a Sapelli ($r^2=-0,86$).

5.5.2 Ensaio em vigas e em mesoprovetes

Na relação dos ensaios à flexão entre vigas, à escala estrutural, com os ensaios à tração em mesoprovetes, estudaram-se as correlações para a aferição das propriedades de referência das vigas, nomeadamente, a partir da tensão de rotura à tração ($f_{t,0}$) e do módulo de elasticidade à tração ($E_{t,0}$), ambos no sentido paralelo às fibras. Uma vez que não se registaram quaisquer tipo de correlações, as respetivas Figuras (E.26 e E.27) e Tabelas (E.7 e E.8) de resultados, poderão ser consultados no Anexo E.

5.6 Comparação de resultados com a campanha experimental de ensaios apresentada no Capítulo 4

Na presente secção, procura avaliar-se a relação entre os resultados obtidos, nas campanhas de ensaios do presente Capítulo, com os resultados das campanhas de ensaios apresentadas no Capítulo 4.

5.6.1 Ensaio em vigas à escala real

Na Tabela 5.19 mostram-se os resultados obtidos nas campanhas de ensaios em vigas à escala real e os resultados obtidos nos ensaios em provetes de pequenas dimensões estudados no Capítulo 4. Foram analisadas as tensões de rotura à flexão e os módulos de elasticidade à flexão. Relembrar, ainda, que o universo de provetes, para a espécie de Câmbala, corresponde a 5 vigas e 420 provetes de pequenas dimensões; para a Sapelli, a 5 vigas e a 495 provetes de pequenas dimensões (com a exceção das vigas 1, para a análise das tensões de rotura à tração, em ambas as espécies).

Tabela 5.19: Comparação de resultados das tensão de rotura à flexão das amostras de provetes de pequenas dimensões ensaiados no Cap. 4 (f_{mp12} e E_{mp12}), com as amostras de vigas ensaiadas no Cap. 5 ($f_{mv12}^{a)}$ e E_{mv12}).

Espécie	Amostra completa	Cap. 4	Cap. 5	Cap. 4	Cap. 5
		f_{mp12} (MPa)	$f_{mv12}^{a)}$ (MPa)	E_{m12} (GPa)	E_{mv12} (GPa)
Câmbala	Média	105,3	60,61	9,95	15,33
	C.V. (%)	31,60%	7%	18,50%	17%
	Min.	16,62	55,02	3,8	11,97
	Max.	171,78	64,76	13,86	18,64
Sapelli	Média	118,59	72,09	10,56	15,03
	C.V. (%)	19,90%	6%	16,30%	19%
	Min.	39,42	66,30	5,76	12,13
	Max.	172,74	75,57	15,75	18,69

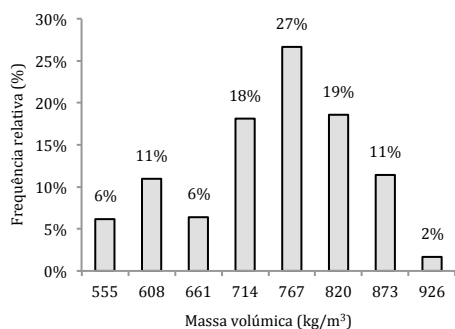
^{a)} Para f_{mv12} , pelos motivos já referidos, não foram incluídos os resultados das vigas 1.

5.6.2 Ensaio em provetes extraídos das vigas

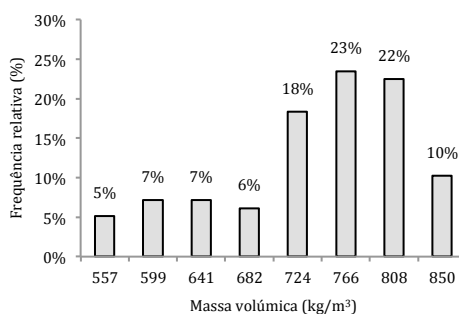
Nesta secção, apresentam-se os histogramas das distribuições gráficas dos resultados das propriedades de referência das amostras analisadas nos Capítulos 4 e 5. Os resultados são os corrigidos para o teor em água de 12%, aferidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. São também apresentadas tabelas de resumo comparativas de resultados das campanhas de ensaios. Lembra-se que, relativamente à dimensão das amostras, para a Câmbala foram analisados 420 provetes no Capítulo 4 e 98 no Capítulo 5 e para a Sapelli foram analisados 495 provetes no Capítulo 4 e 98 no Capítulo 5.

5.6.2.1 Comparação dos resultados das amostras de Câmbala

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, mostram os histogramas de distribuição das amostras de Câmbala, em função das propriedades de referência das amostras dos Capítulos 4 e 5. As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33, revelam as correlações entre as propriedades, dentro de cada campanha de ensaios.

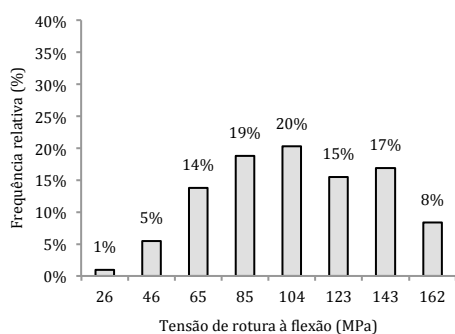


a) Capítulo 4

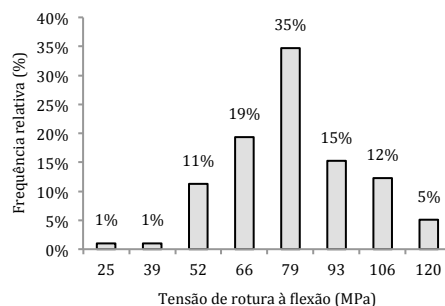


b) Capítulo 5

Figura 5.28: Histogramas para a espécie de Câmbara, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas massas volúmicas.

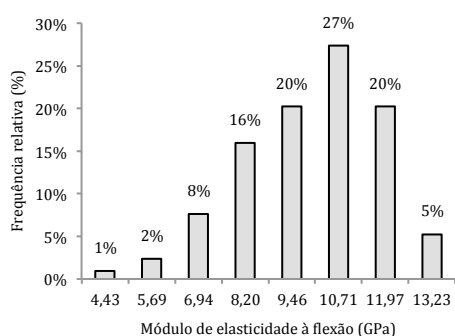


a) Capítulo 4

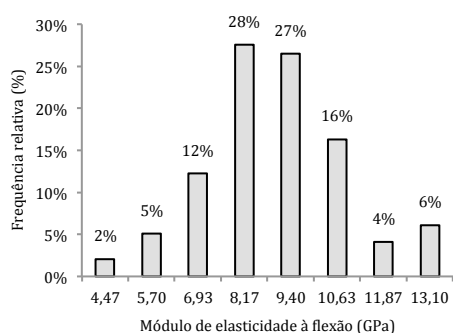


b) Capítulo 5

Figura 5.29: Histogramas para a espécie de Câmbara, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas tensões de rotura à flexão.

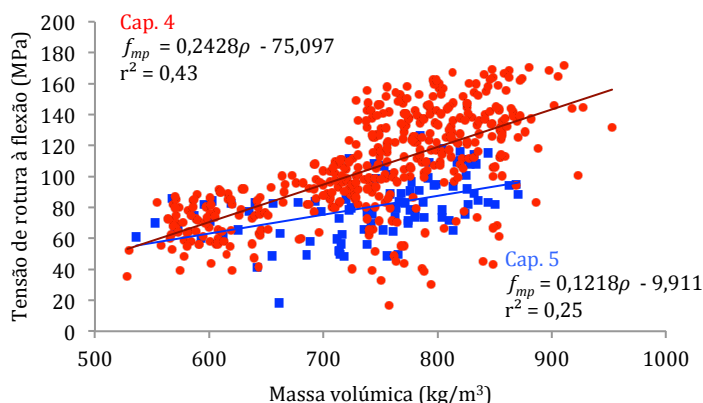


a) Capítulo 4



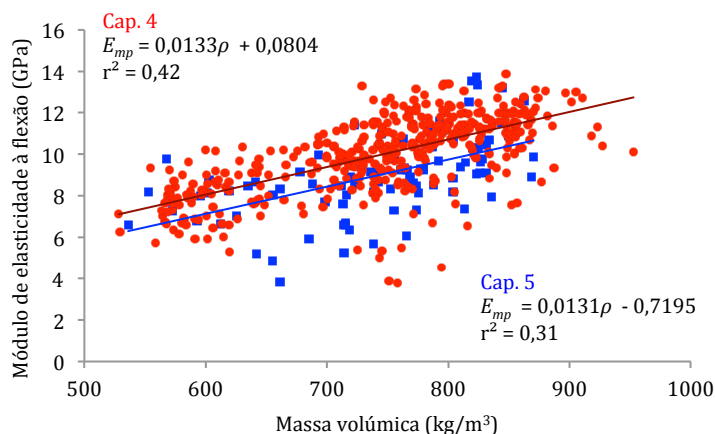
b) Capítulo 5

Figura 5.30: Histogramas para a espécie de Câmbara, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5, em função dos módulos de elasticidade à flexão.



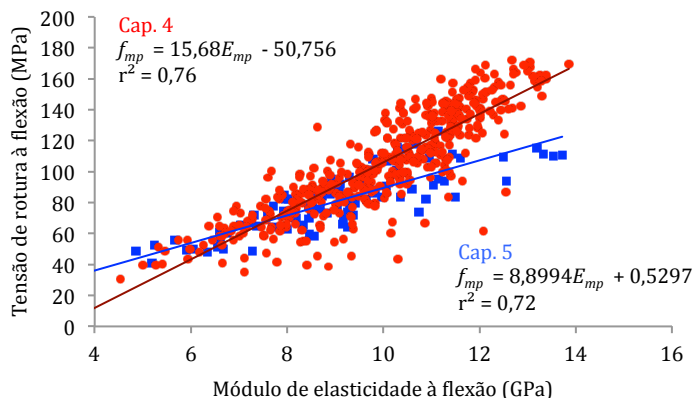
Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.31: Correlação entre a massa volúmica e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.



Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.32: Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.



Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.33: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Câmbala dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.

A Tabela 5.20, evidencia o resumo dos resultados de cada campanha de ensaio de provetes de pequenas dimensões, Capítulo 4 e 5, designadamente: média, coeficiente de variação, valor mínimo e valor máximo.

Tabela 5.20: Comparação de resultados da Câmbala, das campanhas de ensaios realizadas nos Capítulos 4 e 5, para aferição da massa volúmica (ρ_{12} e ρ_{p12}), da tensão de rotura à flexão (f_{m12} e f_{mp12}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_{m12} e E_{mp12}), obtidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.

Espécie	Amostra completa	Cap. 4	Cap. 5	Cap. 4	Cap. 5	Cap. 4	Cap. 5
		ρ_{12} (kg/m ³)	ρ_{p12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	f_{mp12} (MPa)	E_{m12} (GPa)	E_{mp12} (GPa)
Câmbala	Média	743,12	741,23	105,3	80,36	9,95	8,97
	C.V. (%)	12,1%	11,0%	31,6%	24,8%	18,5%	21,2%
	Min.	528,38	536,10	16,62	18,28	3,8	3,85
	Max.	952,75	870,47	171,78	126,45	13,86	13,72

De uma forma geral, podemos constatar que, apesar das massas volúmicas indicarem estar-se perante duas amostras semelhantes, dentro da mesma espécie, relativamente às propriedades mecânicas, a amostra do Capítulo 4 apresenta resultados substancialmente superiores, na ordem dos 31% para a tensão de rotura à flexão e dos 11% para o módulo de elasticidade à flexão.

5.6.2.2 Comparação dos resultados das amostras de Sapelli

As Figura 5.34, 5.35 e 5.36, apresenta os histogramas de distribuição das amostras de Sapelli, em função das propriedades de referência das amostras dos Capítulos 4 e 5. As Figuras 5.37, 5.38 e 5.39, mostram as correlações entre as propriedades, dentro de cada campanha de ensaios.

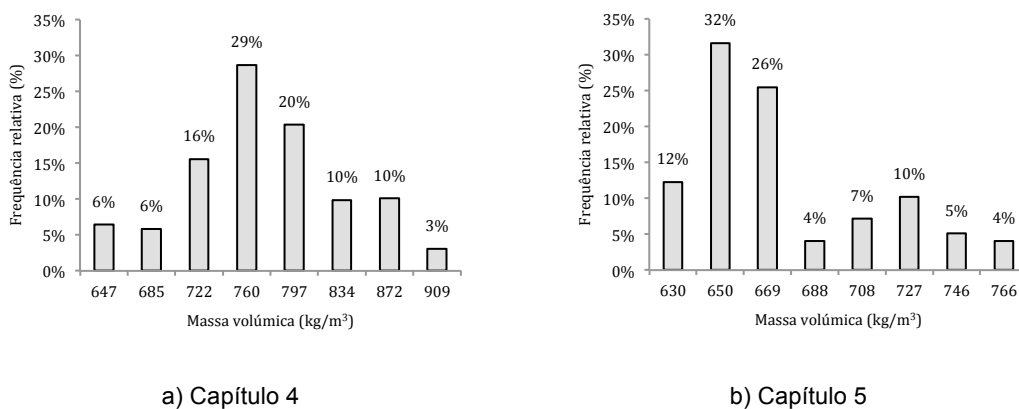


Figura 5.34: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas massas volúmicas.

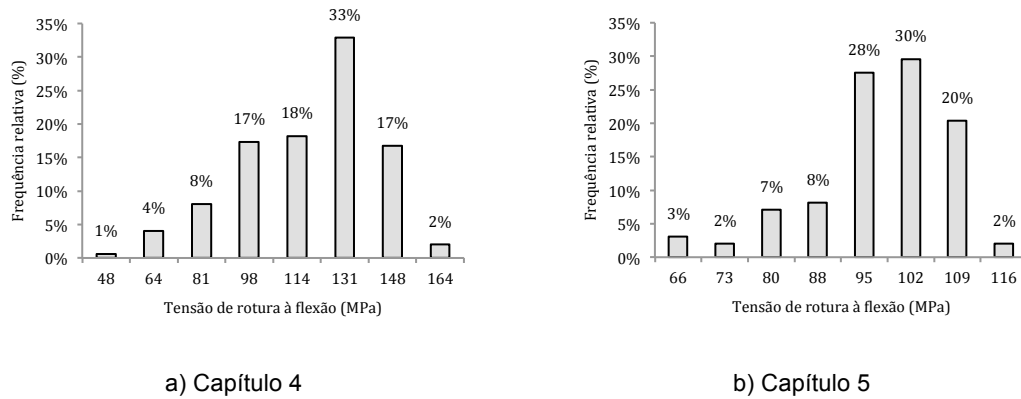


Figura 5.35: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função das suas tensões de rotura à flexão.

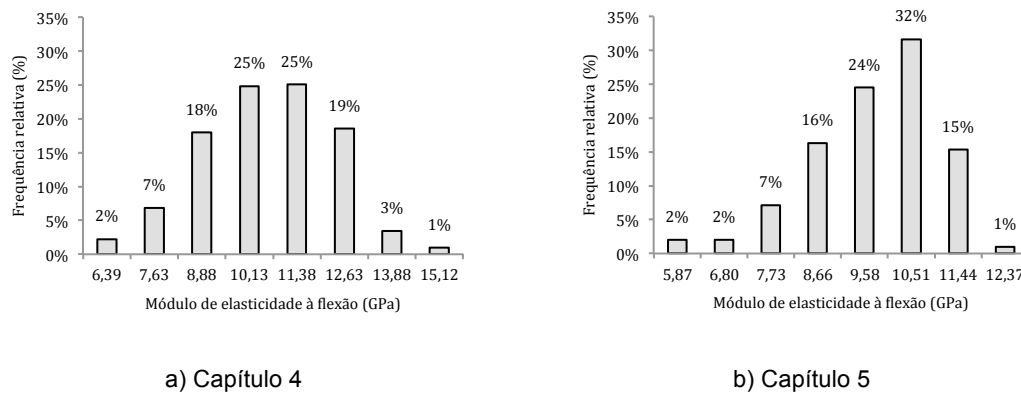
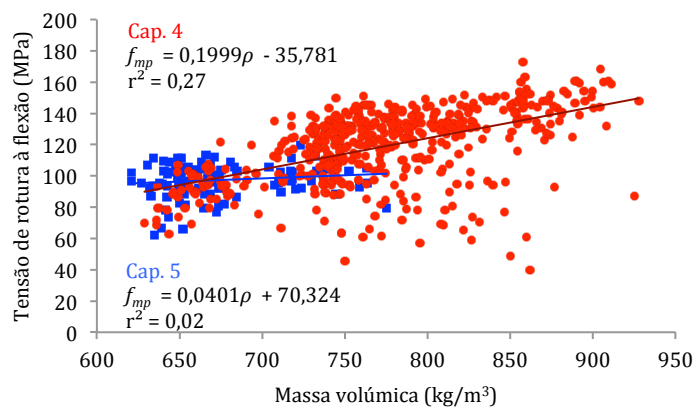
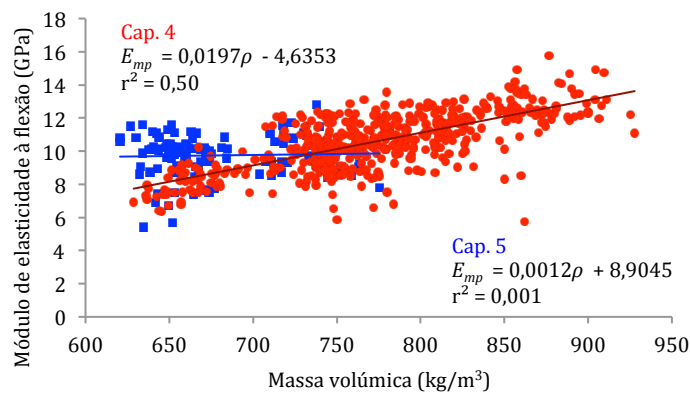


Figura 5.36: Histogramas para a espécie de Sapelli, da distribuição dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, do Capítulos 4 e 5, em função dos módulos de elasticidade à flexão.



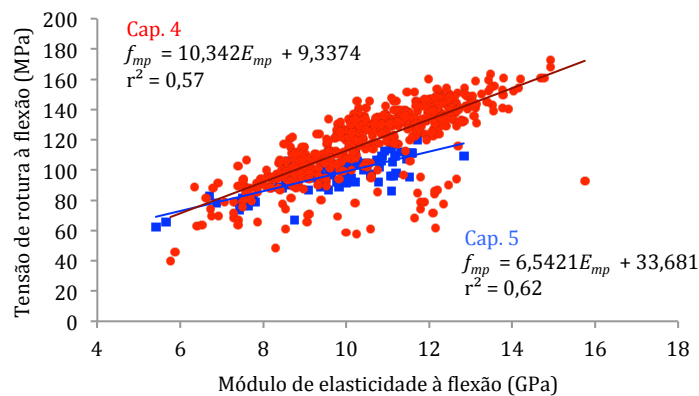
Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.37: Correlação entre a massa volúmica e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.:



Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.38: Correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.



Legenda: - Provetes Capítulo 4; - Provetes Capítulo 5

Figura 5.39: Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensão de rotura à flexão, das amostras de Sapelli dos Capítulos 4 e 5, de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.

A Tabela 5.21, apresenta o resumo dos resultados de cada campanha de ensaio de provetes de pequenas dimensões, Capítulo 4 e 5, nomeadamente: média, coeficiente de variação, valor mínimo e valor máximo.

Tabela 5.21: Comparação de resultados da Sapelli, das campanhas de ensaios realizadas nos Capítulos 4 e 5, para aferição da massa volúmica (ρ_{12} e ρ_{p12}), da tensão de rotura à flexão (f_{m12} e f_{mp12}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_{m12} e E_{mp12}), obtidos através de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.

Espécie	Amostra completa	Cap. 4	Cap. 5	Cap. 4	Cap. 5	Cap. 4	Cap. 5
		ρ_{12} (kg/m ³)	ρ_{p12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	f_{mp12} (MPa)	E_{m12} (GPa)	E_{mp12} (GPa)
Sapelli	Média	772,2	674,84	118,59	97,40	10,56	9,74
	C.V. (%)	8,0%	5,5%	19,9%	11,2%	16,3%	13,4%
	Min.	628,73	620,59	39,42	62,44	5,76	5,41
	Max.	927,74	775,40	172,74	119,76	15,75	12,83

A amostra analisada no Capítulo 4 apresenta melhores capacidades mecânicas que a amostra do Capítulo 5, capacidades essas corroboradas, à partida, pela maior massa volúmica apresentada. Desde logo, a amostra do Capítulo 4 apresenta uma massa volúmica, em média, 14% superior. A tensão de rotura apresenta-se 22,4% superior e o módulo de elasticidade 8,4% superior.

Com base nos resultados apresentados, poderá questionar-se a filosofia assumida pelo método alternativo descrito na EN 384 (CEN, 2010), sobre o sentido e significado de espécies semelhantes.

Capítulo 6

ANÁLISE DE RESULTADOS E PROPOSTAS DE NOVOS MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS

RESUMO: No presente capítulo é realizada uma análise aos resultados obtidos nas campanhas de ensaios descritas nos capítulos anteriores, nomeadamente: aos resultados obtidos nos ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, descritos no Capítulo 4; e aos resultados obtidos nos ensaios em vigas e em provetes extraídos destas, descritos no Capítulo 5.

Com base nas análises de resultados e na bibliografia da área, são apresentadas propostas de modelos alternativos, com vista à classificação mecânica de amostras de espécies de folhosas tropicais.

6.1 Introdução

Ao longo dos Capítulos 4 e 5, foram descritas as campanhas de ensaios realizadas e os resultados obtidos, tendo em vista o principal objetivo do presente trabalho: o desenvolvimento de modelos alternativos de caracterização mecânica de madeiras tropicais.

A necessidade premente em se obter valores característicos para as novas espécies, de forma a serem valorizadas e se poderem tornar alternativas viáveis às espécies tropicais mais procuradas, será uma forma de colaborar para a sustentabilidade de toda a floresta tropical, preservando muitas das espécies em risco de extinção em determinadas zonas do globo.

Pretende desenvolver-se modelos capazes de determinar as capacidades mecânicas das novas madeiras tropicais, tendo por base a atual realidade de importação, caracterizada pela chegada de pequenas quantidades de madeira de cada espécie aos portos europeus.

Da presente análise, foram excluídos os valores correspondentes às 3ª e 4ª Fases das correlações estabelecidas entre as propriedades aferidas dos provetes de pequenas dimensões. Entendeu-se que, antes de se poder avançar com considerações base para a exclusões dos valores, resultantes nas 3ª e 4ª Fases das correlações, haverá necessidade de fundamentar os conceitos com novas e diferentes campanhas de ensaios.

6.2 Análise dos resultados da campanha de ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos

Do Capítulo 4, são analisados os valores obtidos para as propriedades de referência das amostras, estabelecidas correlações entre elas e delas com o módulo de elasticidade dinâmico. Por fim, os seus resultados finais são enquadrados com os valores apresentados pela bibliografia da área.

6.2.1 Análise dos valores das propriedades de referência

Começando pela caracterização mecânica das espécies analisadas, realizada através de ensaios à flexão estática em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos e da quantificação das massas volúmicas, através das pesagens e volumetrias dos provetes, cujos resulta-

dos foram apresentados na secção 4.3, interessará observar os valores finais obtidos para a massa volúmica (ρ_{12}), o módulo de elasticidade em flexão (E_{m12}) e a tensão de rotura em flexão (f_{m12}). A Tabela 6.1 apresenta o resumo dos valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médias e coeficientes de variação (C.V), incluindo os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din12}). Sublinhe-se que os valores apresentados correspondem aos resultados totais dos ensaios para cada propriedade (420 provetes de Câmbala e 495 provetes de Sapelli), corrigidos para o teor em água de 12% (correspondente à Fase 2, descrita no Capítulo 4).

Tabela 6.1: Valores finais das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, das amostras de provetes de pequenas dimensões, do Capítulo 4.

Espécie	Resultados da amostra	EN 384 (sem limites)	EN 384 (w<8%)	EN 384 (w<8%)	Sandoz (1989) EN 384
		ρ_{12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	E_{m12} (GPa)	E_{din12} (GPa)
Câmbala (420 provetes)	Média	743,12	105,3	9,95	15,88
	C.V. (%)	12,10%	31,60%	18,50%	21,00%
	Min.	528,38	16,62	3,8	4,84
	Max.	952,75	171,78	13,86	28,62
Sapelli (495 provetes)	Média	772,2	118,59	10,56	18,49
	C.V. (%)	8,00%	19,90%	16,30%	16,30%
	Min.	628,73	39,42	5,76	7,07
	Max.	927,74	172,74	15,75	26,03

A partir do valor do coeficiente de variação (C.V.), pode avaliar-se a dispersão dos resultados obtidos para as diferentes propriedades, em ambas as espécies. Ao observar-se os valores de C.V. para a massa volúmica, verifica-se uma baixa a moderada dispersão de resultados, sendo de 12,1% e de 8,0%, respetivamente para a Câmbala e para a Sapelli. Em relação ao módulo de elasticidade em flexão, as espécies apresentam uma moderada dispersão de resultados, sendo ligeiramente superiores a 15%. Quanto ao valor da tensão de rotura à flexão, a Sapelli volta a apresentar um resultado que espelha uma dispersão moderada, de 19,9%, enquanto que a Câmbala já apresenta uma elevada dispersão, com um C.V. de 31,6%. De uma forma geral, baseando-se nos valores dos coeficientes de variação apresentados para cada propriedade, parece razoável concluir estar-se perante uma baixa a mediana dispersão de resultados, com a exceção dos valores da tensão de rotura à flexão para a Câmbala.

Fazendo uma análise comparativa dos valores médios com os valores de referência descritos e apresentados na secção 2.5.1.4, para a Câmbala e na secção 2.5.2.4 para a Sapelli, pode constatar-se terem-se obtido resultados situados nos intervalos assumidos pela base de dados da PROTA (2008), com a exceção do valor para a massa volúmica da Sapelli, para a qual se obteve o valor de 772,2 kg/m³, aproximadamente 3% acima do limite superior de 750 kg/m³, previsto pela mesma base de dados. Quando comparados com os valores de referência apre-

sentados na Tabela 2.8 (Tsoumis, 1991) para a Câmbala e na Tabela 2.11 (CIRAD, 2003) para a Sapelli, constata-se que, em ambas as espécies, as massas volúmicas apresentam resultados substancialmente superiores. O valor apresentado por Tsoumis (1991) é 83% do valor obtido no presente estudo para a Câmbala, enquanto que o valor apresentado pelo CIRAD (2003) é 89% do obtido pelo presente estudo para a Sapelli. No sentido inverso, constata-se que os módulos de elasticidade à flexão ficam abaixo dos valores apresentados por Tsoumis (1991) e pelo CIRAD (2003). Para a Câmbala, o valor obtido por Tsoumis (1991) é 13% superior, e o do CIRAD (2003), chega a ser 32% superior para a Sapelli. Por fim, relativamente à tensão média de rotura, verifica-se uma pequena diferença de 5% para a Câmbala, sendo superior nos valores apresentados por Tsoumis (1991). Para a Sapelli, o valor apresentado pelo CIRAD (2003), situa-se em 85% do valor da tensão de rotura à flexão, obtido no presente estudo. Na Tabela 6.2, apresenta-se o resumo das comparações entre os diferentes estudos acabados de analisar. Na mesma tabela, também se incluíram os valores do CIRAD para a Câmbala e a partir dos quais se obtiveram relações de proporcionalidade com o presente estudo, muito semelhantes às obtidas para a Sapelli.

Tabela 6.2: Comparação dos valores das propriedades de referência obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões, ensaiadas no Capítulo 4, com valores da bibliografia da área.

Espécie	Fonte	ρ (kg/m ³)	f_m (MPa)	E_m (GPa)
Câmbala	Tsoumis (1991)	620	111	11,27
	CIRAD (Tropix, 2015)	640	87	12,8
	Protabase (PROTA, 2008)	550-750	75-156	8,3-13,3
	Estudo Presente (EP)	743,12	105,3	9,95
	Tsoumis/EP	0,83	1,05	1,13
	CIRAD/EP	0,86	0,83	1,29
Sapelli	CIRAD (Tropix, 2015)	690	102	13,96
	Protabase (PROTA, 2008)	560-750	95-184	8,9-13,8
	Estudo Presente (EP)	772,2	118,59	10,56
	CIRAD/EP (2007)	0,89	0,86	1,32

Com base nos valores médios das propriedades de referência obtidos das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, alguns estudos têm procurado apresentar coeficientes para a correlação com os valores característicos, a obter de ensaios em provetes de dimensões estruturais (Lanvin et al. (2009)), de acordo com o previsto no modelo alternativo da EN 384 (CEN, 2010) para madeiras de folhosas.

Alguns estudos apresentados por Jamil et al. (2013), têm demonstrado que os valores para o módulo de elasticidade à flexão, no sentido das fibras, em provetes de pequenas dimensões são ligeiramente inferiores aos obtidos em provetes de dimensões estruturais; e que, no caso

dos valores da tensão de rotura à flexão, para provetes isentos de defeitos, se verifica uma proximidade relevante entre resultados de provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais.

Nesse sentido, entendeu-se ser relevante apresentar os valores característicos, calculados de acordo com o previsto na norma EN 338 (CEN, 2009a), mas, desta feita, baseados em resultados de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Ravenshorst et al. (2010) consideraram também relevante a análise de valores correspondentes ao percentil 5% de amostras de provetes de pequenas dimensões, quando se comparava a espécie de Cumuaru, de diferentes origens e com valores médios semelhantes em provetes de pequenas dimensões, mas com diferenças de 30% nos valores médios da tensão de rotura à flexão em provetes de dimensões estruturais.

A Tabela 6.3 apresenta os valores determinados pelos mesmos procedimentos que os valores característicos obtidos através de provetes de dimensões estruturais, segundo a EN 384 (CEN, 2010), para as propriedades de referência das espécies analisadas, baseados nos ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Para os valores da massa volúmica (ρ_{kp}) e da tensão de rotura à flexão (f_{mkp}), foram calculados os valores correspondentes ao percentil de 5%. Para o valor do módulo de elasticidade à flexão (E_{mkp}), multiplicou-se por 0,95 o valor médio das amostras de cada espécie, de acordo com a EN 384 (CEN, 2010).

Tabela 6.3: Valores característicos das propriedades de referência, obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões do capítulo 4.

Espécie	ρ_{kp} (kg/m ³)	f_{mkp} (MPa)	E_{mkp} (GPa)
Câmbala	574,60	51,48	9,45
Sapelli	658,12	74,00	10,04

6.2.2 Análise das correlação entre as propriedades

Relativamente às correlações estabelecidas, apresenta-se a Tabela 6.4 com as expressões e valores dos coeficientes de determinação finais para a relação entre as propriedades das madeiras para o teor em água de 12%, correspondentes à 2ª Fase (sem exclusão de valores “anormais”).

Começando por estudar as correlações obtidas pela massa volúmica com as restantes propriedades, constata-se, para as duas espécies, a existência de uma relação moderada, quando correlacionada com o E_{m12} , obtendo-se os valores de 0,421 e 0,5 para os coeficientes de determinação da amostra de Câmbala e Sapelli, respectivamente. No caso da Câmbala, existe

também uma correlação moderada entre a massa volúmica e a f_{m12} , com um coeficiente de determinação de 0,432, ficando a Sapelli pelos 0,273.

Tabela 6.4: Expressões de correlação entre as propriedades obtidas das campanhas de ensaios das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 4, correspondentes à 2ª Fase.

Espécie	Relação	Expressão de regressão linear	r^2
Câmbala	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0133\rho_{12}-0,0804$	0,421
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,2428\rho_{12}-75,097$	0,432
	$E_{m12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 15,68E_{m12}-50,756$	0,756
	$V_{12} - \rho_{12}$	$\rho_{12} = 0,0359V_{12}+578,02$	0,025
	$V_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0026V_{12}-1,8178$	0,306
	$V_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,0326V_{12}-44,685$	0,153
	$E_{din12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,4349E_{din12}+3,0454$	0,620
	$E_{din12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 6,6927E_{din12}-1,0045$	0,452
Sapelli	$\rho_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0205\rho_{12}-5,174$	0,500
	$\rho_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,2361\rho_{12}-60,544$	0,273
	$E_{m12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 10,342E_{m12}+9,3374$	0,566
	$V_{12} - \rho_{12}$	$\rho_{12} = 0,0467V_{12}+544,39$	0,062
	$V_{12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,0026V_{12}-2,1313$	0,250
	$V_{12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 0,0301V_{12}-28,318$	0,177
	$E_{din12} - E_{m12}$	$E_{m12} = 0,4147E_{din12}+2,8956$	0,529
	$E_{din12} - f_{m12}$	$f_{m12} = 4,512E_{din12}+35,148$	0,331

Ao observar-se as relações entre E_{m12} e f_{m12} , constata-se uma forte correlação para a amostra de Câmbala, obtendo-se um valor de 0,756 para o seu coeficiente de determinação. No caso da Sapelli, a mesma correlação apresenta uma relação moderada, com o coeficiente de determinação de 0,566.

Também a relação entre E_{din12} e E_{m12} , para a amostra de Câmbala, apresenta uma boa correlação, com o coeficiente de determinação a atingir o valor de 0,62. No caso da Sapelli o coeficiente de determinação é de 0,529, demonstrando existir, também aqui, uma relação moderada.

Entre o E_{din12} e a f_{m12} , é ainda observada uma correlação moderada para a amostra de Câmbala, obtendo-se um coeficiente de determinação de 0,452.

Interessará ainda, analisar a evolução das correlações ao longo das 4 Fases. A Tabela 6.5 apresenta o resumo dos valores dos respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 6.5: Resumo dos valores de r^2 para as diferentes fases das correlações entre as propriedades, obtidas das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 4.

Espécie	Relação	Coeficientes de determinação (r^2)			
		1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase	4ª Fase
Câmbala	$\rho - E_m$	0,452	0,421	0,544	0,623
	$\rho - f_m$	0,437	0,432	0,600	0,675
	$E_m - f_m$	0,765	0,756	0,818	0,852
	$v - \rho$	0,026	0,025	0,013	0,031
	$v - E_m$	0,307	0,306	0,468	0,557
	$v - f_m$	0,153	0,153	0,240	0,346
	$E_{din} - E_m$	0,640	0,620	0,806	0,841
	$E_{din} - f_m$	0,455	0,452	0,708	0,781
Sapelli	$\rho - E_m$	0,508	0,500	0,573	0,655
	$\rho - f_m$	0,265	0,273	0,487	0,586
	$E_m - f_m$	0,567	0,566	0,787	0,823
	$v - \rho$	0,065	0,062	0,085	0,114
	$v - E_m$	0,242	0,250	0,294	0,358
	$v - f_m$	0,177	0,177	0,279	0,375
	$E_{din} - E_m$	0,518	0,529	0,600	0,671
	$E_{din} - f_m$	0,324	0,331	0,542	0,610

De uma forma geral, observa-se que a exclusão dos resultados considerados valores anormais, correspondentes à Fase 3, provoca uma forte subida nas correlações. Assumindo a exclusão dos 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear, correspondente à Fase 4, obtêm-se excelentes valores para os coeficientes de determinação, abrindo a possibilidade de previsão das propriedades fundamentais, a partir do módulo de elasticidade dinâmico.

6.3 Análise dos resultados das campanhas de ensaios em vigas

Após a realização das diferentes campanhas de ensaios, descritas no Capítulo 5, procede-se, em seguida, à análise dos seus resultados.

6.3.1 Análise dos valores das propriedades obtidas em cada campanha de ensaios

Tal como aconteceu na análise dos resultados referentes às campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, realizadas segundo a metodologia descrita no Capítulo 4, para a análise dos resultados obtidos das campanhas de ensaios em vigas e nos provetes extraídos destas, começou por avaliar-se as propriedades obtidas em cada campanha. Relembrar apenas que: da campanha de ensaios em vigas foram obtidas as propriedades do módulo de elasticidade à flexão global (E_{mg}) e local (E_{ml}) e a tensão de rotura à flexão (f_{mv}); da campanha de ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, extraídos das vigas, foram obtidas as propriedades do módulo de elasticidade à flexão (E_{mp}), da tensão de rotura à flexão (f_{mp}), do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), e quantificadas as massas volúmicas de cada provete (ρ); da campanha e ensaios em mesoprovetes, foram obtidas as propriedades do módulo de elasticidade à tração no sentido das fibras (E_t) e a tensão de rotura à tração (f_t), também no sentido das fibras.

6.3.1.1 Propriedades das vigas ensaiadas à flexão

Observando os resultados obtidos dos ensaios à flexão das vigas (Tabela 5.4), constata-se que as vigas 1 de ambas as espécies, apresentam valores para a tensão de rotura à flexão, substancialmente inferiores às restantes vigas. No caso da Câmbara, o segundo valor mais baixo chega a ser 49% superior ao obtido para a viga 1. Para a Sapelli, o segundo valor mais baixo, fica muito próximo de ser 3 vezes superior ao obtido na viga 1. Relembre-se que as vigas 1, das duas espécies, não preenchem os requisitos mínimos impostos pela norma BS 5756 (2007).

Relativamente à dispersão dos resultados das tensões de rotura à flexão, para a Câmbara obteve-se um valor do coeficiente de variação (C.V.) de 20%, enquanto que para a Sapelli, a dispersão duplica, atingindo-se um C.V. de 40,9%. No entanto, se os coeficientes de variação fossem calculados considerando apenas as vigas que preencheram os requisitos da BS 5756 (2007) (vigas 2, 3, 4 e 5, de cada espécie), seriam atingidos os valores de C.V. de 7% e 6%, respetivamente para a Câmbara e para a Sapelli, demonstrando uma enorme homogeneidade entre os valores das tensões de rotura à flexão (Tabela 5.17).

Na EN 1912 (CEN, 2012b), está prevista a atribuição da Classe de Resistência D40, a ambas as espécies. Segundo a classificação visual, imposta pela BS 5756 (2007), para as duas espécies, as vigas 2, 3, 4 e 5 verificam ter as condições necessárias para a atribuição da Classe de Resistência, facto que se vem a confirmar pelos ensaios mecânicos, com valores de tensão de rotura à flexão, significativamente, superiores aos 40 MPa exigidos pela Classe.

No que se refere ao módulo de elasticidade, interessa analisar os valores relativos aos módulos de elasticidade globais, após correção dos seus valores para o teor em água de referência de 12% e da aplicação da expressão 3.5, de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2010). É possível constatar que, apesar das vigas 1 de cada espécie não verificarem as condições da BS 5756 (2007), os seus resultados imiscuem-se entre os resultados das restantes vigas. Este facto vai de encontro ao descrito em estudos da área, nos quais se deduz que o módulo de elasticidade à flexão acaba por ser uma propriedade mecânica menos sensível à existência de defeitos na madeira (Jamil et al. 2013). Na realidade, para ambas as espécies, existe uma viga com valor inferior às viga 1: a viga 4, no caso da Câmbala e a viga 2, no caso da Sapelli. Por este motivo, foi considerada a análise de resultados com as 5 vigas de cada espécie, constatando-se os valores para o coeficiente de variação (C.V.) de 16,8% e 18,6% (Tabela 5.5), respetivamente para a Câmbala e para a Sapelli. Os valores de C.V. traduzem uma dispersão moderada dos resultados.

O facto da Câmbala ser uma madeira de Classe D40 e para a Sapelli estar prevista a mesma Classe de Resistência, deveria implicar que a média dos resultados dos módulos de elasticidade atingissem valores, iguais ou superiores a 95% de 13 GPa (12,35 GPa). Esse resultado foi atingido pelas médias das 5 vigas de cada espécie, situando-se em 15,33 GPa para a Câmbala, e em 15,03 GPa para a Sapelli.

Quanto às correlações entre as três propriedades mecânicas, tensões de rotura (f_m), módulos de elasticidade globais ($E_{m,g}$) e módulos de elasticidade locais ($E_{m,l}$), todas elas à flexão no sentido das fibras, observa-se uma fortíssima correlação entre os módulos de elasticidade (globais e locais), para ambas as espécies, com $r^2=0,92$ para a Câmbala e 0,97 para a Sapelli. Quanto às restantes correlações entre as propriedades mecânicas, para a espécie de Sapelli os coeficientes de determinação continuam a ser substancialmente elevados, superiores a 0,94. Para a espécie de Câmbala, os respetivos coeficientes de determinação acabam por descer um pouco, situando-se, ainda assim, acima dos 0,6. Traduzindo uma boa correlação entre as propriedades.

Apesar da dimensão da amostra ser bastante reduzida, os valores apresentados indiciam uma boa correlação entre as propriedades. Porém, ao estabelecer-se correlações com a massa volúmica, obtida através das médias das massas volúmicas dos provetes extraídos das vigas, observam-se expressões de regressão linear com declive negativo, no caso da espécie de Sapelli, traduzindo um reduzir das propriedades mecânicas, à medida que a massa volúmica aumenta. Naturalmente que este facto apenas poderá ser explicado pela reduzido número de provetes na amostra, o que não permite aferir, com credibilidade uma tendência de correlação entre as massas volúmicas e as restantes propriedades mecânicas. Todos os resultados podem ser consultados na Tabela 5.13.

6.3.1.2 Propriedades dos provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos extraídos das vigas

Sobre os resultados obtidos nas campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, apresentados na secção 5.3.2, a primeira nota prende-se com as diferenças mínimas apresentadas pelas propriedades, após as correções dos teores em água, segundo procedimentos previstos pelas normas ISO e os procedimentos da EN 384 (CEN, 2010). A diferença mais significativa acaba por se verificar na correção da massa volúmica da Câmbala, que se situou em 1,2%. Esta evidência vem corroborar o já verificado no Capítulo 4, de que se torna praticamente indiferente a escolha do procedimento a utilizar para a correção do teor em água dos provetes.

Nesse sentido, pelos mesmos motivos apresentados no Capítulo 4, vão assumir-se por resultados finais das propriedades dos provetes de madeira, os valores obtidos após as correções do teor em água, realizadas segundo o procedimento previsto na EN 384 (CEN, 2010). A Tabela 6.6 resume os valores finais médios, mínimos (Min.), máximos (Max.), e coeficientes de variação (C.V.) das propriedades de referência e dos módulos de elasticidade dinâmicos.

Tabela 6.6: Valores finais das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, das amostras de provetes de pequenas dimensões, do Capítulo 5.

Espécie	Resultados da amostra	EN 384 (sem limites)	EN 384 (w<8%)	EN 384 (w<8%)	Sandoz (1989) EN 384
		ρ_{12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	E_{m12} (GPa)	E_{din12} (GPa)
Câmbala (98 provetes)	Média	741,23	80,36	8,97	13,79
	C.V. (%)	11,0%	24,8%	21,2%	18,9%
	Min.	536,10	18,28	3,85	8,29
	Max.	870,47	126,45	13,72	20,49
Sapelli (98 provetes)	Média	674,84	97,40	9,74	13,44
	C.V. (%)	5,5%	11,2%	13,4%	11,3%
	Min.	620,59	62,44	5,41	11,05
	Max.	775,40	119,76	12,83	18,40

Os resultados finais das propriedades de referência, foram comparados com os valores existentes na bibliografia, abordados nas secções 2.5.1.4 e 2.5.2.4, respetivamente para a Câmbala e para a Sapelli. A Tabela 6.7 resume o enquadramento dos valores.

Tabela 6.7: Comparação dos valores das propriedades de referência obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões, ensaiadas no Capítulo 5, com valores da bibliografia da área.

Espécie	Fonte	ρ (kg/m ³)	f_m (MPa)	E_m (GPa)
Câmbala	Tsoumis	620	111	11,27
	CIRAD	640	87	12,8
	Protabase	550-750	75-156	8,3-13,3
	Estudo Presente (EP)	741,23	80,36	8,97
	Tsoumis/EP	0,84	1,38	1,26
	CIRAD/EP	0,86	1,08	1,43
Sapelli	CIRAD	690	102	13,96
	Protabase	560-750	95-184	8,9-13,8
	Estudo Presente (EP)	674,84	97,4	9,74
	CIRAD/EP	1,02	1,05	1,43

Da Tabela 6.7 pode constatar-se que os resultados obtidos no presente estudo, para as duas espécies, se enquadram nos limites previstos pela PROTA (2008), para as propriedades de referência das duas espécies. Em relação aos valores apresentados por Tsoumis (1991), são verificadas algumas diferenças no caso da espécie de Câmbala. Para a massa volúmica o presente estudo apresenta valores substancialmente mais elevados, ficando o registo de Tsoumis (1991) em 84% do valor obtido no presente trabalho. Para a tensão de rotura à flexão, o valor obtido por Tsoumis (1991) situa-se 38% acima do valor do presente trabalho. Para o módulo de elasticidade à flexão, o valor obtido por Tsoumis (1991) volta a ser superior, desta feita em 26%.

No caso da Sapelli, comparando os valores previstos pelo CIRAD (2003) com os obtidos no presente trabalho, observa-se uma grande semelhança de resultados para a massa volúmica e para a tensão de rotura à flexão, sendo que, no registo apresentado pelo CIRAD (2003), os seus valores são superiores em 2 e 5%, respetivamente. Para o módulo de elasticidade à flexão, o registo apresentado pelo CIRAD (2003) apresenta-se já substancialmente superior, precisamente em 43%, curiosamente o mesmo valor registado acima da espécie de Câmbala.

Relativamente à dispersão dos resultados de cada propriedade, em relação à Câmbala, é possível constatar a sua homogeneidade de valores, variando entre a baixa e a média dispersão, consoante a característica avaliada. Pode encontrar-se um coeficiente de variação de relativa baixa dispersão para a massa volúmica (11,0%), e de moderada dispersão para o módulo de elasticidade dinâmico (18,9%). Ligeiramente mais altos são os coeficientes de variação do módulo de elasticidade à flexão (21,2%) e da tensão de rotura à flexão (24,8%) (Tabela 6.6).

Quanto aos resultados dos provetes de Sapelli, verifica-se uma baixa dispersão para todas as características determinadas, obtendo-se valores para o coeficiente de variação de 5,5% para a massa volúmica, 11,2% para a tensão de rotura à flexão, 11,3% para o módulo de elasticidade dinâmico e 13,4% para o módulo de elasticidade à flexão (Tabela 6.6).

Para além dos valores médios, aferidos e analisados nas Tabelas 6.6 e 6.7, determinaram-se os valores das propriedades de referência pelos mesmos procedimentos matemáticos que os obtidos para os valores característicos, a partir de provetes de dimensões estruturais, segundo os princípios definidos na EN 384 (CEN, 2010), designadamente: massa volúmica (ρ_{kp}), tensão de rotura à flexão (f_{mkp}), e módulo de elasticidade à flexão (E_{mkp}). A Tabela 6.8 faz o resumo dos valores.

Tabela 6.8: Valores característicos das propriedades de referência, obtidos das amostras de provetes de pequenas dimensões do capítulo 5.

Espécie	ρ_{kp} (kg/m ³)	f_{mkp} (MPa)	E_{mkp} (GPa)
Câmbala	685,06	48,53	8,52
Sapelli	631,86	76,31	9,25

Analisando as correlações entre as propriedades aferidas, apresentadas na secção 5.4.2, apenas se constata correlações relevantes entre os módulos de elasticidade à flexão e as tensões de rotura à flexão, e entre os módulos de elasticidade à flexão e os módulos de elasticidade dinâmicos. No caso da Câmbala, os coeficientes de determinação foram de 0,73 e 0,64, respetivamente. Para a Sapelli, obteve-se o valor de 0,62 para o coeficiente de determinação da correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e a tensão de rotura à flexão. Relativamente à correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico, o valor de r^2 apresentou uma baixa correlação (0,24) (Tabelas 5.14 e 5.15).

De forma semelhante à análise de resultados realizada no Capítulo 4, considerou-se também a possibilidade de existência de valores anormais no tratamento dos resultados. Nesse sentido, apresenta-se a Tabela 6.9, onde se resumem os valores dos coeficientes de determinação para as 4 Fases de tratamento dos resultados.

Naturalmente que o processo de exclusão dos resultados considerados valores anormais, correspondentes à Fase 3, provoca uma subida nas correlações. No entanto, para além das correlações mencionadas anteriormente, as restantes continuam a ser pouco significativas. O processo de exclusão dos 5% dos resultados mais afastados das expressões de regressão linear da Fase 3, correspondente à Fase 4, melhora um pouco mais os valores dos coeficientes de

determinação. Mas, mais uma vez, permanecem apenas valores significativamente elevados de r^2 para as correlações entre o módulo de elasticidade à flexão com a tensão de rotura à flexão, nas duas espécies; e para a correlação entre os módulos de elasticidade à flexão e dinâmico, para a espécie da Câmbala.

Tabela 6.9: Resumo dos valores de r^2 para as diferentes fases das correlações entre as propriedades, obtidas das amostras de provetes de pequenas dimensões do Capítulo 5.

Espécie	Relação	Coeficientes de determinação (r^2)			
		1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase	4ª Fase
Câmbala	$\rho - E_m$	0,297	0,310	0,306	0,315
	$\rho - f_m$	0,222	0,246	0,242	0,283
	$E_m - f_m$	0,736	0,725	0,725	0,754
	$\nu - \rho$	0,003	0,003	0,003	0,003
	$\nu - E_m$	0,298	0,316	0,358	0,361
	$\nu - f_m$	0,132	0,131	0,118	0,139
	$E_{din} - E_m$	0,597	0,636	0,667	0,730
	$E_{din} - f_m$	0,316	0,334	0,367	0,377
Sapelli	$\rho - E_m$	0,009	0,001	0,002	0,030
	$\rho - f_m$	0,031	0,019	0,004	0,006
	$E_m - f_m$	0,625	0,618	0,675	0,746
	$\nu - \rho$	0,000	0,000	0,000	0,009
	$\nu - E_m$	0,296	0,301	0,368	0,418
	$\nu - f_m$	0,087	0,087	0,091	0,104
	$E_{din} - E_m$	0,258	0,241	0,225	0,239
	$E_{din} - f_m$	0,108	0,100	0,082	0,090

6.3.1.3 Propriedades dos mesoprovetes ensaiados à tração paralela às fibras, extraídos das vigas

Quanto aos ensaios com mesoprovetes, como referido anteriormente, foi possível aferir a tensão de rotura à tração paralela às fibras e o correspondente módulo de elasticidade. De acordo com o referido na secção 5.3.3, a partir da Tabela 5.12, constata-se a elevada dispersão dos resultados obtidos, tanto para a tensão de rotura à tração, como para o módulo de elasticidade à tração, ambas paralelas às fibras. Na espécie de Câmbala, são registados os valores de 37,7% e 33,3% para os coeficientes de variação da tensão de rotura e do módulo de elasticidade, respetivamente. Para a Sapelli, o C.V. atingiu os valores de 27,9% e 33,4%, respetivamente.

Em relação aos valores médios, comparando o valor da tensão de rotura à tração, obtido para a espécie da Câmbala, de 91,35 MPa, com o apresentado por Tsoumis (1991), de 78 MPa, verifica-se um valor 1,17 vezes superior. Apesar do valor ser significativamente superior, a ele-

vada dispersão dos resultados obtidos, quer para a tensão de rotura à tração, quer para o módulo de elasticidade à tração, faz com que haja necessidade de prudência em os assumir.

A estes resultados, não estará alheio o facto de os mesoprovetes serem substancialmente mais pequenos do que as dimensões de provetes previstos na norma EN 408 (CEN, 2012a). Segundo a EN 408 (CEN, 2012a), para efeitos de determinação das tensões de rotura e dos módulos de elasticidade à tração, no sentido longitudinal das fibras, os provetes devem ter de secção, a mesma do elemento estrutural a ser avaliado, em relação às restantes propriedades mecânicas. Na situação atual, essa secção deveria ser de $8 \times 15 \text{ cm}^2$, o que é, substancialmente superior ao assumido na campanha de ensaios ($1 \times 0,5 \text{ cm}^2$), e por isso, incomparáveis.

No caso de mesoprovetes de secção transversal reduzida, mais preponderantes serão as pequenas diferenças entre as fibras da secção. Deste modo, qualquer defeito, por mais pequeno que seja, implicará uma redução significativa na capacidade da peça. No sentido contrário, se na pequena secção sujeita à tração, os esforços estiverem perfeitamente alinhados com as fibras e estas tiverem uma constituição estável e robusta, por certo se atingirão valores de tensão de rotura à tração, perfeitamente exagerados. A elevada dispersão dos resultados, associada aos valores mínimos obtidos, extremamente baixos e aos valores máximos, substancialmente elevados, parecem traduzir isso mesmo.

Relativamente à possível correlação entre as características da tensão de rotura à tração paralela às fibras, com o correspondente módulo de elasticidade, apresenta-se a Tabela 6.10. Desta, pode observar-se uma total ausência de correlação entre as propriedades, obtendo-se valores para o coeficiente de determinação de 0,04 para a Câmbala e de 0,10 para a Sapelli.

Tabela 6.10: Expressões de correlação entre as tensões de rotura à tração paralelas às fibras ($f_{t,0}$) e os respetivos módulos de elasticidade ($E_{t,0}$), nas campanhas de ensaios em mesoprovetes.

Espécie	Expressão	r^2
Câmbala	$f_{t,0} = 0,0232 E_{t,0} + 10,462$	0,036
Sapelli	$f_{t,0} = 0,0592 E_{t,0} + 7,991$	0,103

6.3.2 Correlação entre as propriedades das três campanhas de ensaios

Neste ponto, pretende avaliar-se a correlação entre as propriedades mecânicas, aferidas nas diferentes campanhas de ensaios realizadas no Capítulo 5, nomeadamente, entre as campanhas de ensaios em vigas, em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos e em mesoprovetes, ambos extraídos das vigas.

6.3.2.1 Correlações entre vigas e provetes de pequenas dimensões

Relativamente à correlação dos resultados das vigas com os provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, para a determinação da tensão de rotura à flexão, tendo por base os resultados gráficos das Figuras 5.21 à 5.24, para a espécie de Sapelli verificam-se valores significativos nas correlações com as tensões de rotura (0,99), com os módulos de elasticidade à flexão (0,93), e com a velocidade do ultrassom (0,82). No caso da espécie de Câmbala, verificam-se correlações moderadas com o módulo de elasticidade (0,5) e com a massa volúmica (0,57). Com a tensão de rotura tem-se já uma correlação baixa, com coeficiente de determinação de 0,36. Relativamente à correlação com a velocidade de ultrassom, ela não existe, obtendo-se um valor de 0,001 para o coeficiente de determinação. Para além disso, na Sapelli, para a correlação com a massa volúmica, é obtido um declive negativo para a expressão linear de correlação. Algo inverosímil, apenas possível pelo parco número de provetes de dimensão estrutural ensaiado.

Da comparação dos resultados das tensões de rotura dos provetes de dimensões estruturais e de pequenas dimensões, possíveis de consultar na Tabela 5.17, para a espécie de Câmbala, pode constatar-se uma pequena dispersão dos resultados das tensões de rotura à flexão, obtidos para as duas campanhas de ensaios, em especial nas vigas, nas quais se obteve um coeficiente de variação de 7%. No caso dos ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, o valor de C.V. sobe um pouco, atingindo os 13%.

Para a Sapelli, observam-se valores que anunciam uma enorme fiabilidade no estimar da tensão de rotura à flexão das vigas, a partir de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Começando pela dispersão dos resultados das duas campanhas, podemos constatar baixos valores para os respetivos C.V. (6 e 7%), valores estes que, associados ao elevadíssimo valor do coeficiente de determinação entre as duas campanhas ($r^2=0,99$), leva a que se coloque a possibilidade, muito forte, de se estimar, com elevada fiabilidade, a tensão de rotura à flexão de cada viga, a partir de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos.

Para além da análise aos coeficientes de determinação e de variação, para ambas as espécies, pode constatar-se que, em todas as vigas, os valores obtidos, através dos provetes de pequenas dimensões de cada viga, foram sempre substancialmente mais elevados que os valores das próprias vigas, sendo em média, 27% mais elevados no caso da Câmbala e 25% mais elevados no caso da Sapelli.

Sobre o módulo de elasticidade, podem ser consultados os gráficos das Figuras 5.25, 5.26 e 5.27, para a análise das correlações. Das referidas figuras, sublinhe-se os valores significativos dos coeficientes de determinação, para as correlações com o módulo de elasticidade à flexão,

em provetes de pequenas dimensões, de 0,88 para a Câmbara e de 0,86 para a Sapelli (se exceptuarmos a viga 1 da Sapelli).

Na Tabela 5.18, é possível comparar os valores dos módulos de elasticidade das campanhas de provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais. Para ambas as espécies, observa-se uma pequena dispersão dos resultados dos provetes de pequenas dimensões, com C.V. de 14% para a Câmbara e de 11% para a Sapelli, subindo ligeiramente nas vigas, para 17%, no caso da Câmbara e 19% para a Sapelli. Comparando os valores, em cada viga, com as médias dos respetivos provetes de pequenas dimensões, constata-se que os valores obtidos através dos ensaios em vigas são sempre, significativamente, superiores, na ordem dos 71% para a Câmbara e de 54% na Sapelli.

Apesar da análise realizada aos resultados apresentados, sublinhe-se que a pequena dimensão das amostras ensaiadas em provetes de dimensões estruturais não permite tirar conclusões objetivas, ficando-se apenas com uma possível indicação de tendências.

6.3.2.2 Correlações entre vigas e mesoprovetes

Na análise das correlações entre as propriedades aferidas das vigas e dos mesoprovetes, começa por constatar-se coeficientes de determinação extremamente baixos, quer entre as tensões de rotura à flexão e as tensões de rotura à tração, quer também entre os módulos de elasticidade à flexão e os módulos de elasticidade à tração (consultar as Figuras B.26 e B.27).

Relativamente à distribuição dos resultados obtidos através dos mesoprovetes, consultando as Tabelas B.7 e B.8, pode observar-se valores do coeficiente de variação relativamente baixos a moderados, variando entre os 11% para a tensão de rotura à tração na Sapelli, subindo um pouco para o módulo de elasticidade à tração na Câmbara, ficando nos 17% e ainda um pouco mais, para o módulo de elasticidade à tração na Sapelli, 19%. A tensão de rotura à tração para a Câmbara atinge já um valor de dispersão significativo, de 27%. Por fim, deve ressaltar-se a completa arbitrariedade sobre as possíveis diferenças de resultados entre as duas campanhas, com valores de C.V. de 1 a 52%, para as tensões de rotura da Câmbara e ainda do -50 a +17% para os módulos de elasticidade da Câmbara. Os valores de C.V. para a Sapelli variaram nas mesmas ordens de grandeza.

Por certo que a pequena dimensão dos mesoprovetes terá um influência determinante na completa ausência de uma relação entre as diferenças dos resultados das campanhas em ambas as espécies. Naturalmente que também a pequena dimensão da amostra de vigas e também de mesoprovetes contribui para que não seja possível identificar qualquer tipo de tendência.

6.3.3 Comparação dos resultados das campanhas experimentais

A presente secção tem por objetivo estabelecer comparações entre as propriedades de referência das amostras da mesma espécie, ensaiadas nos Capítulos 4 e 5. Pretende estabelecer-se relações entre as propriedades aferidas nos ensaios, em vigas à escala real e em provetes de pequenas dimensões extraídos das vigas, com as propriedades dos provetes de pequenas dimensões ensaiados no Capítulo 4.

Quanto à relação dos resultados obtidos nos ensaios, em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, do Capítulo 4, com os resultados dos ensaios em vigas do Capítulo 5, a Tabela 5.19 resume os valores obtidos em cada campanha, para as respectivas tensões de rotura à flexão e módulos de elasticidade à flexão.

Da tabela, pode constatar-se que a tensão média de rotura à flexão dos provetes do Capítulo 4 chega a ser quase o dobro da tensão de rotura à flexão das vigas. Curiosamente, em ambas as espécies, a diferença é de precisamente 1,9 vezes. Relativamente aos valores médios dos módulos de elasticidade à flexão, constata-se que as vigas apresentam valores mais elevados, sendo 1,5 vezes superior para a espécie de Câmbala e 1,3 vezes para a Sapelli.

Desta forma conclui-se que as vigas, apresentam valores para a tensão de rotura substancialmente mais baixos do que os provetes de pequenas dimensões e valores mais altos para o módulo de elasticidade. Na verdade, tal facto havia sido constatado, aquando da comparação com os resultados dos provetes de pequenas dimensões extraídos das próprias vigas.

Relativamente à comparação de resultados entre as duas campanhas de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, relativas aos Capítulos 4 e 5, importa aferir da homogeneidade das propriedades de referência, entre amostras da mesma espécie. Desse modo, ao analisar-se os histogramas das Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, relativos às propriedades de referência da espécie de Câmbala, verifica-se uma semelhança de distribuição relativa e de valores das amostras para a propriedade da massa volúmica. Para as propriedades mecânicas, constata-se que a amostra do Capítulo 4 apresenta melhores capacidades médias, sendo 1,31 vezes superior para a tensão de rotura à flexão e 1,11 vezes superior para o módulo de elasticidade à flexão. As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam, graficamente, a distribuição dos valores das duas campanhas para as respetivas correlações entre: massa volúmica e tensão de rotura à flexão; massa volúmica e módulo de elasticidade à flexão; e, módulo de elasticidade à flexão e tensão de rotura à flexão.

Para a Sapelli, os histogramas das propriedades de referência podem ser consultados nas Figuras 5.35, 5.36 e 5.37. A partir dos histogramas, verifica-se uma acentuada diferença entre os

resultados das duas campanhas de ensaios. Constata-se que os resultados do Capítulo 4 apresentam, em média, valores para a tensão de rotura à flexão 1,22 vezes superiores. Para o módulo de elasticidade, a diferença é menos acentuada, sendo de 1,08 vezes superior.

O melhor comportamento da amostra do Capítulo 4 é também refletido na própria massa volúmica, que se apresenta como sendo superior, em média, 1,14 vezes. Estes resultados têm também reflexo na distribuição das correlações entre as propriedades de referência, apresentadas nas Figuras 5.38, 5.39 e 5.40. Para os dois primeiros gráficos de correlações entre as propriedades de referência, são visíveis a separação entre as duas amostras, sendo mais acentuadas do que para a espécie de Câmbala.

6.4 Propostas de modelos de aferição dos valores característicos das propriedades de referência

Neste ponto, pretende definir-se propostas de modelos expeditos para a determinação dos valores característicos das propriedades de referência das espécies analisadas, fundamentados nas campanhas de ensaios realizadas. Desenvolveu-se um primeiro modelo, baseado apenas em ensaios de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Um segundo modelo é proposto, em que, para além das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, se procura correlacionar os seus resultados com os obtidos nos provetes de dimensão estrutural, de forma a otimizar a determinação dos valores característicos das propriedades de referência.

Para a atribuição da Classe de Resistência, são precisos apenas os valores característicos das três propriedades de referência: valor característico da massa volúmica, correspondente ao percentil 5% dos valores da propriedade; valor característico da tensão de rotura, também correspondente ao percentil de 5% dos valores da propriedade; e valor característico do módulo de elasticidade à flexão, correspondente a 95% do respetivo valor médio (CEN, 2010). Partindo das amostras de provetes de pequenas dimensões, é possível, desde logo, definir os valores característicos para as massas volúmicas das duas amostras, de cada espécie. Em seguida são apresentados os modelos para a determinação dos valores característicos dos módulos de elasticidade à flexão e das tensões de rotura à flexão.

6.4.1 Modelo baseado na análise de resultados de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos

Foram desenvolvidas duas campanhas de ensaios semelhantes na caracterização mecânica de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, descritas nos Capítulos 4 e 5. Como referido anteriormente, no Capítulo 5 os provetes foram extraídos de vigas de dimensões estruturais, ensaiadas à flexão, enquanto que no Capítulo 4, os provetes foram extraídos diretamente de toros de árvores para a realização dos ensaios. Das campanhas de ensaios, foram aferidas as propriedades de referência das duas espécies e os módulos de elasticidade dinâmicos, baseados na velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. Anteriormente, na secção 6.3.3, foram comparados os valores médios obtidos para as propriedades das espécies, referentes às duas campanhas de ensaios e as respetivas distribuições de resultados.

Ao observar-se os valores das tensões de rotura à flexão, os resultados apontam para uma significativa diferenciação de resistências entre as duas amostras de cada espécie. Porém, ao determinar-se os respetivos valores, correspondentes ao percentil 5%, constata-se serem muito semelhantes. As Tabelas 6.11 e 6.12 apresentam o resumo dos valores médios e dos valores do percentil 5%, para as campanhas de ensaios realizadas nos Capítulos 4 e 5.

Tabela 6.11: Valores médios das propriedades de referência e do módulo de elasticidade dinâmico, obtidos a partir dos ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5.

Espécie	Número de provetes	ρ_{12} (kg/m ³)		f_{m12} (MPa)		E_{m12} (GPa)		E_{din} (GPa)	
		médias	C.V.	médias	C.V.	médias	C.V.	médias	C.V.
Câmbala	420 (Cap.4)	743,12	12,1%	105,3	31,6%	9,95	18,5%	15,88	21,0%
	98 (Cap.5)	741,23	11,0%	80,36	24,8%	8,97	21,2%	13,79	18,9%
Sapelli	495 (Cap.4)	772,2	8,0%	118,59	19,9%	10,56	16,3%	18,49	16,3%
	98 (Cap.5)	674,84	5,5%	97,4	11,2%	9,74	13,4%	13,44	11,3%

Tabela 6.12: Valores característicos obtidos a partir de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, dos Capítulos 4 e 5, utilizando as regras previstos para provetes de dimensão estrutural segundo a EN 384 (CEN, 2010).

Espécie	Número de provetes	ρ_{12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	E_{m12} (GPa)
		percentil 5%	percentil 5%	95%*média
Câmbala	420 (Cap.4)	574,6	51,48	9,45
	98 (Cap.5)	685,06	48,53	8,52
Sapelli	495 (Cap.4)	658,12	74,00	10,03
	98 (Cap.5)	631,86	76,31	9,74

Para além dos valores das propriedades de referência, obtidos dos provetes de pequenas dimensões, da análise às correlações estabelecidas entre estas, foi possível encontrar valores significativos para os coeficientes de determinação, quer nas campanhas de ensaios realizadas no Capítulo 4, quer no Capítulo 5.

Para as correlações entre os módulos de elasticidade à flexão (E_m) e as tensões de rotura à flexão (f_m), observaram-se coeficientes de determinação elevados, quer para a Câmbara, quer para a Sapelli, de 0,76 e 0,57 no Capítulo 4, e 0,72 e 0,62 no Capítulo 5, respetivamente. Para as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos (E_{din}) e à flexão (E_m), os valores de r^2 baixaram um pouco. Com a exceção da correlação na Sapelli no Capítulo 5, os coeficientes continuaram a ser significativos, com 0,62 e 0,53 no Capítulo 4, e 0,64 e 0,24 no Capítulo 5, para Câmbara e para a Sapelli, respetivamente.

Analisando, conjuntamente, os coeficientes de determinação obtidos nos Capítulos 4 e 5, para as restantes correlações, constatou-se serem, de uma forma geral, moderadas a fracas. A Tabela 6.13, apresenta o resumo dos valores dos coeficientes de determinação, por correlação.

Tabela 6.13: Resumo dos valores dos coeficientes de determinação para as correlações estabelecidas entre as propriedades das espécies, obtidas dos ensaios em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, nos Capítulos 4 e 5.

Espécie	Relação	Coeficientes de determinação (r^2)	
		Cap. 4	Cap. 5
Câmbara	$\rho - E_m$	0,42	0,31
	$\rho - f_m$	0,43	0,25
	$E_m - f_m$	0,76	0,72
	$v - \rho$	0,03	0,00
	$v - E_m$	0,31	0,32
	$v - f_m$	0,15	0,13
	$E_{din} - E_m$	0,62	0,64
	$E_{din} - f_m$	0,45	0,33
Sapelli	$\rho - E_m$	0,50	0,00
	$\rho - f_m$	0,27	0,02
	$E_m - f_m$	0,57	0,62
	$v - \rho$	0,06	0,00
	$v - E_m$	0,25	0,30
	$v - f_m$	0,18	0,09
	$E_{din} - E_m$	0,53	0,24
	$E_{din} - f_m$	0,33	0,10

Com base nas análises apresentadas e, essencialmente nos resultados das Tabelas 6.11, 6.12 e 6.13, foram estudados possíveis modelos para a aferição dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão e da tensão de rotura à flexão.

6.4.1.1 Determinação do valor característico do módulo de elasticidade à flexão

Uma vez que as espécies de Câmbala e Sapelli, preenchendo os requisitos da inspeção visual segundo a BS 5756 (2007), estão classificadas como pertencendo à Classe de Resistência D40, será expectável que o valor médio de uma amostra de provetes de dimensões estruturais atinja, pelo menos, 95% do valor médio do módulo de elasticidade à flexão, previsto para a classe D40 na EN 338 (CEN, 2009a), correspondendo a 13 GPa e em que $95\% \times 13\text{GPa} = 12,35\text{GPa}$.

Consultando estudos sobre a relação entre módulos de elasticidade, determinados em provetes de pequenas dimensões e em dimensões estruturais, alguns deles abordados na secção 3.3.3, pode concluir-se que os valores aferidos, através de provetes de pequenas dimensões, são, em geral, inferiores aos aferidos em provetes de dimensões estruturais. Hugh (2010), considerou que, sendo o módulo de elasticidade uma propriedade menos dependente da existência de defeitos na madeira, se poderá admitir que o respetivo valor, para efeitos de cálculo, possa ser determinado através de provetes de pequenas dimensões, sem qualquer correção de valores.

Com base nas considerações de Hugh (2010), analisando os resultados obtidos para as médias dos módulos de elasticidade à flexão, possíveis de consultar na Tabela 6.12, nenhuma campanha de ensaios preenche o requisito mínimo para que a propriedade do módulo de elasticidade possa pertencer à Classe D40. As amostras de Câmbala do Capítulo 4 e de Sapelli do Capítulo 5, são enquadradas na Classe D24. A amostra de Câmbala do Capítulo 5 não teria atribuição a qualquer Classe de Resistência, por estar abaixo do valor mínimo, equivalente a 95% de 9,5 GPa (9,02 GPa), correspondentes à Classe D18. Apenas a amostra de Sapelli do Capítulo 4 se aproximaria, mas, mesmo assim, ficaria pela Classe D30. Para além dos resultados referidos e das Classes de Resistência expectáveis para as espécies em questão, tendo por base a média dos módulos de elasticidade obtida dos 5 provetes de dimensão estrutural (15,33 GPa para a Câmbala e 15,03 GPa para a Sapelli), a proposta apresentada por Hugh (2010) exhibe-se extremamente conservadora. Observa-se que os valores médios obtidos para as 5 vigas, à escala estrutural, são 1,54 e 1,71 vezes superiores aos obtidos em provetes de pequenas dimensões, das amostras de Câmbala, nos Capítulos 4 e 5, respetivamente. Relativamente à Sapelli, os valores médios das vigas situam-se em 1,42 e 1,54 vezes superiores, respetivamente para os Capítulos 4 e 5. Nesse sentido, parece ser evidente a necessidade em encontrar-se um coeficiente de majoração dos valores médios do módulo de elasticidade, obtidos dos provetes de pequenas dimensões.

Para além da correlação entre módulos de elasticidade à flexão em diferentes escalas, também o módulo de elasticidade dinâmico, quer seja obtido por vibrações naturais da madeira, quer pela velocidade de ultrassom, apresenta-se como uma propriedade com elevada correlação com o módulo de elasticidade. Geert et al. (2010), observaram tendências consistentes para as madeiras tropicais. Bucur et al., já em 1984, obtiveram valores de 0,74 para os coeficientes de determinação em vigas de secção 200x250 mm², entre a velocidade de propagação do ultrassom e o módulo de elasticidade.

Das correlações estabelecidas entre os provetes de dimensões estruturais e os provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, extraídos dos primeiros, analisadas na secção 6.3.2.1, referente aos resultados da secção 5.5.1.2, sublinham-se os valores pouco significativos, obtidos para a correlação entre o módulo de elasticidade à flexão dos provetes estruturais, com a velocidade do ultrassom dos provetes de pequenas dimensões. Porém, se na referida correlação, for retirada a contribuição das vigas 1 de cada espécie, por não preencherem os requisitos de classificação visual da BS 5756 (2007), seriam obtidos valores para o coeficiente de determinação de: 0,7 para a Sapelli, e de 0,3 para a Câmbala. Quando correlacionadas as mesmas propriedades nas campanhas de ensaios de provetes de pequenas dimensões, para as duas espécies nos dois capítulos, os valores dos coeficientes de determinação apresentam correlações moderadas a fracas, rondando o valor de 0,3. Porém, associados à propriedade da massa volúmica, com a qual se determina o módulo de elasticidade dinâmico, como referido anteriormente, os valores dos coeficientes de determinação passam a ter valores significativos, rondando os 0,6, com a exceção da amostra de Sapelli no Capítulo 5, que fica um pouco mais baixa.

De uma forma geral, estes dados vêm ao encontro dos estudos abordados na secção 3.3.3, em que a velocidade do ultrassom, incluída na determinação do correspondente módulo de elasticidade dinâmico, acaba por ser uma característica relevante na determinação dos valores dos módulos de elasticidade à flexão, em provetes de dimensões estruturais. Nesse sentido, não será de excluir que a previsão do módulo de elasticidade em provetes de dimensões estruturais possa ser efectuado pela ponderação entre estas duas propriedades, módulos de elasticidade à flexão e módulo de elasticidade dinâmico, aferidas de provetes de pequenas dimensões.

Uma vez que os resultados médios dos módulos de elasticidade dinâmicos, dos estudos em provetes de pequenas dimensões, se apresentam como sendo superiores aos módulos à flexão nos mesmos provetes, a previsão dos módulos de elasticidade em provetes estruturais, em função da ponderação destas duas propriedades, estaria mais próxima dos resultados finais, do que considerando apenas os módulos de elasticidade à flexão. Nesse sentido, propõe-se um modelo de estimativa do valor característico do módulo de elasticidade à flexão, baseado

na ponderação dos módulos de elasticidade dinâmicos e à flexão, em provetes de pequenas dimensões. A expressão 6.1 reflete as considerações assumidas.

$$E_{m,k} = x \cdot E_{mp} + y \cdot E_{din} \quad (6.1)$$

em que $E_{m,k}$ corresponderá ao valor característico para o módulo de elasticidade à flexão em provetes de dimensão estrutural; E_{mp} corresponderá à média do módulo de elasticidade à flexão, obtido em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos; E_{din} corresponderá à média do módulo de elasticidade dinâmico, obtida em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos; e x e y serão os coeficientes de ponderação de cada uma das propriedades.

Não existindo uma campanha de ensaios extensa, quer em função do número de amostras, quer em função do número de espécies tropicais analisadas, como ponto de partida, entendeu-se que os coeficiente x e y deveriam validar as amostras na Classe de Resistência D40. Para tal, resumiu-se na Tabela 6.14, os valores médios de E_m e E_{din} para as duas espécies, provenientes das campanhas de ensaios nos Capítulos 4 e 5. Definiram-se quatro expressões, com base nos valores dos módulos de elasticidade à flexão e dinâmicos, apresentados na tabela 6.14.

Tabela 6.14: Valores médios de E_m e E_{din} , das espécies de Câmbala e Sapelli, nos Capítulos 4 e 5.

Espécie	Resultados da amostra	EN 384 (w<8%)	Sandoz (1989) EN 384
		E_{m12} (GPa)	E_{din12} (GPa)
Câmbala	Cap. 4	9,95	15,88
	Cap. 5	8,97	13,79
Sapelli	Cap. 4	10,56	18,49
	Cap. 5	9,74	13,44

Assumindo que $x+y=1$ e que representam a percentagem com que E_{m12} e E_{din12} participam no cálculo do valor característico; validando a expressão 6.1 nas 4 combinações possíveis (ensaios em Câmbala e Sapelli nos Capítulos 4 e 5), de modo a que o valor mínimo atingido fosse de 12,35 GPa, para a atribuição da Classe de Resistência D40, obteve-se $x<0,294$. Desta forma, assumiu-se $x=0,29$, e complementarmente, $y=0,71$

Com o desenvolvimento de estudos similares, espera aferir-se, com maior precisão, os valores correspondentes às variáveis x e y da expressão 6.1.

A Tabela 6.15, apresenta os valores característicos finais dos módulos de elasticidade à flexão, aferidos através dos modelos propostos por Hugh (2010) e pelo presente estudo. Faz-se corresponder as respetivas Classes de Resistência, para cada uma das campanhas de ensaios,

Tabela 6.15: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos dos módulos de elasticidade à flexão, segundo proposta de Hugh (2010), e segundo a expressão proposta no presente trabalho.

Espécie	Número de provetes	Proposta de Hugh (2010)		Proposta do presente trabalho	
		$E_{m,k}$ (GPa) $E_{m,k} = E_{mp}$	Clas. de Res. (EN 338)	$E_{m,k}$ (GPa) $E_{m,k}=0,29E_{mp}+0,71E_{din}$	Clas. de Res. (EN 338)
Câmbala	420 (Cap.4)	9,95	D24	14,16	D50
	98 (Cap.5)	8,97	--	12,39	D40
Sapelli	495 (Cap.4)	10,56	D30	16,19	D60
	98 (Cap.5)	9,74	D24	12,36	D40

6.4.1.2 Determinação do valor característico da tensão de rotura à flexão

Quanto à determinação do valor da tensão de rotura à flexão, Lanvin et al. (2009) apresentam a possibilidade da mesma ser determinada através da correlação entre provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais. O estudo propõe a aplicação da expressão $Y=1/3X$, sendo Y equivalente ao valor característico da tensão de rotura à flexão, obtido nos ensaios em vigas, à escala real e X o valor médio da tensão de rotura à flexão dos provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Aplicando a expressão aos resultados médios da tensão de rotura à flexão em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, apresentados na Tabela 6.11, seriam obtidos os valores característicos expressos na Tabela 6.16.

Tabela 6.16: Resumo dos valores característicos para a tensão de rotura à flexão, obtidos através da expressão proposta por Lanvin et al. (2009).

Espécie	Número de provetes	f_{mp} (MPa)	Lanvin et al. (2009)
		médias	$f_{m,k}$ (MPa) $f_{m,k} = 1/3 f_{m12}$
Câmbala	420 (Cap.4)	105,30	35,10
	98 (Cap.5)	80,36	26,79
Sapelli	495 (Cap.4)	118,59	39,53
	98 (Cap.5)	97,40	32,47

Contudo, analisando os valores característicos, aferidos dos provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, apresentados na Tabela 6.12, constata-se uma proximidade significativa entre as tensões de rotura à flexão da mesma espécie, nos capítulos 4 e 5; e uma diferença substancial entre os valores de espécies diferentes, valores estes que não são refletidos pela expressão proposta por Lavin et al (2009).

Considerando as características das espécies tropicais, nomeadamente a homogeneidade da estrutura física das madeiras e uma menor influência do efeito de volume, admite-se uma maior correlação entre os resultados das tensões de rotura obtidos em provetes de pequenas dimensões e os de dimensões estruturais, ambos isentos de defeitos. Alik et al. (2006) obtêm coeficientes de determinação de 0,55, para as tensões de rotura à flexão, entre as duas escalas de provetes, para a espécie de *Dryobalanops*. Jamil et al. (2013) ao analisar a espécie de Keruing, cujos provetes de dimensões estruturais se apresentavam sem defeitos, obtêm um valor de 0,72 para o coeficiente de determinação.

Para além dos elevados valores de correlação, é preciso atender à diferenciação natural entre o material lenhoso de cada árvore, mesmo dentro da mesma espécie. Thomas (1931) admitiu que, mesmo quando todas as precauções forem tomadas para evitar todos os fatores que influenciam a força da madeira, será encontrado um pedaço de madeira inexplicavelmente mais forte 10 a 15%, do que outro. Desch et al. (1996) consideram que a principal conclusão científica, para este facto, se explica pela variabilidade genética de madeira, resultante do facto de ser um material natural.

Nesse sentido, tendo por base os 5 aspectos seguintes: a) assumindo, para as madeiras tropicais, a elevada correlação existente entre provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais, isentos de defeitos (verificado para a espécie de Sapelli, no presente estudo (0,99), mas com moderada a baixa correlação para a espécie de Cãmbala (0,36)); b) a procura em refletir, nos valores característicos das tensões de rotura, as diferenças verificadas entre as duas espécies; c) considerando a margem de erro de 15%, proposta por Thomas (1931), inerente ao facto de se estar a trabalhar com um material natural; d) a elevada dimensão das amostras de provetes de pequenas dimensões, analisadas nos capítulos 4 e 5, que naturalmente reduzirão a influência de valores anormais na determinação de valores característicos; e) o factor conservador, 0,9, assumido na EN 384 (CEN, 2010) pelo facto de se estar a trabalhar com provetes de pequenas dimensões; apresenta-se como proposta para aferição do valor característico da tensão de rotura à flexão, a expressão 6.2.

$$f_{m,k} = 0,85f_{mkp} * 0,9 \quad (6.2)$$

em que, $f_{m,k}$ representa o valor característico da tensão de rotura à flexão da amostra; f_{mkp} o valor característico obtido através do ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos; o valor de 0,85, a volatilidade de 15% da capacidade resistente da madeira, por motivos genéticos (Thomas, 1931); e 0,9 o factor conservador previsto na EN 384 (CEN, 2010), pelo facto de se estar a trabalhar com provetes de pequenas dimensões.

Assim, considerando a proposta da expressão 6.2 para a determinação do valor característico da tensão de rotura à flexão, e o modelo proposto por Lanvin et al. (2009), apresenta-se a Tabela 6.17 em que se resumem os valores característicos obtidos pelo dois modelos.

Tabela 6.17: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo proposta de Lanvin et al. (2009), e segundo a expressão proposta no presente trabalho.

Espécie	Número de provetes	Proposta de Lanvin et al. (2009)		Proposta do presente trabalho	
		$f_{m,k}$ (MPa) $f_{m,k} = 1/3 f_{mp}$	Cl. de Resis. (EN 338)	$f_{m,k}$ (MPa) $f_{m,k} = 0,85 f_{mkp} * 0,9$	Cl. de Resis. (EN 338)
Câmbala	420 (Cap.4)	35,10	D35	39,38	D35
	98 (Cap.5)	26,79	D24	37,13	D35
Sapelli	495 (Cap.4)	39,53	D35	56,61	D50
	98 (Cap.5)	32,47	D30	58,38	D50

Constata-se que, a proposta desenvolvida no presente trabalho, ao contrário da apresentada por Lanvin et al. (2009), se aproxima, significativamente, das Classes de Resistência previstas para as espécies em análise, segundo a EN 1912 (CEN, 2012b). No caso das campanhas realizadas para a espécie de Câmbala, as diferenças para as Classes de Resistência previstas para ambas as espécies, situam-se em menos de 10%, dos valores obtidos para as tensões de rotura. No caso das campanhas realizadas com a espécie de Sapelli, constata-se que é atingida uma Classe de Resistência imediatamente superior, permitindo um maior aproveitamento dos elementos de madeira.

6.4.1.3 Aplicação dos modelos propostos a bases de dados de resultados de provetes de pequenas dimensões

Na presente secção, os modelos propostos de determinação dos valores característicos dos módulos de elasticidade e da tensão de rotura à flexão, na direção das fibras, serão aplicados a bases de dados já existentes.

Para o módulo de elasticidade, apresenta-se a base de dados com que Lanvin et al. (2009) trabalharam, comparando as respetivas atribuições de Classes de Resistência.

Uma vez que as bases de dados, normalmente, apresentam apenas o valor médio dos módulos de elasticidade à flexão e dado que os modelos propostos se baseiam na necessidade de se conhecerem os módulos de elasticidade dinâmicos, há necessidade de explorar as possibilidades de obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, de forma a poder aplicar-se a expressão 6.1. Tal como haverá necessidade de se explorar a melhor forma de se determinar o valor característico da tensão de rotura à flexão, uma vez que as bases de dados, por norma, não apresentam o valor correspondente ao percentil 5% da tensão de rotura à flexão, de provetes de pequenas dimensões.

Assim, sabendo que o módulo de elasticidade dinâmico virá em função da massa volúmica e da velocidade de propagação da onda de ultrassom e uma vez que a massa volúmica é um dado que pode ser encontrado em todos os estudos, resta obter a velocidade de propagação da onda. Do presente estudo, para as campanhas de ensaio dos provetes de pequenas dimensões para as duas espécies, nos capítulos 4 e 5, pode constatar-se a pequena variação dos valores da velocidade dos ultrassons. No Capítulo 4, foram obtidos coeficientes de variação de 8,7 e 6,8% (Tabela 4.6), respetivamente para a Câmaba e para a Sapelli. Já para o Capítulo 5, os coeficientes de variação foram de 7,8 e 4,7% (Tabela 5.7), respetivamente. Os valores das velocidades de ultrassom respetivas podem ser consultados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18: Resumo dos valores médios e dos respetivos coeficientes de variação, para as velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, nos ensaios de provetes de pequenas dimensões.

Espécie		Cap. 4	Cap. 5
		Sandoz (1989)	Sandoz (1989)
		v_{12} (m/s)	v_{12} (m/s)
Câmbala	Média	4599,04	4302,67
	C.V.	8,7%	7,8%
Sapelli	Média	4876,13	4457,31
	C.V.	6,8%	4,7%

Uma vez que a diferença entre a velocidade média mais elevada, 4876,13 m/s (Sapelli, Cap. 4), e a mais baixa, 4302,67 m/s (Câmbala, Cap. 5), se situa em 11,7% e que pertencem, a espécies diferentes e a capítulos diferentes, considerou-se razoável admitir que a diferença entre as velocidades de propagação das ondas ultrassónicas em madeiras tropicais (com base nas analisadas), não será muito significativa. Nesse sentido, concluiu-se como plausível admitir uma velocidade média para todas as bases de dados de espécies de folhosas, provenientes da mesma região tropical. Com base nos ensaios realizados, entendeu-se adequado e conservador adoptar o valor da velocidade mais baixo das amostras, sensivelmente 4300 m/s.

Para aplicação a espécies provenientes de outras origens, uma vez que o presente trabalho não avaliou a velocidade de nenhuma espécie fora de África, considerou-se adequado e conservador adoptar o mesmo valor, sujeito a uma redução de 11,7%. O valor obtido foi de 3796,65 m/s, ou, de forma aproximada, 3800 m/s. Naturalmente que o valor adoptado carecerá de confirmação baseada em campanhas de ensaios.

A Tabela 6.19, traduz a aplicação da metodologia descrita, para as espécies classificadas na EN 1912 (CEN, 2012b), provenientes de África. Os valores das massas volúmicas e dos módulos de elasticidade à flexão foram obtidos por consulta das folhas técnicas do CIRAD (Tropix, 2015).

Tabela 6.19: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão, às espécies classificadas na EN 1912 (CEN, 2012b).

Espécie	ρ (Tropix, 2015) (kg/m ³)	ν (m/s)	E_{din} (GPa)	E_{mp} (GPa)	E_m (GPa)	Classe de Resistência	
						Estudo Presente	EN 1912 (CEN, 2012b)
Azobé	1060	4300	19,60	27,0	21,75	D60	D70
Ekki	1060	4300	19,60	27,0	21,75	D60	D70
Opepe (Bilinga)	765	4300	14,14	14,7	14,29	D35	D50
Missanda (Tali)	910	4300	16,83	19,5	17,60	D50	D40
Okan	910	4300	16,83	22,5	18,47	D50	D40
Iroko	640	4300	11,83	12,8	12,11	D24	D40
Sapele	690	4300	12,76	14,0	13,12	D35	D40

A Tabela 6.20, traduz a aplicação da metodologia descrita, às espécies analisadas do Lanvin et al. (2009).

Tabela 6.20: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão, às espécies classificadas por Lavin et al. (2009).

Espécie	ρ (kg/m ³)	ν (m/s)	E_{din} (GPa)	E_{mp} (GPa)	E_m (GPa)	Classe de Resistência	
						Estudo Presente	Lavin et al. (2009)
Angelim vermelho	1079	3800	15,58	27,1	18,93	D60	D40
Balau	916	3800	13,23	22,1	15,81	D50	D50
Basralocus	758	3800	10,95	18,4	13,09	D40	D40
Cumaru	1032	3800	14,90	25,5	17,97	D60	D50
Ekki	1075	3800	15,52	21,2	17,16	D60	D60
Greenheart	970	3800	14,01	30,4	18,76	D60	D70
Ipe	1084	3800	15,65	24,9	18,34	D60	D60
Kapur	740	3800	10,69	16,2	12,27	D35	D60
Keruing	790	3800	11,41	16,1	12,77	D40	D50
Massaranduba	1078	3800	15,57	23,2	17,77	D60	D60
Missanda (Tali)	884	3800	12,76	20,2	14,93	D50	D40
Mukulungu	940	3800	13,57	17,0	14,58	D50	D24
Okan	907	3800	13,10	22,2	15,72	D50	D40
Opepe (Bilinga)	761	3800	10,99	15,0	12,15	D35	D30

Das Tabelas 6.19 e 6.20, pode observar-se um relativo desalinhar entre as Classes atribuídas a cada espécie. Se se observar as Classes de Resistência das espécies que estão nas duas tabelas, Ekki, Opepe, Missanda e Okan, apenas as duas últimas coincidem nas classes atribuídas pela EN 1912 (CEN, 2012b) e por Lanvin et al. (2009). Segundo a metodologia apresentada, na Tabela 19, apenas duas espécies poderão vir a assumir a mesma Classe de Resistên-

cia, Missanda e Okan. As restantes têm já uma Classe de Resistência inferior à prevista na EN 1912 (CEN, 2012b). Da Tabela 20, das 14 espécies avaliadas, 5 espécies acabam por coincidir na Classe atribuída. Das 9 espécies em que não coincidiram as Classes, apenas 3 espécies (Greenheart, Kapur e Keruing) não poderão vir a coincidir na mesma Classe, por apresentarem já um valor característico abaixo do estudo de Lanvin et al. (2009).

No caso da determinação dos valores característicos das tensões de rotura à flexão, como referido, é também muito comum que as bases de dados apresentem os valores médios das campanhas de ensaios de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Nesse sentido, existe também a necessidade de procurar uma correlação entre os valores médios e os valores característicos dos provetes de pequenas dimensões.

O estudo de Lanvin et al. (2009), faz também uma estimativa do cálculo do valor característico da tensão de rotura, para provetes de dimensão estrutural, segundo a EN 384 (CEN, 2010), partindo dos valores médios das tensões de rotura em provetes de pequenas dimensões. Para tal, na análise a 18 espécies, Lanvin et al. (2009) construíram um gráfico em que correlacionaram os valores médios das tensões de rotura à flexão, em provetes de pequenas dimensões, com os respetivos valores característicos, obtidos a partir de provetes de dimensão estrutural. A Figura 6.1 exemplifica graficamente a correlação entre os valores.

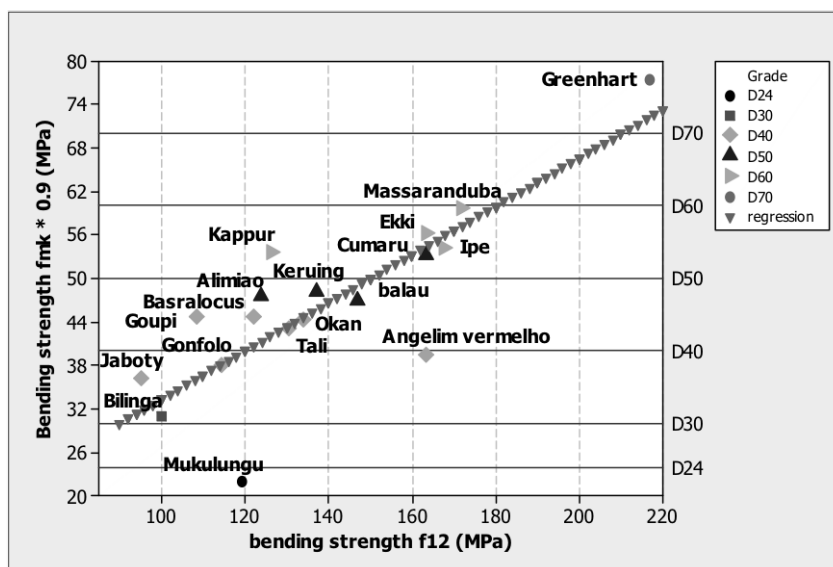


Figura 6.1: Correlação entre os valores médios da tensão de rotura em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, com os respetivos valores característicos obtidos segundo a EN 384 (CEN, 2010) Lanvin et al. (2009).

Partindo dos resultados obtidos no presente trabalho, considerou-se viável assumir o mesmo princípio que Lanvin et al. (2009) adoptaram, uma vez que se verificaram fortes correlações entre as tensões de rotura à flexão, entre provetes de dimensão estrutural e provetes de pequenas dimensões.

Desta forma, partindo do mesmo princípio, apresenta-se a Tabela 6.21, com o resumo dos valores médios e dos percentis 5%, obtidos das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, nos capítulos 4 e 5. Em seguida, é apresentada a Figura 6.2, em que são refletidas, graficamente, as respetivas correlações.

Tabela 6.21: Valores médios e do percentil 5%, das tensões de rotura à flexão em provetes de pequenas dimensões, dos capítulos 4 e 5.

Espécie	Número de provetes	f_{m12} (MPa)	f_{m12} (MPa)
		médias	percentil 5%
Câmbala	420 (Cap.4)	105,3	51,48
	98 (Cap.5)	80,36	48,53
Sapelli	495 (Cap.4)	118,59	74
	98 (Cap.5)	97,4	76,31

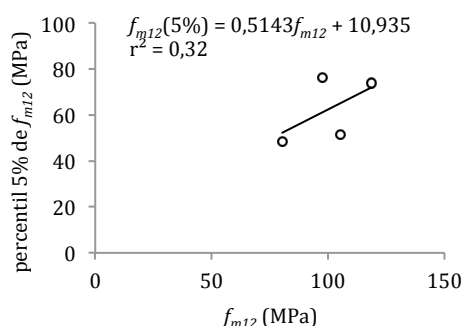


Figura 6.2: Correlação entre os valores médios das tensões de rotura à flexão de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, e os respetivos valores correspondentes ao percentil 5%.

Apesar do valor do coeficiente de determinação ser relativamente baixo, 0,32, acredita-se que com o aumento de resultados de novas campanhas de ensaios, esse valor possa subir significativamente. Tal facto foi também confirmado por Ravenshorst et al. (2004), aquando do desenvolvimento de uma metodologia mais económica para a aferição dos valores característicos das propriedades mecânicas de espécies tropicais. A sua proposta baseava-se em 75% de resultados provenientes de ensaios não destrutivos (método da frequência de vibração natural da madeira) e 25% dos resultados, provenientes de ensaios segundo o método preconizado na

EN 408 (CEN, 2012a). Quando o autor decidiu agrupar todos os resultados obtidos de diferentes espécies, aumentando exponencialmente, a base de dados para estabelecer a correlação entre ensaios, obteve um coeficiente de determinação de 0,63 para a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão e de 0,73 entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático à flexão.

Deste modo, a expressão 6.3 poderá assumir a conversão dos valores médios das tensões de rotura à flexão, para valores característicos, das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões.

$$f_{m,k} = 0,85 * (0,5143f_{mp} + 10,935) * 0,9 \quad (6.3)$$

em que, $f_{m,k}$ representa o valor característico da tensão de rotura à flexão da amostra; f_{mp} o valor médio da tensão de rotura à flexão, obtido através do ensaios em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos; o valor de 0,85, a volatilidade de 15% da capacidade resistente da madeira, por motivos genéticos (Thomas, 1931); e 0,9, o factor conservador, previsto na EN 384 (CEN, 2010), pelo facto de se estar a trabalhar com provetes de pequenas dimensões.

Desta forma, e aplicando a metodologia descrita aos exemplos de bases de dados, apresentados na análise dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão, teremos as Tabelas 6.22 e 6.23.

Tabela 6.22: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos da tensão de rotura à flexão, às espécies classificadas na EN 1912 (CEN, 2012b).

Espécie	CIRAD 2017 f_{mp} (MPa)	Estudo Pre- sente $f_{m,k}$ (GPa)	Classe de Resistência	
			Estudo Presente	EN 1912 (CEN, 2012b)
Azobé	162	72,10	D70	D70
Ekki	162	72,10	D70	D70
Opepe (Bilinga)	95	45,74	D40	D50
Missanda (Tali)	128	58,73	D50	D40
Okan	134	61,09	D60	D40
Iroko	82	40,63	D40	D40
Sapele	102	48,50	D40	D40

Tabela 6.23: Aplicação do modelo proposto para determinação dos valores característicos da tensão de rotura à flexão, às espécies classificadas por Lavin et al. (2009).

Espécie	CIRAD 2017 f_{mp} (MPa)	Estudo Pre- sente $f_{m,k}$ (GPa)	Classe de Resistência	
			Estudo Pre- sente	Lavin et al. (2009)
Alimiao	123,7	57,0	D60	D50
Angelim vermelho	163,2	72,6	D70	D40
Balau	146,9	66,2	D60	D50
Basralocus	122,0	56,4	D50	D40
Cumaru	163,2	72,6	D70	D50
Ekki	163,2	72,6	D70	D60
Gonfolo	114,4	53,4	D50	D40
Goupi	108,5	51,1	D50	D40
Greenheart	217,0	93,7	D70	D70
Ipe	173,8	76,7	D70	D60
Jaboty	95,0	45,7	D40	D40
Kapur	123,1	56,8	D50	D60
Keruing	110,4	51,8	D50	D50
Massaranduba	175,0	77,2	D70	D60
Missanda (Tali)	130,6	59,7	D50	D40
Mukulungu	119,4	55,3	D50	D24
Okan	130,7	59,8	D50	D40
Opepe (Bilinga)	100,1	47,7	D40	D30

Das Tabelas 6.22 e 6.23, analisando as 4 espécies em comum, observa-se novamente, que apenas as espécies de Missanda e Okan têm atribuída as mesmas Classes em EN 1912 (CEN, 2012b) e Lavin et al. (2009). Comparativamente com o presente estudo, na Tabela 6.22, 4 espécies acabam por ter a mesma Classe e só uma se apresenta inferior à da norma. Da Tabela 6.23, das 18 espécies avaliadas, apenas 3 têm a mesma classificação, sendo que das restantes 15, apenas uma espécie apresenta a atribuição de classe superior, segundo o estudo de Lavin et al. (2009).

Na realidade será muito difícil avaliar-se a eficiência de um método de análise das capacidades mecânicas de um elemento de madeira, uma vez que, ao ser um material natural, cada elemento acaba por fazer depender as suas características de inúmeros factores externos à própria espécie. Nesse sentido, quando analisamos as classes atribuídas por diferentes laboratórios reconhecidos, existem também inúmeros desalinhamentos entre as propriedades de cada espécie. Na verdade, das inúmeras espécies analisadas por Lavin et al. (2009), em que existem classificações realizadas por diferentes entidades (para o caso, US Chapter 6, Tropix 6, NPR 5493, BS 5756, NF B 52-001), raramente coincidem na mesma atribuição de Classe a uma mesma espécie. Este aspeto, naturalmente, levanta várias questões, sendo que a mais consensual reside no facto da vastidão da área geográfica onde as espécies tropicais se dis-

seminam, provocar alterações na genética e morfológica das espécies. Ouinsavia et al., 2010, demonstraram este facto para a espécie de Câmbala. Nesse sentido, qualquer comparação de atribuição de classes perde sentido aquando da ausência precisa da delimitação da origem de proveniência da espécie. De notar, que este facto é relativamente ignorado, quer pelo método alternativo da EN 384 (CEN, 2010), quer também pela EN 1912 (CEN, 2012b), quando delimita as áreas das espécies a zonas continentais ou subcontinentais.

6.4.2 Modelo baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e provetes de dimensões estruturais

Para além do modelo apresentado na secção anterior, para a determinação dos valores característicos, baseado apenas em resultados obtidos em provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, havendo a possibilidade de serem realizados alguns ensaios em provetes de dimensão estrutural, pretende-se, com os seus resultados, otimizar os respetivos valores característicos. Nesse sentido, é tido em conta a campanha de ensaios realizada em provetes de dimensão estrutural, descrita no Capítulo 5. Filosofia semelhante foi assumida por Ravenshorst et al. (2004), quando propõem que a aferição das Classes de Resistência das espécies tropicais se baseiem na combinação de 75% (30 provetes) dos resultados obtidos por métodos não destrutivos, nomeadamente, por ensaios de medição da frequência de vibração natural dos provetes e 25% (10 provetes) por métodos destrutivos, segundo o preconizado na norma EN 408 (CEN, 2012a).

6.4.2.1 Determinação do valor característico do módulo de elasticidade à flexão

Relativamente à determinação do valor característico para o módulo de elasticidade à flexão, este deveria vir em função de uma campanha de ensaios, de pelo menos 40 provetes de dimensões estruturais. Estando apenas disponíveis os resultados de 5 provetes, entendeu-se ser relevante poder entrar em consideração com os seus resultados. Nesse sentido é proposta a expressão 6.4 para a determinação do valor característico do módulo de elasticidade à flexão, baseada na proporcionalidade do conhecimento dos resultados de ensaios em provetes de dimensão estrutural disponíveis.

$$E_{m,k} = \frac{x}{40} E_{mv} + \frac{40-x}{40} E_{mkp} \quad (6.4)$$

em que $E_{m,k}$ representa o valor característico do módulo de elasticidade à flexão, para provetes de dimensões estruturais; E_{mv} o valor médio dos módulos de elasticidade obtidos dos ensaios dos provetes de dimensões estruturais; E_{mkp} o valor característico obtido, tendo por base apenas provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos, determinado segundo a expressão

6.1; e x representa o número de provetes de dimensões estruturais ensaiados, segundo a EN 408 (CEN, 2012a).

A Tabela 6.24, apresenta os valores característicos para os módulos de elasticidade das amostras, tendo por base a determinação do valor característico do módulo de elasticidade proposto no presente trabalho, baseado apenas em provetes de pequenas dimensões, definido na expressão 6.1.

Tabela 6.24: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo expressão proposta no presente trabalho, baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e de dimensões estruturais.

Espécie	Número de provetes	Proposta do presente trabalho			Clas. de Res. (EN 338)
		E_{mkp} (GPa) $E_{mkp}=0,29E_{mp}+0,71E_{dinp}$	(Cap.5) E_{mv} (GPa)	$E_{m,k}$ (GPa) Expressão 6.4	
Câmbala	420 (Cap.4)	14,16	15,33	14,31	D50
	98 (Cap.5)	12,39	15,33	12,76	D40
Sapelli	495 (Cap.4)	16,19	15,03	16,05	D50
	98 (Cap.5)	12,36	15,03	12,69	D40

6.4.2.2 Determinação do valor característico da tensão de rotura à flexão

Para o caso de estarem disponíveis alguns resultados de ensaios em provetes de dimensões estruturais, de forma semelhante aos obtidos pela campanha de ensaios realizada em 5 vigas, descrita no Capítulo 5, considera-se relevante uma análise das tensões de rotura à flexão, dos provetes de pequenas dimensões e dos provetes de dimensões estruturais. Para a situação concreta da campanha de ensaios realizada no Capítulo 5 e da qual se elaborou a Tabela 5.17, constata-se uma significativa consistência entre os valores das diferenças entre os resultados atingidos em cada viga, para a tensão de rotura à flexão e as médias das tensões de rotura à flexão, obtidas pelos provetes de pequenas dimensões extraídos da viga respetiva.

Para a espécie de Câmbala, constata-se que as diferenças se situaram entre os 20 a 34%, fazendo corresponder um coeficiente de variação de 28%. Para a Sapelli, as diferenças entre os resultados obtidos em cada viga e nos respetivos provetes extraídos desta, são extraordinariamente constantes, variando entre 23 e 26%, e correspondendo a um coeficiente de variação de 5%. Relembra-se que as vigas 1 de cada campanha tiveram de ser excluídas por não cumprirem com os requisitos mínimos da BS 5756 (2007). Dessa forma, a dimensão das amostras resume-se a 4 vigas, algo que por si só é já bastante limitativo.

Para as amostras referidas, na secção 6.4.1.2, foram já determinados os valores correspondentes aos percentis 5%, pela expressão 6.2. Obtiveram-se os valores de 56,61 e 58,38 MPa, para a espécie de Câmbala e Sapelli, respetivamente. Uma vez que a dispersão de resultados é significativamente baixa para as duas espécies e as correlações entre as diferentes tensões de rotura das amostras sempre revelaram coeficientes de distribuição significativos, admite-se que o valor característico de um lote possa ser obtido através de uma média ponderada. Para tal e de forma conservadora, seriam ponderados os valores mínimos obtidos das amostras de vigas, com os valores correspondentes ao percentil 5% dos provetes de pequenas dimensões, de acordo com a expressão 6.5.

$$f_{m,k} = \frac{n}{40} f_{min} + \left(\frac{40-n}{40}\right) f_{mkp} \quad (6.5)$$

em que $f_{m,k}$ representa o valor característico da tensão de rotura à flexão, para provetes de dimensões estruturais; f_{min} o valor mais baixo dos ensaios, em provetes de dimensão estrutural, ensaiados segundo a EN 408 (CEN, 2012a); f_{mkp} o valor correspondente ao percentil 5% da amostra de provetes de pequenas dimensões, obtido segundo a expressão 6.2.; e n representará o número de provetes de dimensão estrutural, ensaiados.

Desta forma, o valor característico final entrará em consideração com uma referência de resultados obtidos em provetes de dimensão estrutural, algo que não acontece na atual metodologia alternativa preconizada pela EN 384 (CEN, 2010), para espécies de folhosas.

Segundo o procedimento descrito, seriam obtidos os valores apresentados na Tabela 6.25.

Tabela 6.25: Classes de Resistência correspondentes aos valores característicos das tensões de rotura à flexão, segundo expressão proposta no presente trabalho, baseado em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos e de dimensões estruturais.

Espécie	N. provetes pequenas dimensões	N. de Vigas	Proposta do presente trabalho			Clas. de Res. (EN 338)
			f_{min} (MPa)	f_{mpk} (MPa)	$E_{m,k2}$ (GPa) $f_{m,k} = (n/40).f_{min} + ((40-n)/40).f_{mpk}$	
Câmbala	420 (Cap.4)	4 (Cap.5)	61,07	39,38	41,55	D40
	98 (Cap.5)			37,13	39,52	D35
Sapelli	495 (Cap.3)	4 (Cap.5)	66,3	56,61	57,58	D50
	98 (Cap.4)			58,38	59,17	D50

Uma vez mais, verifica-se a enorme proximidade com as Classes de Resistência previstas para as duas espécies, segundo a EN 1912 (CEN, 2012b).

Capítulo 7

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

RESUMO: No presente capítulo, é feita uma abordagem à pertinência do estudo realizado, enquadrando-o na realidade atual das madeiras tropicais, quer ao nível da regulamentação de importação, quer ao nível da comercialização dos seus produtos e derivados no espaço Europeu. São abordadas as conclusões gerais do trabalho realizado, baseadas nas análises aos resultados obtidos das diferentes campanhas de ensaios. São apresentadas algumas considerações e propostas de possíveis trabalhos futuros.

7.1 Pertinência para o estudo apresentado

De uma forma geral, a nova realidade para a importação de madeiras tropicais e seus derivados, imposta pelo Regulamento (UE) N.º 995/2010 (EUTR), tem modificado a disponibilidade de oferta destas madeiras no mercado europeu. As preocupações e exigências para com a proveniência das madeiras têm alterado os procedimentos de escolha das árvores a abater, substituindo a prática de abate seletivo, utilizada nas florestas tropicais da África central, pela prática de abate generalizado, confinado a zonas florestais. Esta realidade, conjugada com a elevadíssima heterogeneidade de espécies por hectare de floresta tropical, têm transformado a oferta de madeiras tropicais no mercado europeu.

Atualmente, o mercado vem disponibilizando, cada vez mais, uma alargada panóplia de espécies tropicais, provenientes de florestas tropicais geridas de forma sustentável, das quais, na sua grande maioria, não existe qualquer conhecimento das respetivas capacidades mecânicas. Para além disso, quando se pretende efetuar a caracterização das referidas espécies, as regras de comercialização de produtos de construção civil, designadamente para produtos de madeira maciça de secção retangular, definidas no anexo ZA da norma EN 14081-1 (CEN, 2016), impõem critérios adaptados, essencialmente, à realidade das madeiras de resinosas, com implícita aceitação para as madeiras de folhosas, desconsiderando as suas diferenças físicas e anatómicas. Desta forma, urge aprofundar os conhecimentos sobre as capacidades mecânicas destas espécies, de forma a que as novas espécies, que vão chegando ao mercado Europeu, possam ser encaradas como verdadeiras alternativas às espécies tropicais mais comuns, quer do ponto de vista da valorização das novas espécies, mas, acima de tudo, da própria sustentabilidade das florestas tropicais e das espécies mais comuns.

Enquadrada na realidade atual do comércio de madeiras tropicais, a presente tese teve, por central objetivo, o desenvolvimento de novas propostas de caracterização mecânica. Esta realidade foi conjugada com o facto das madeiras de folhosas serem caracterizadas por uma constituição física homogénea, com reduzida incidência de defeitos naturais. Nesse sentido, foram apresentados modelos de caracterização, para a determinação dos respetivos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão e da tensão de rotura à flexão. Um primeiro modelo, baseado apenas em campanhas de ensaios de provetes prismáticos de pequenas dimensões, isentos de defeitos; e um segundo, que junta ao primeiro modelo, o conhecimento de alguns resultados de ensaios, em provetes de dimensão estrutural.

7.2 Campanhas de ensaios dos Capítulos 4 e 5

7.2.1 Valores médios e característicos das propriedades de referência

Começando pelos resultados médios obtidos para as propriedades de referência das espécies em cada campanha de ensaios, verificou-se estarem enquadrados com os intervalos de resultados previstos em estudos semelhantes. No entanto, entre amostras da mesma espécie e com a mesma origem, são observadas significativas diferenças para as médias das tensões de rotura à flexão, da campanha de ensaios do Capítulo 4 para o Capítulo 5. Para ambas as espécies, verifica-se que a amostra do Capítulo 4 é, em média, 20% superior. Esta diferença poderá ser justificada pelo facto de os provetes do Capítulo 5 serem provenientes de provetes de dimensões estruturais que já tinham sido sujeitos à rotura. Como tal, será admissível que parte das fibras dos provetes de pequenas dimensões, já estivesse danificada.

Também as médias das massas volúmicas das duas amostras de Sapelli, apresentam uma significativa diferença, sendo a da campanha de ensaios do Capítulo 4, 1,14 vezes superior à média verificada para o Capítulo 5.

Apesar das diferenças referidas, no cálculo dos percentis de 5%, das tensões de rotura e do módulo de elasticidade, com base nos resultados dos provetes de pequenas dimensões, verifica-se uma homogeneidade de resultados entre as campanhas de cada espécie. Apesar disso, para o valor característico da massa volúmica da Câmbala, verifica-se que a amostra do Capítulo 5 é 1,19 vezes superior à do Capítulo 4.

Uma das possíveis justificações para as diferenças entre os valores médios das massas volúmicas, no caso da Sapelli e entre os valores característicos, no caso da Câmbala; poderá ser explicada pela enorme heterogeneidade das florestas tropicais, podendo criar condições para que espécimes da mesma espécie tenham alterações significativas na sua constituição. Quinsavia et al. (2010) estudaram este facto para a espécie de Câmbala.

7.2.2 Correlações entre propriedades

De uma forma geral, as correlações estabelecidas nas diferentes campanhas de ensaios, em provetes de pequenas dimensões, realizadas nos Capítulos 4 e 5, apresentam tendências semelhantes. Em conformidade com outros estudos, abordados na secção 3.3.3, verificam-se fortes correlações entre os módulos de elasticidade à flexão e as tensões de rotura à flexão. São também observadas boas correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos

e os módulos de elasticidade à flexão. Relativamente à correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade à flexão, de acordo com o expectável, atingiram-se valores moderados, com a exceção da campanha de ensaios do Capítulo 5, para a espécie de Sapelli. Para esta campanha, tinha sido já observado uma significativa redução da massa volúmica média, em comparação com a do Capítulo 4. Este facto acaba por ter, também, implicações na correlação do módulo de elasticidade dinâmico, com o módulo de elasticidade à flexão, na mesma campanha, verificando-se um coeficiente de determinação ligeiramente mais baixo do que nas restantes.

Apesar dos referidos valores para as massas volúmicas estarem dentro dos intervalos previstos pela bibliografia da área, os valores de correlação com o módulo de elasticidade ficam um pouco aquém do esperado.

Seria também relevante, estudar-se a possibilidade de utilização dos resultados das correlações obtidos nas 3ª e 4ª Fases, entre as propriedades dos provetes de pequenas dimensões. Neste caso, o elevado grau de confiança resultante dos valores dos respetivos coeficientes de determinação, à semelhança do concluído por Ravenshorst et al. (2013), poderia permitir estimar o valor de cada elemento estrutural, individualmente, tornando-se desnecessária a atribuição de uma Classe de Resistência para a espécie.

Em relação às correlações estabelecidas com as propriedades dos provetes de dimensão estrutural, dadas as dimensões reduzidas das amostras, não é exequível extraírem-se conclusões precisas. Porém, é possível observar algumas tendências. Entre elas, destacam-se as correlações entre os módulos de elasticidade à flexão (exceptuando na amostra de Sapelli, a viga 1). Quanto às correlações entre os módulos de elasticidade à flexão e os módulos de elasticidade dinâmicos, seriam também de esperar fortes correlações, de acordo com a bibliografia da área. Porém, a dimensão reduzida das amostras de vigas não permitiu aferir qualquer tipo de tendência de correlações com as massa volúmicas que tenham implicação direta nos módulos de elasticidade dinâmicos. Apesar disso, é com base na expectável boa correlação entre os módulos de elasticidade à flexão das campanhas de ensaios e entre os módulos de elasticidade à flexão com os módulos de elasticidade dinâmicos, que se fundamentaram as propostas de modelo de previsão do módulo de elasticidade em provetes de dimensão estrutural, a partir de provetes de pequenas dimensões.

Para além disso, encontram-se também fortes correlações entre as tensões de rotura à flexão das vigas, com as tensões de rotura à flexão e os módulos de elasticidade à flexão, dos provetes de pequenas dimensões. Estes factos são também frequentes em estudos semelhantes. Como referido na secção 3.3.3, Jamil et al. (2013) para provetes de dimensão estrutural e de pequenas dimensões, isentos de defeitos, referiram ser expectável uma boa correlação entre os valores das tensões de rotura à flexão. É com base nesta conclusão, e nos

resultados obtidos, que foi elaborada a proposta de modelo para a previsão dos valores característicos das tensões de rotura à flexão.

7.3 Resumo das propostas de modelos para a determinação dos valores característicos

As propostas de modelos para a determinação das propriedades características das madeiras tropicais, que aqui se apresentam, assentam nos resultados obtidos das campanhas de ensaios e na bibliografia que aborda estudos semelhantes. Desta forma, das campanhas de ensaios em provetes de pequenas dimensões, pode concluir-se da existência de uma elevada correlação entre as propriedades da tensão de rotura à flexão, do módulo de elasticidade à flexão e do módulo de elasticidade dinâmico. A possibilidade de estabelecer correlações, ao nível da Fase 4 das campanhas de ensaios, permitiram obter níveis mais elevados de precisão, na estimativa das propriedades. Naturalmente, este factor necessitará de ser corroborado por novas campanhas de ensaios. Apesar disso, está-se perante resultados que justificam investir-se em campanhas semelhantes, ao nível de provetes de dimensão estrutural.

O presente estudo demonstra que o assumir de condições, devidamente justificadas, para a exclusão de resultados outliers (Fase 3), e de 5% dos valores mais afastados da média (Fase 4), poderá ter um papel fulcral no estabelecimento de correlações entre as propriedades da madeira, conseqüentemente, no estimar das propriedades características da madeira.

Da relação estudada entre os resultados obtidos dos provetes de pequenas dimensões com os de dimensões estruturais, apesar de não poderem ser conclusivas, devido ao número limitado de provetes ensaiados, foi possível observarem-se tendências de correlações.

Na secção 6.4, do presente trabalho, foram propostos modelos para estimar as propriedades características das madeiras tropicais. Os modelos deverão servir como ponto de partida para o aprofundar de novas campanhas de ensaios. Desta forma, pretende começar-se a colmatar a falta de profundidade que a normalização europeia vai mantendo sobre estas madeiras, ao mesmo tempo que o mercado é inundado por inúmeras “novas” espécies tropicais.

De forma resumida a Tabela 7.1 apresenta os modelos propostos.

Tabela 7.1: Modelos propostos para a determinação das propriedades características de referência, a partir de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, e de uma pequena amostra de provetes ensaiados segundo a EN 408 (CEN, 2012a).

Modelo baseado em ensaios de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos	Modelo complementado com resultados em ensaios de provetes segundo a EN 480 (CEN, 2012a)
Para o valor característico do módulo de elasticidade à flexão:	
$E_{mk} = x E_{mp} + y E_{din}$ sendo: $x=0,29$; $y=0,71$	$E_{mk} = x / 40 E_{mv} + (40 - x) / 40 E_{mkp}$
No caso de não se conhecer E_{din} : $E_{din} = v^2 \cdot \rho$ Em que $v = 4300$ m/s para espécies africanas; ou $v = 3800$ m/s para as restantes espécies tropicais.	Em que E_{mkp} é calculado da mesma forma que o valor característico no modelo baseado em ensaios de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.
Para o valor característico da tensão de rotura à flexão:	
$f_{mk} = 0,85 f_{mkp} \cdot 0,9$	$f_{mk} = x / 40 f_{min} + (40 - x) / 40 f_{mkp}$ sendo x o número de provetes de dimensão estrutural, ensaiados
No caso de não se conhecer f_{mkp} : $f_{mkp} = 0,5143 f_{mp} + 10,935$	Em que f_{mkp} é calculado da mesma forma que o valor característico no modelo baseado em ensaios de provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos.

7.4 Desenvolvimentos futuros

Considerando, a nível dos provetes de dimensão estrutural, a clara tendência de correlação entre as propriedades mecânicas de referência e o espectável aumento de correlação destas com o módulo de elasticidade dinâmico, seria relevante aprofundar-se o estudo, aumentando o número de provetes de dimensões estruturais e os correspondentes provetes de pequenas dimensões extraídos dos primeiros. Nesse sentido, seria interessante abordar a filosofia explanada na presente tese, com base numa amostra mais alargada de provetes de dimensão estrutural. Como ponto de partida, poder-se-ia assumir uma dimensão correspondente a metade do previsto pela EN 384 (CEN, 2010), ou seja, 20 provetes estruturais. Posteriormente, comparar-se-iam os resultados como os obtidos de dimensões de amostras superiores e inferiores, estudando a verdadeira influência do tamanho das amostras de provetes de dimensão estrutural.

Com a intenção de tornar os modelos propostos mais abrangentes, será relevante, para novas campanhas de ensaios, diversificar o mais possível as espécies tropicais e as suas origens. Desta forma, será possível, determinar com maior rigor, as constantes dos modelos e as expressões de correlação correspondentes. Assim, será possível estimar, com maior precisão e fiabilidade, as propriedades características de referência das espécies tropicais.

Não poderá deixar-se de referir o elevado interesse que existirá no confirmar dos conceitos aplicados, à exclusão de valores resultantes nas 3ª e 4ª Fases de correlações entre as propriedades aferidas dos provetes de pequenas dimensões. Nesse sentido, seria interessante desenvolverem-se novos estudos, também estes, alargados a diferentes espécies tropicais, nos quais se pudessem fundamentar melhor as teorias assumidas para a exclusão dos valores anormais. A este nível, campanhas de ensaios com diferentes escalas de provetes e diferentes métodos estatísticos, também serão relevantes para atestarem das assunções realizadas no presente trabalho, para a exclusão de ensaios nas 3ª e 4ª Fases.

Para além das propriedades físicas e mecânicas determinadas para as espécies de Câmbala e Sapelli, seria também interessante fazer-se um estudo da viabilidade económica para a generalidade das madeiras tropicais, com vista à aplicação destas espécies em elementos estruturais. Por certo que a valorização de novas espécies irá fazer com que se reduza o processo seletivo de abate de árvores. Desta forma, para além de se estar a proteger a floresta, também os custos logísticos deverão baixar, uma vez que se espera que o abate de árvores se comece a processar de forma generalizada, sem discriminação de espécies.

Importa referir que, para qualquer espécie ser introduzida, em grandes quantidades, no mercado Europeu, para efeito de aplicação em elementos estruturais, pequenos projetos têm que ir sendo realizados e calculados, com base, igualmente, em pequenas campanhas de ensaios específicos. O conhecimento sobre as espécies vai aumentando com o desenvolvimento de pequenos projetos de construção. Mais campanhas de ensaios poderão ser realizadas à medida que os projetos de maior risco associado são desenvolvidos.

Bibliografia

—

ABENDE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. Disponível em: <http://www.abende.org.br/ensaios_ao_destrutivos.html> Acesso em: 12 julho, 2006.

Affonso EA, Barbosa MA, Vilató RR (1999). *Madeira: Princípios da ciência dos materiais aplicados aos materiais de construção civil*. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, Brasil.

AFPD - African Flowering Plants Database (2008). Base de Donnees des Plantes a Fleurs D'Afrique.

Ahmad Z, Bon YC, Wahab AES (2010). Tensile strength properties of tropical hardwoods in structural size testing. *International Journal of Basic and Applied Sciences*. 10: 1–6.

Alder D, Silva JNM (2000). An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon Forest. *Ecology and Management* 130: 141–157.

Almeida PA (s.d.). *Madeira como material estrutural*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Alik D, Badorul HAB (2006). Strength performance of full-size structural timber of *Dryobalanops* species of Sarawak, Malaysia. *Proceedings of the Nineth World Conference Timber Engineering*. 6–10 August 2006, Portland.

Amoah M, Appiah-Yeboahand J, Okai R (2012). Characterization of Physical and Mechanical Properties of Branch, Stem and Root Wood of Iroko and Emire Tropical Trees. *Research Journal of Applied Science*, Vol. 4 No.12, 2012. pp. 1755- 1761.

Anastácio R.S. (2010). *Especificação de protecção fogo para estruturas de madeira*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Anitha K, Joseph S, Chandran RJ, Ramasamy EV, Prasad SN (2010). Tree species diversity and community composition in a human-dominated tropical forest of western Ghats biodiversity hotspot India. *Ecological Complexity* 7: 217–224.

Appanah S (2013). The search for a viable silviculture in Asia's natural tropical forests. *Unasyuva*, 64(240): 35–40.

Appiah M. (2003). *Domestication of an indigenous tropical forest tree: Silvicultural and socio-economic studies on Iroko (Milicia Excelsa) in Ghana*. Helsinki: Faculdade de Agricultura e Silvicultura da Universidade de Helsinki.

Arriaga F. (2002). *Intervención en Estructuras de Madera*. Madrid: AITIM.

Arriaga F, Íñiguez G, Esteban M, Fernández-Golfín JI (2006). Structural Tali timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. *Springer-Verlag. Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 357–362.

Árvores e Pessoas – Gestão da árvore no espaço urbano (2016). Disponível em: <<http://www.arvores-e-pessoas.pt>> Acedido em: 12 julho, 2016.

Asner GP, Broadbent EN, Oliveira PJC, Keller M, Knapp DE, Silva JNM (2006). Conditions and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103: 12947–12950.

ATFS - American Tree Farm System (2010). <http://www.treefarmssystem.org/>. Accessed September 5, 2011.

Auld G, Gulbrandsen LH, McDermott CL (2008). Certification schemes and the impacts on forests and forestry. *Annual Review of Environment and Resources*, 33: 187–211.

Ayensu ES, Bentum A. (1974). *Commercial timbers of West Africa*. Smithsonian Contributions to Botany 14. Smithsonian Institution Press, Washington DC.

Barrett JD, Fewell AR (1990). Size factors for the bending and tension strength of structural timber. *CIB-W18 Timber Structures*, Paper 23-10-3, Lisbon, Portugal, September

Barrett JD, Griffin H (1989). Size effects for Canadian dimension lumber. *CIB-W18 Timber Structures*, Paper 22-6-1, Berlin, German Democratic Republic, September

Bartunkova, E. (2011). "Non-destructive Tests and Degradation Assessment of Old Chestnut Timber." Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho - Escola de Engenharia.

Berg CC (1982). The reinstatement of the genus *Milicia* Sim (Moraceae). *Bull. Jard. Bot. Belg.* 52: 225–229.

Blanc L, Echard M, Hérault B, Bonal D, Marcon E, Chave J, Baraloto C. (2009). Dynamics of above-ground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. *Ecological Applications* 19: 1397–1404.

Blaser J, Sarre A, Poore D, Johnson S (2011). *Status of tropical forest management 2011*. ITTO Technical Series No 38. Yokohama, Japan, International Tropical Timber Organization.

Blundell AG, Gullison RE (2003). Poor regulatory capacity limits the ability of science to influence the management of mahogany. *Forest Policy and Economics* 5: 395–405.

Bohannon W (1966). *Effect of size on bending strength of wood beams*. US Forest Products Laboratory, Bulletin No. 56

Bonamini, G.; Ceccotti, A.; Montini, E. (1992). *Indagini non distruttive per la verifica strutturale di travi di legno antico*. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, Legno, materiale per l'ingegneria civile, raccolta monografica, sezione strutture no16/90, p. 118.

Bonamini G, Noferi M, Togni M, Uzielli L (2001). *Il Manuale del Legno Strutturale - Vol.I: Ispezione e diagnosi in opera*. Mancosu Editore, Roma.

Bowyer, J (2008). The green movement and the forest products industry. *Forest Prod. J.* 58(7/8):6–13.

Branco J. (2003). *Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães.

Branco J, Piazza M, Cruz PJS (2010). *Structural analysis of two king-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests*. *Constr Build Mater*; 24:371-83.

Brown C, Durst P, Enters T (2005). *Perceptions of excellence: ingredients of good forest management*. In P. Durst, C. Brown, H.D. Tacio & M. Ishikawa, eds. *In search of excellence: exemplary forest management in Asia and the Pacific*. Bangkok, FAO and the Regional Community Forestry Training Center for Asia and the Pacific.

BS 373:1957 (1957). *Methods of testing small clear specimens of timber*. British Standards. Londres.

BS 5756:2007 (2007). *Visual grading of hardwood – Specification*. British Standards. Londres.

Bucur V. (1995). *Acoustics of wood*. 1st Ed. CRC Press Inc., NY, 284 p.

Bucur V, Archer RR (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technol* 18:225–265

Carvalho A. (1996). *Madeiras Portuguesas - Estrutura anatómica, propriedades e utilizações*. Lisboa: Instituto Florestal. Portugal.

CEN (1997a) EN 844-7:1997. *Round and sawn timber. Terminology – Part 7: Terms relating to anatomical structure of timber*. European Committee for Standardization. Bruxelas.

CEN (1997b) EN 844-9:1997. *Round and sawn timber. Terminology – Part 9. Terms relating to features of sawn timber*. European Committee for Standardization. Bruxelas.

CEN (1997c) EN 1310:1997. *Round and sawn timber – Method of measurement of features*. European Committee for Standardization. Bruxelas.

CEN (1998) EN 844-10:1998. *Round and sawn timber - Terminology - Part 10: Terms relating to stain and fungal attack*. European Committee for Standardization. Bruxelas.

CEN (2002) EN 13183-1:2002. *Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method*. European Committee for Standardization. Bruxelas.

CEN (2003) EN 13556:2003. *Round and sawn timber - Nomenclature of timbers used in Europe*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2009a) EN 338:2009. *Structural timber – strength classes*. CEN European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2009b) EN 14081-4:2009. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4: Machine grading – Grading machine settings for machine controlled systems*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2010). EN 384:2010 - *Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2011) EN 14081-1:2005+A1:2011. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2012a). EN 408:2012 - *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2012b) EN 1912:2012. *Structural timber – strength classes. Assignment of visual grades and species*. CEN European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2013a) EN 336:2013. *Structural timber – Sizes, permitted deviations*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2013b) EN 14081-2:2013. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2013c) EN 14081-3:2013. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3: Machine grading; additional requirements factory production control*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CEN (2016) EN 14081-1:2005. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements*. European Committee for Standardization. Bruxelles.

CERFLOR (2011). Programa Brasileiro de Certificação Florestal.

CERTFOR (2011). Sistema Chileno de Certificación de Manejo Forestal Sustentable. <http://www.certfor.org/>. Accessed July 5, 2011.

Cheng J, Yang J, Liu P (1992). *Wood Science Records*. China Forestry Publishing Company, Beijing.

CIRAD Forestry Department. (2003). Sapelli. <http://tropix.cirad.fr/africa/sapelli.pdf>. Acedido em 23 novembro 2009.

Cochrane MA (2003). Fire science for rainforests. *Nature* 421: 913–919.

CSA - Canadian Standards Association (2011). <http://www.csasfmforests.ca/home.htm>. Accessed September 5, 2011.

Dauber E, Fredericksen TS, Peña M (2005). Sustainability of timber harvesting in Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management* 214: 294–304.

DECISÃO (UE) 2015/451 DO CONSELHO de 6 de março de 2015 relativa à adesão da União Europeia à Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies Selvagens da Fauna e da Flora Ameaçadas de Extinção (CITES)

DECISÃO N.º 768/2008/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 9 Julho de 2008 relativa a um quadro comum para a comercialização de produtos, e que revoga a Decisão 93/465/CEE .

Decreto do Presidente da República n.º 103/2013 de 10 de setembro, Diário da República, 1.ª Série—N.º 174—10 de setembro de 2013.

Decreto-Lei n.º 4/2007 de 8 de Janeiro, Diário da República - I Série — N.º 5.

Decreto-Lei n.º 50/80 de 23 de Julho, I SÉRIE – N.º 168 – 23-7-1980.

Decreto-Lei n.º 113/93 de 10 de Abril, Diário da República – I Série – A, N.º 84 – 10-4-1993.

Decreto-Lei n.º 130/2013 de 10 de setembro, Diário da República, 1.a série—N.º 174—10 de setembro de 2013.

Decreto-Lei n.º 135/2012 de 29 de junho, Diário da República, 1.ª série—N.º 125—29 de junho de 2012.

Decreto-Lei n.º 139/95 de 14 de Junho, Diário da República – I Série – A, N.º136– 14-6-1995.

Decreto-Lei n.º 211/2009 de 3 de Setembro, Diário da República, 1ªa série—N.º 171—3 de Setembro de 2009.

Decreto-Lei n.º 374/98 de 24 de Novembro, Diário da República – I Série – A, N.º272– 24-11-1998.

Degen B, Blanc L, Caron H, Maggia L, Kremer A, Gourlet-Fluery S (2006). Impact of selective logging on genetic composition and demographic structure of four tropical tree species. *Biological Conservation* 131: 386–401.

Denslow JS (1987). Tropical forest gaps and tree species diversity. *Annual Review Ecology and Systematics* 18: 431–451.

Desch HE, Dinwoodie JM (1996). *Timber — Structure, Properties, Conversion and Use*. Seventh edition. McMillan, Basingstoke.

DIRECTIVA 89/106/CEE DO CONSELHO de 21 de Dezembro de 1988 relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos de construção.

DIRECTIVA 93/68/CEE DO CONSELHO de 22 de Julho de 1993 que altera as Directivas 87/404/CEE (recipientes sob pressão simples), 88/378/CEE (segurança dos brinquedos), 89/106/CEE (produtos de construção), 89/336/CEE (compatibilidade electro- magnética), 89/392/CEE (máquinas), 89/686/CEE (equipamentos de protecção individual), 90/384/CEE (instrumentos de pesagem de funcionamento não automático), 90/385/CEE (dispositivos medicinais implantáveis activos), 90/396/CEE (aparelhos a gás), 91/263/CEE (equipamentos terminais de telecomunicações), 92/42/CEE (novas caldeiras de água quente alimentadas com combustíveis líquidos ou gasosos) e 73/23/CEE (material eléctrico destinado a ser utilizado dentro de certos limites de tensão).

DIRECTIVA 98/34/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 22 de Junho de 1998 relativa a um procedimento de informação no domínio das normas e regulamentações técnicas.

Doucet JL, Kouadio YL, Monticelli D, Lejeune P (2009). Enrichment of logging gaps with moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) in a Central African rain forest. *Forest Ecology and Management* 256: 2407–2415.

Douglas J, Simula M (2010). *The future of the world's forests: ideas vs ideologies*. Dordrecht, the Netherlands, Springer.

Ebeling J, Yasué M (2009). The effectiveness of market-based conservation in the tropics: Forest certification in Ecuador and Bolivia. *J. Environ. Manag.* 90(2):1145–1153.

Espinoza O, Buehlmann U, Smith B (2012). Forest certification and green building standards: Overview and use in the U.S. hardwood industry. *J. Cleaner Prod.* 33:30–41.

Espinoza O, Buehlmann U, Dockry M (2013). Status of Forest Certification. *ISCHP*, Florença, Italia.

Eva HD, Achard F, Beuchle R, Miranda E, Carboni S, Seliger R, Vollmar M, Holler WA, Oshiro OT, Arroyo VB, Gallego J (2012). *Forest cover changes in tropical South and Central America from 1990 to 2005 and related carbon emissions and removals*. *Remote Sensing* 4, 1369 – 1391.

Faggiano B, Grippa MR, Marzo A, Mazzolani FM (2011). *Experimental study for non-destructive mechanical evaluation of ancient chestnut timber*. *J Civ Struct Health Monit*; 1:103-12.

FAO (2005). <http://www.fao.org/forestry/country/32185/en/>, Data source: FAO, Global Forest Resources Assessment 2005.

FAO (2010) – Global Forest Resources Assessment. FAO Forestry Paper 163, Rome.

FAO, JRC (2012) Global forest land-use change 1990 – 2050 (eds EJ Lindquist et al.). FAO forestry paper no. 169. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and European Commission Joint Research Centre, FAO.

FAO (2012)- Towards Sustainable Forest Management. FAO. www.fao.org/forestry/sfm/en. Accessed 14 February 2012.

Feio A. (2005). *Inspeção e diagnóstico de estruturas históricas de madeira: Correlações com métodos não destrutivos*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Portugal

Feeney F, Chivers R, Eversten J, Keating J (1998). The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood. *Ultrasonics*, 36, 219-222.

Feio AO, Lourenço PB, Machado JS (2007). Non-destructive evaluation of the mechanical behaviour of chestnut wood in tension and compression parallel to grain. *International Journal of Architectural Heritage*, 1, 272-292.

Fewell AR, Curry WJ (1983) *Depth factor adjustments in the determination of characteristic bending stresses for visually graded timber*. Structural Engineer, vol 61B, No.2

Fewell AR, Glos P (1988). The determination of characteristic strength values for stress grades of structural timber. *Part 1. CIB W18*, proceedings paper 43-5-2, Parksville, Canada.

Forshed O, Karlsson A, Falck J, Cedergren J (2008). Stand development after two modes of selective logging and pre-felling climber cutting in a dipterocarp rainforest in Sabah Malaysia. *Forest Ecology and Management* 255: 993–1001.

Freitas JV, Pinard MA (2008). Applying ecological knowledge to decisions about seed tree retention in selective logging in tropical forests. *Forest Ecology and Management* 256: 1434–1442.

Fruhwald E, Thelandersson S (2001) Nordic wood: reliability of timber structures. *Reliability analysis, COST Action E24 Reliability Analysis of Timber Structures, Copenhagen Meeting*, 19–20 October 2001

FSC - Forest Stewardship Council (2002). *FSC Principles and Criteria for Forest Stewardship*. FSC. Report no. FSC FSC-STD-01-001 (version 4-0) EN.

FSC - Forest Stewardship Council (2012). Facts and figures. <http://ic.fsc.org/facts-figures.19.htm>. Accessed January 8, 2012.

FSC - Forest Stewardship Council (2013). <http://www.fsc.org/en/>. Accessed April 11, 2013.

García-Irueña A, Fernández FG, Esteban LG, Palacios P, Simón C, Arriaga F (2016). *Comparison of modelling using regression techniques and an artificial neural network for obtaining the static modulus of elasticity of Pinus radiata D. Don. timber by ultrasound*. Composites Part B Engineering, Elsevier.

Gard W, Ravenshorst GJP, Kuilen JWG (2013). Consistency of visual strength grading of tropical hardwoods in Europe. *Fourth ISCHP*, Florence, Italy

Geert R, Kuilen JW (2010). Comparison of methods of strength classification of tropical hardwood timber. *Proceedings of the Eleventh World Conference on Timber Engineering*. 20–24 June 2010, Riva Del Garda.

Gérard J (2004). *Caractéristiques techniques de 215 essences tropicales, Technical characteristics of 215 tropical species*. CIRAD TROPIX 5.0. Département Forêt du CIRAD. Campus International de Baillarguet, Montpellier, France.

Gominho J, Knapic S, Pereira H (2004). *Cerne e Borne - Factores de variação da qualidade tecnológica das árvores*. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.

Gorniak E., Matos J.L.M. (2000). *Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira*. VII Encontro Brasileiro em Madeira em Estrutura de Madeira. Anais do VII Encontro Brasileiro em Estrutura de Madeira, São Carlos, 2000.

Gourlet-Fleury S, Comu G, Jéssel S, Dessard H, Jourget JG, Blanc L, Picard N (2005). Using models to predict recovery and assess tree species vulnerability in logged tropical forests: A case study from French Guiana. *Forest Ecology and Management* 209: 69–86.

Gourlet-Fleury S, Mortier F, Fayolle A, Baya F, Ouédraogo D, Bénédet F, Picard N (2013). *Tropical forest recovery from logging: a 24 year silvicultural experiment from Central Africa*. Phil. Trans. R. Soc. B 368, 20120302.

Graaf NR, Poels RLH, Van Rompaey RSAR. 1999. Effect of silvicultural treatment on growth and mortality of rainforest in Surinam over long periods. *Forest Ecology and Management* 124: 123–135.

Grogan J, et al. (2008). What loggers leave behind: Impacts on big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) commercial populations and potential for post-logging recovery in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 255: 269–281.

Guitet S, Blanc L, Trombe PJ, Lechallier B (2009). Silvicultural treatments in the tropical forests of Guiana: A review of ten years of trials. *Bois et Forêts des Tropiques*. 301: 7–19.

Hall JS (2008). Seed and seedling survival of African mahogany (*Entandrophragma* spp.) in the Central African Republic: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* 255: 292–299.

Hall JS, Harris DJ, Medjibe V, Ashton PMS. 2003. The effects of selective logging on forest structure and tree species composition in a Central African forest: Implications for management of conservation areas. *Forest Ecology and Management* 183: 249–264.

Hansen, E., R. Fletcher, B. Cashore, and C. Mcdermott. (2006). Forest certification in North America. College of Forestry, Extension Publication EC 1518. 12 pp. http://yale.edu/forestcertification/pdfs/2006/OSU_SFI-CertComparStudy.pdf. Accessed December 16, 2011.

Hansen MC et al. (2008) Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 9439 – 9444.

Hewitt J (2007). *An assessment of tree species that warrant listing in CITES*. Friends of the Earth, Netherlands.

Herauld B, Ouallet J, Blanc L, Wagner F, Baraloto C (2010). Growth responses of Neotropical trees to logging gaps. *Journal of Applied Ecology* 47: 821–831.

Höltken AM, Schröder H, Wischnewski N, Magel E, Degen B, Fladung M (2012). Development of DNA methods to identify CITES-protected timber species: A case study in the Meliaceae family. *Holzforschung*, Vol. 66, pp. 97–104.

Howe HF, Miriti MN (2000). No question: Seed dispersal matters. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 434–436.

Howe J, Fernholz K (2012). *Beyond certification*. Dovetail Partners, Inc., Minneapolis, Minnesota. 2 pp.

Huang M, Asner GP (2010). *Long-term carbon loss and recovery following selective logging in Amazon forests*. *Global Biogeochemical Cycles* 24 (Art. GB3028).

Hugh MW (2010). *Assistance With a Route to CE Marking for Malaysian Structural Timber*. Report TE// F10260. TRADA Technology Ltd, High Wycombe.

Huth A, Ditzer T (2001). Long-term impacts of logging in a tropical rain forest—A simulation study. *Forest Ecology and Management* 142: 33–51.

Importécnica (2015), Disponível em: <http://www.importecnica.com.br/durometro_madeira.html> Acesso em: 18 abril, 2015.

Íñiguez G, Arriaga F, Esteban M, Bobadilla I (2006). Non-destructive methods for the quality control of structural Tali timber. *WCTE 2006 - 9th World Conference on Timber Engineering - Portland, OR, USA*

ISO (1975a). ISO 3129-1975. *Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça

ISO (1975b). ISO 3130-1975. *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça

ISO (1975c). ISO 3131-1975. *Wood – Determination of density for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça

ISO (1975d). ISO 3133-1975. *Wood – Determination of ultimate strength in static bending*. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça

ITTO (1990). *Guidelines for the sustainable management of natural tropical forests. ITTO Policy Development Series No. 1. Yokohama*, International Tropical Timber Organization.

ITTO (2011) - International Tropical Timber Organization. <http://www.itto.int/>. Accessed September 26, 2011.

IUCN Red List (2014). The International Union for Conservation of Nature Red List. <http://www.iucnredlist.org/details/33903/0>, consultado em 15 de fevereiro de 2015.

Jamil AWM, Zamin JM, Omar MKM (2013). Relationship between mechanical properties of structural size and small clear specimens of timber. *Journal of Tropical Forest Science* 25(1): 12–21.

Jankowsky IP, Galvão AP (1979). *Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira*. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Brasil.

Jansen JWA (1974). *Timber Trees of Liberia*. University of Liberia, Monrovia.

Júnior J (2006). “*Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal

Kammesheidt L, Köhler P, Huth A. 2001. Sustainable timber harvesting in Venezuela: A modelling approach. *Journal of Applied Ecology* 38: 756–770.

Karsenty A, Gourlet-Fleury S (2006). Assessing sustainability of logging practices in the Congo Basin's managed forests: The issue of commercial species recovery. *Ecology and Society* 11: 26.

Kémeuzé VA (2008). *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague. Record from PROTA4U. Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A. & Brink, M. (Editors). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Netherlands.

Koltunov A, Ustin SL, Asner GP, Fung I (2009). Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. *Remote Sensing of Environment* 113: 2431–2440.

Küchli C (2013). The Swiss experience in forest sustainability and adaptation. *Unasylva*, 64(240): 12–18.

Kuilen JWG (1999) *Development of a general determination method for the strength of timber. Phase 1.* TNO Reports-LBC-R7027 / R7028/2 / R7029 / R7030/2. (in Dutch)

Kuilen JWG, Ravenshorst GJP (2000). *Development of a general determination method for the strength of timber Phase 2.* TNO Reports-CHT-R101 / R102 / R156 / R157 / R158 / R172 / R173 / R174 / R178 / R179 (in Dutch).

Kuilen, JWG, Ravenshorst GJP (2001). *Development of a general determination method for the strength of timber Phase 2.* TNO Report. 2000-CHT- R0182 (in Dutch).

Kuilen JWG, Ravenshorst GJP (2002). Bending strength and stress wave grading of (tropical) hardwoods. *COST E24 Reliability analysis of timber structures Joint Committee on Structural Safety*. Switzerland

Kuilen JWG, Blass HJ (2005). Mechanical properties of azobé (*Lophira alata*). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63: 1–10

Kuilen JWG, Ravenshorst GJP, Brunetti M, Crivellaro A (2007). Species independent strength grading of hardwoods. *ISCHP 07*, Quebec, Canadá.

Kuilen JWG (2013). Engineered wood structures with tropical hardwoods. *ISCHP*, Florença, Italia.

Kukkonen M, Hohnwald S (2009). Comparing floristic composition in treefall gaps of certified conventionally managed and natural forests of northern Honduras. *Annals of Forestry Science* 66: 809.

Kuusipalo J, Hadengganan S, Ådjers G, Sagala APS (1997). Effect of gap liberation on the performance and growth of dipterocarp trees in a logged-over rainforest. *Forest of Ecology and Management* 92: 209–219.

Lanvin JD, Reuling D, Rouger F, Kuilen JW, Ravenshorst G, Reinbol G, Bourguignon H, Gérard J, Guibal D, Boilley E, Verna M (2009). Simplified strength properties assessment for tropical hardwoods in view to CE marking. In *Preceding: ISCHP 09 International Scientific Conference on Hardwood processing*. Paris, France.

Laporte NT, Stabach JA, Grosch R, Lin TS, Goetz SJ. (2007). Expansion of industrial logging in Central Africa. *Science* 316: 1451.

Lembaga Ekolabel Indonesia (LEI) Web site (2011). <http://www.lei.or.id/>. Accessed June 28, 2011.

LNEC (1997). *FICHA M9: Humidade da madeira*. LNEC. Portugal

LNEC (1997). *Ficha técnica da madeira Câmbala*. Portugal.

Louppe D, Oteng-Amoako AA, Brink M (Editores) (2008). *Plante Resources of Tropical Africa 7 (1). Timbers 1*. PROTA Fundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands. 704p.

Lourenço P.B., Feio A.O., Machado, J.S. (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21, 1617-1627.

Lourmas M, Kjellberg F, Dessard H, Joly HI, Chevallier MH (2007). Reduced density due to logging and its consequences on mating system and pollen flow in the African mahogany *Entandrophragma cylindricum*. *Heredity*, 99: 151 - 160.

- Machado J.S. (2000). *Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (Pinus Pinaster Ait.) por meio de ultra-sons*. Tese de Doutoramento em Engenharia Florestal, Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal. 265 p
- MACHADO J.S. (2003), *Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) por meio de ultra-sons*. Tese de doutoramento. LNEC, 2003, ISBN 972-49-1941-2.
- Madsen B (1992). Structural behaviour of timber. Vancouver: Timber Engineering.
- Malhi Y, Wright J (2004) Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 359, 311 – 329.
- Malhi Y. (2010) The carbon balance of tropical forest regions, 1990 – 2005. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 237 – 244.
- Malhi Y, Adu-Bredu S, Asare RA, Lewis SL, Mayaux P (2013). African rainforests: past, present and future. *Phil Trans R Soc. B* 368: 20120312.
- Mansur E, Lungo A, Sabogal C (2013). Assessment, management and conservation of forest resources: the FAO perspective. *4th International Scientific Conference on Hardwood Processing*, Florence, Italy
- Matricardi EAT, Skole DL, Pedlowski MA, Chomentowski W, Fernandes LC (2010). Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 114: 1117–1129.
- Mayaux P et al. (2013) State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368, 20120300.
- McDonald K. (1978). *Lumber defect detection by ultrasonic*. Madison: Forest Prod. Lab.
- McGinley, Cabbage KFW (2011). Governmental regulation and nongovernmental certification of forests in the tropics: Policy, execution, uptake, and overlap in Costa Rica, Guatemala, and Nicaragua. *Forest Policy Econ.* 13(3):206–220.
- MTCC - Malaysian Timber Certification Council (2006). [http:// www.mtcc.com.my/](http://www.mtcc.com.my/). Accessed January 15, 2014.

Mvogo JK, Ohandja LMA, Minsili LS, Castera P (2011). Mechanical grading of structural timber and species conservation in the forest of the Congo Basin. *African Journal of Environmental Science and Technology* Vol. 5(2), pp. 111-125.

Nasi R, Frost PGH (2009). Sustainable forest management in the tropics: Is everything in order but the patient still dying? *Ecology and Society* 14: 40.

Nasi R, Billand A, Vanvliet N. (2012) Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *Forest Ecol. Manag.* 268, 103 – 111.

Nasi R (2013). *Is financing sustainable forest management as inappropriate use of public funding?* CIFOR Forest News, blog site (available at: <http://blog.cifor.org/13757/is-financing-sustainable-forest-management-an-inappropriate-use-of-public-funding/#.UWX-taJTZ8E>).

Nawir AA, Rumboko L (2007). *History and state of deforestation and land degradation*. Pages 11–32 In Nawir AA, Murniati, Rumboko L, eds. *Forest Rehabilitation in Indonesia: Where to after More Than Three Decades?* Center for International Forestry Research.

NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património. Disponível em:
< <http://edificiogarrett.blogspot.pt/2012/>> Acesso em: 14 abril, 2012.

NEN 5493:2011 (2011). *Quality requirements for hardwoods in civil engineering works and other structural applications*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, The Netherlands.

Newlin JA (1930). *Factors to be Considered in Testing Structural Timbers*. United States Department of Agriculture, Madison.

NF B 52-001-1:2011 (2011). *Regulations governing the use of timber in structure — Visual classification for the use of french softwood and hardwood species in structures — Part 1: Massive wood*. Association Française de Normalisation (AFNOR), La Plaine Saint-Denis Cedex, France.

Nocetti M, Brancheriau L, Bacher M, Brunetti M, Crivellaro A (2013). *Relationship between local and global modulus of elasticity in bending and its consequences on structural timber grading*. *Eur J Wood Prod.* DOI 10.1007/s00107-013- 0682-7.

NP-615 (1973). *Madeiras – Determinação da retracção*. IGPAI – Repartição de Normalização. Lisboa. Portugal.

NP-619 (1973). *Madeiras – Ensaio de flexão estática*. IGPAI – Repartição de Normalização. Lisboa. Portugal.

NP-4305 (1995). *Madeiras – Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. IPQ-Instituto Português da Qualidade. Portugal.

Nowak T, Hamrol-Bielecka K, Jasieńko J (2015). *Non-destructive testing of wood – correlation of ultrasonic and stress wave test results in glued laminated timber members*. Ann. WULS - SGGW, For. and Wood Technol. 92, Poland.

Nussbaum R, Simula M (2005). *The Forest Certification Handbook*. Earthscan, London.

Ofori D. (2007). *Milicia excelsa (Welw) C.C.Berg* [Internet] Record from Protabase. (D. Louppe, A. Oteng-Amoako, & M. Brink, Eds.) Retrieved Novembro 18, 2009, consultado em <http://database.prota.org/search.htm>.

Oliveira, M.A.F (2012). “*Eficácia do UPV na avaliação não destrutiva de elementos de Castanho*”. Tese de Mestrado, Universidade do Minho – Escola de Engenharia.
ORSTOM (1988) List Vasc. PI. Gabon Herbar National du Gabon, Yaounde.

Orwa C, Mutua A, Kindt R, Jamnadass R, Anthony S (2009). *Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0*. World Agroforestry Centre, Kenya.

Ouinsavia C, Sokpon N, Bada O (2005). Utilization and traditional strategies of in situ conservation of iroko (*Milicia excelsa* Welw. C.C. Berg) in Benin. *Forest Ecology and Management*, Volume 207, Issue 3, 341–350.

Ouinsavia C, Sokpon N (2010). Morphological Variation and Ecological Structure of Iroko (*Milicia excelsa* Welw. C.C. Berg) Populations across Different Biogeographical Zones in Benin. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Forestry Research* Volume 2010, Article ID 658396, 10 pages doi:10.1155/2010/658396.

Panshin AJ (1933). Comparative anatomy of the woods of the Meliaceae, sub-family Swietenioideae. *American Journal of Botany*, 20(10): 638 - 668.

Parmentier I et al. (2007). The odd man out? Might climate explain the lower tree alpha-diversity of African rain forests relative to Amazonian rain forests? *J. Ecol.* 95, 1058 – 1071.

Park A, Justiniano MJ, Fredericksen TS (2005). Natural regeneration and environmental relationships of tree species in logging gaps in a Bolivian tropical forest. *Forest Ecology and Management* 217: 147–157.

Pearce D, Putz FE, Vanclay JK (2003). Sustainable forestry in the tropics: panacea or folly? *Forest Ecology and Management*, 172: 229–247.

PEFC. 2012. PEFC website (available at: <http://pefcregs.info/statistics.asp>) (accessed January 2013).

PEFC - Programme for the Endorsement of Forest Certification (2013). <http://www.pefc.org/>. Accessed January 14, 2014.

Pepke E, Giurca A, Jonsson R, Lovrić M (2013). European Union Timber Regulation Impacts Global Hardwood Markets. *ISCHP*, Florença, Italia.

Peña-Claros M, et al. (2008). Beyond reduced-impact logging: Silvicultural treatments to increase growth rates of tropical trees. *Forest Ecology and Management* 256: 1458–1467.

Perera P, Vlosky RP (2006). A history of forest certification. Working Paper 71. *Louisiana Forest Products Development Center, Baton Rouge*. 14 pp.

Pitman NCA, Terborgh J, Silman MR, Nuñez PV (1999). Tree species distributions in an upper Amazonian forest. *Ecology* 80: 2651–2661.

Poore D, Burgess P, Palmer J, Rietbergen S, Synott T (1989). *No timber without trees: sustainability in the tropical forest*. London, Earthscan Publications.

Poorter L, Bongers F, Rompaey RSAR, Klerk M (1996). Regeneration of canopy tree species at five sites in West African moist forest. *Forest Ecology and Management* 84: 61–69.

Portaria n.º 7/2010 de 5 de Janeiro, Diário da República, 1.ª série—N.º 2—5 de Janeiro de 2010.

Portaria n.º 1225/2009 de 12 de Outubro, Diário da República, 1.ª série—N.º 197—12 de Outubro de 2009.

Portaria n.º 1226/2009 de 12 de Outubro, Diário da República, 1.ª série—N.º 197—12 de Outubro de 2009.

Primack RB, Hall P. (1992). Biodiversity and forest change in Malaysian Borneo. *BioScience* 42: 829–837.

PROTA (2008). Plant Resources of Tropical Africa. <http://www.prota4u.org/protaindex.asp>. Acedido a 22 de novembro de 2012.

Putz FE, Sist P, Frederickson T, Dystra D (2008). Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 256: 1427–1433.

Putz FE et al. (2012) Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. *Conserv. Lett.* 5, 296 – 303.

Ravenshorst GJP, Kuilen JWG (2010). Comparison of methods of strength classification of (tropical) hardwood timber. *WCTE 2010*, Trento, Itália.

Ravenshorst GJP, Gard WF, Kuilen JWG (2013). The importance of characterisation and sampling of tropical wood species with regard to strength and durability classification. *HERON*, Vol. 58 (2013), No. 2/3.

Ravenshorst GJP, Kuilen JWG (2006). An innovative species independent strength grading model. *In: 9th World Conference in Timber Engineering*. August 6-10, 2006.

Ravenshorst GJP, Linden M, Vrouwenvelder T, Kuilen JW (2004). An economic method to determine the strength class of wood species. *HERON*, Vol. 49, No. 4.

REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) N.º 792/2012 DA COMISSÃO de 23 de agosto de 2012 que estabelece regras para a concessão das licenças, certificados e outros documentos previstos no Regulamento (CE) N.º 338/97, relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio, e que altera o Regulamento (CE) N.º 865/2006 da Comissão.

REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) N.º 888/2014 DA COMISSÃO de 14 de agosto de 2014 que proíbe a introdução na União de espécimes de determinadas espécies da fauna e da flora selvagens.

REGULAMENTO (CE) N.º 100/2008 DA COMISSÃO de 4 de Fevereiro de 2008 que altera, no que respeita às coleções de amostras e a certas formalidades relacionadas com o comércio de espécies da fauna e da flora selvagens, o Regulamento (CE) N.º 865/2006 que estabelece normas de execução do Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho.

REGULAMENTO (CE) N.º 338/97 DO CONSELHO de 9 de Dezembro de 1996 relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (CE) N.º 765/2008 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 9 Julho de 2008 que estabelece os requisitos de acreditação e fiscalização do mercado relativos à comercialização de produtos, e que revoga o Regulamento (CEE) n.º 339/93.

REGULAMENTO (CE) N.º 865/2006 DA COMISSÃO de 4 de Maio de 2006 que estabelece normas de execução do Regulamento (CE) n.º 338/97 do Conselho relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (CE) N.º 2173/2005 DO CONSELHO de 20 de Dezembro de 2005 relativo ao estabelecimento de um regime de licenciamento para a importação de madeira para a Comunidade Europeia (FLEGT).

REGULAMENTO (UE) N.º 101/2012 DA COMISSÃO de 6 de fevereiro de 2012 que altera o Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (UE) N.º 305/2011 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 9 de Março de 2011 que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Directiva 89/106/CEE do Conselho.

REGULAMENTO (UE) N.º 750/2013 DA COMISSÃO de 29 de julho de 2013 que altera o Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (UE) N.º 791/2012 DA COMISSÃO de 23 de agosto de 2012 que altera, no que respeita a determinadas disposições relativas ao comércio de espécies da fauna e da flora selvagens, o Regulamento (CE) N.º 865/2006 que estabelece normas de execução do Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho.

REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) N.º 792/2012 DA COMISSÃO de 23 de agosto de 2012 que estabelece regras para a concepção das licenças, certificados e outros documentos previstos no Regulamento (CE) N.º 338/97, relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio, e que altera o Regulamento (CE) N.º 865/2006 da Comissão.

REGULAMENTO (UE) N.º 995/2010 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 20 de Outubro de 2010 que fixa as obrigações dos operadores que colocam no mercado madeira e produtos da madeira (EUTR).

REGULAMENTO (UE) N.º 1158/2012 DA COMISSÃO de 27 de novembro de 2012 que altera o Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (UE) N.º 1320/2014 DA COMISSÃO de 1 de dezembro de 2014 que altera o Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio.

REGULAMENTO (UE) N.º 2015/56 DA COMISSÃO de 15 de janeiro de 2015 que altera, no que respeita ao comércio de espécies da fauna e da flora selvagens, o Regulamento (CE) N.º 865/2006 que estabelece normas de execução do Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho.

REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) 2015/57 DA COMISSÃO de 15 de janeiro de 2015 que altera o Regulamento de Execução (UE) N.º 792/2012 no que respeita às regras para a concessão de licenças, certificados e outros documentos previstos no Regulamento (CE) N.º 338/97 relativo à proteção de espécies da fauna e da flora selvagens através do controlo do seu comércio e no Regulamento (CE) N.º 865/2006 da Comissão que estabelece normas de execução do Regulamento (CE) N.º 338/97 do Conselho.

Richter, HG, Dallwitz MJ (2009). *Onwords. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish*. Version: 25th June 2009. <http://delta-intkey.com>.

Rice R, Gullison R, Reid J (1997). Can sustainable management save tropical forests? *Sci. Am.* 276, 34 – 39.

Rudel TK. (2013). The national determinants of deforestation in sub-Saharan Africa. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368, 20120405.

Ryan TP (2009). *Estatística moderna para Engenharia*. Elsevier Editora Ltda, Brasil

Sahney, S., Benton, M.J. & Falcon-Lang, H.J. (2010). "Rainforest collapse triggered Pennsylvanian tetrapod diversification in Euramerica". *Geology* 38 (12): 1079–1082. doi:10.1130/G31182.1

Sandoz J.L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23: 95-108.

Sarre A, Sabogal C (2013). Is SFM an impossible dream? *Unasyuva* 64/1 (240) 26-34.

Schmithüsen F (2013). Three hundred years of applied sustainability in forestry. *Unasyuva*, 64(240): 3–11.

Schulze M (2008). Technical and financial analysis of enrichment planting in logging gaps as a potential component of forest management in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 255: 866–879.

Sebben AM, Degen B, Azevedo VCR, Silva MB, de Lacerda AEB, Ciampi AY, Kanashiro M, Carneiro FS, Thompson I, Loveless MD (2008). Modelling the long-term impacts of selective logging on genetic diversity and demographic structure of four tropical tree species in the Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 254: 335–349.

Sist P, Ferreira FN (2007). Sustainability of reduced-impact logging in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 243: 199–209.

Sist P, Fimbel R, Sheil D, Nasi R, Chevallier M-H (2003). Towards sustainable management of mixed dipterocarp forests of South East Asia: Moving beyond minimum diameter cutting limits. *Environmental Conservation* 30: 364–374.

Sist P, Nguyen-Thé N (2002). Logging damage and the subsequent dynamics of a dipterocarp forest in east Kalimantan (1990–1996). *Forest Ecology and Management* 165: 85–103.

Solli KH (2000). Modulus of elasticity—local or global values. In: Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering, 31st July–3rd August, Whistler, Canada

Struhsaker TT. 1997. Ecology of an African Rain Forest. University Press of Florida.

SFI - Sustainable Forest Initiative (2011). Sustainable Forest Initiative certification database. <http://64.34.105.23/PublicSearch/MainSearch.aspx>. Accessed September 2011.

Stapel P, Kuilen JWG (2013): Efficiency of visual strength grading of timber with respect to origin, species, cross section, and grading rules: a critical evaluation of the common standards. *Holzforschung: Aop*. DOI 10.1515/hf-2013-0042

Stapel P, Kuilen JWG, Ravenshorst GJP (2011). Influence of sample size on assigned characteristic strength values. *CIB W18*, proceedings paper 44-17-1,2011, Alghero, Italy.

Struhsaker TT (1997). *Ecology of an African rain forest: logging in Kibale and the conflict between conservation and exploitation*. University Press of Florida, 15 N.W. 15th St., Gainesville, Florida 32611-2079, USA. 456 pp. ISBN 0-8130-1490-5.

Ter Steege H, Welch I, Zagt R (2002). Long-term effect of timber harvesting in the Bartica Triangle Central Guyana. *Forest Ecology and Management* 170: 127–144.

Thomas AV (1931). Some notes on timber testing. *Malayan Forester* 1: 56–59.

Tropix 7 (2015). *The main technological characteristics of 245 tropical wood species*. <<https://tropix.cirad.fr/en>>. Acedido em 14 de abril 2015.

Tsoumis G. (1991). *Science and Technology of Wood*. Van Nostrand Reinhold, N.Y.

UNEP-WCMC (2006). *Contribution to an evaluation of tree species using the new CITES Listing Criteria*. UNEP-WCMC, Cambridge, UK. Available at: http://www.unep-wcmc.org/species/tree_study/.

US Forest Products Laboratory (1999). *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, United States of America.

USDA (1980). *Tropical Timbers of the World*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

US DAFS (2007). US Department of Agriculture Forest Service (November, 2007) http://www2.fpl.fs.fed.us/Techsheets/Chudnoff/African/new_html_docs/entand3new.html

Valle D, Phillips P, Vidal E, Schulze M, Grogan J, Sales M, Gardingen P (2007). Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia Brazil. *Forest Ecology and Management* 243: 187–198.

Van Gardingen PR, McLeish MJ, Phillips PD, Fadilah D, Tyrie G, Yasman I (2003). Financial and ecological analysis of management options for logged-over Dipterocarp forests in Indonesian Borneo. *Forest Ecology and Management* 183: 1–29.

Van Gardingen PR, Valle D, Thompson I (2006). Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajos National Forest Brazil. *Forest Ecology and Management* 231: 184–195.

Van Kooten GC, Nelson HW, Vertinsky I (2005). Certification of sustainable forest management practices: A global perspective on why countries certify. *Forest Policy Econ.* 7(6):857–867.

Velleman P, Hoaglin D (1981). *The ABC's of EDA: Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*. Duxbury Press, Boston.

Vieira S, Trumbore S, Camargo PB, Selhorst D, Chambers JQ, Higuchi N, Martinelli LA (2005). Slow growth rates of Amazonian trees: Consequences for carbon cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102: 18502–18507.

Weibull W (1939) A statistical theory of the strength of materials, *Royal Swedish Institute for Engineering Research*. In: *Proceedings N.* 141:45

Westoby J (1987). *The purpose of forests: follies of development*. Oxford, UK, Basil Blackwell Inc.

Westoby J (1989). *Introduction to world forestry*. Oxford, UK, Basil Blackwell Inc.

Wong TM (1982). *A Dictionary of Malaysian Timbers*. Malayan Forest Records No. 30. Forest Department, Kuala Lumpur.

World Commission on Environment and Development (1987). *Our common future*. Oxford, UK, Oxford University Press.

Wu Y, Wang S, Xing CZ, Zhang Y (2009). Use of nanoindentation and silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species. *Wood Fiber Sci.*, 41(1): 64-73.

www1 - <https://www2.palomar.edu/users/warmstrong/>, acessado em 2 de outubro de 2017.

www2 - <https://rainforests.mongabay.com/0102.htm>. Acessado em 20 de março de 2016.

www3 - <http://www.blueplanetbiomes.org/rainforest.htm>. Acessado em 12 de março de 2017.

www4 - www.greenpeace.com, acessado em 10 de março de 2016.

- www5 – “Rainforests.net – Variables and Math”,
https://pt.wikipedia.org/wiki/Floresta_tropical_e_subtropical_h%C3%BAmida#cite_note-MI-7,
acedido a 10 de outubro de 2017.
- www6 -
http://wwf.panda.org/about_our_earth/deforestation/importance_forests/tropical_rainforest/,
acedido em 10 de outubro de 2017.
- www7 - <https://kids.mongabay.com/elementary/africa.html>, acedido em 15 de maio de 2017.
- www8 - https://wikivisually.com/wiki/List_of_conservation_issues, acedido em 3 de setembro de 2016.
- www9 - <http://www.icnf.pt/portal/naturaclas/ei/cites>. Acedido em 5 de abril de 2016.
- www10 - <http://www.euflegt.efi.int/republic-congo>. Acedido em 20 de abril de 2016.
- www11 -
[https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Milicia+excelsa+\(Welw.\)+C.C.Berg](https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Milicia+excelsa+(Welw.)+C.C.Berg),
acedido a 20 de outubro de 2017.
- www12 - https://en.wikipedia.org/wiki/Milicia_excelsa#/media/File:Milicia_roadside_small.jpg,
acedido a 20 de outubro de 2017.
- www13 - <http://www.wooddomain.com/trees/iroko-tree>, acedido a 20 de outubro de 2017.
- www14 - <http://www.alamy.com/stock-photo-trunk-of-african-mahogany-sapele-tree-in-the-rainforest-the-republic-7344196.html>, acedido em 15 de outubro de 2017.
- www15 - <http://www.flooringhardwood.com/html/sapelli.html>, acedido em 15 de outubro de 2017.
- Yasman I (1998). *Improving Silvicultural Techniques for Sustainable Forest Management in Indonesia*. Tropenbos.
- Zelazowski P, Malhi Y, Huntingford C, Sitch S, Fisher JB (2011) Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. *Phil. Trans. R. Soc. A* 369, 137 – 160.

Zhang Q, Justice CO, Jiang M, Brunner J, Wilkie DS (2006). A GIS-based assessment on the vulnerability and future extent of the tropical forests of the Congo Basin. *Environmental Monitoring and Assessment* 114: 107–121.

Zimmerman BL, Kormos CF (2012). Prospects for sustainable logging in tropical forests. *BioScience*, 62(5): 479–487.

Zombori B (2000). *In situ non-destructive testing of built in wooden members*. NDT.net – Março 2001, Vol. 6, No. 03.

ANEXO A

**ANEXOS CONSTANTES DO REGULAMENTO DOS
PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO –
REGULAMENTO (UE) N.º 305/2011**

—

A.1 - Requisitos básicos das obras de construção

As obras de construção devem, no seu todo e nas partes separadas de que se compõem, estar aptas para o uso a que se destinam, tendo em conta, nomeadamente, a saúde e a segurança das pessoas nelas envolvidas durante todo o ciclo de vida da obra. As obras de construção devem satisfazer, em condições normais de manutenção, os requisitos básicos das obras de construção durante um período de vida útil economicamente razoável.

1. Resistência mecânica e estabilidade

As obras de construção devem ser concebidas e construídas de modo a que as acções a que possam estar sujeitas durante a construção e a utilização não causem:

- a) Desabamento total ou parcial da obra;
- b) Deformações importantes que atinjam um grau inadmissível;
- c) Danos em outras partes da obra de construção ou das instalações ou do equipamento instalado como resultado de deformações importantes das estruturas de suporte de carga;
- d) Danos desproporcionados relativamente ao facto que lhes deu origem.

2. Segurança contra incêndio

As obras de construção devem ser concebidas e realizadas de modo a que, no caso de se declarar um incêndio:

- a) A capacidade das estruturas de suporte de carga possa ser garantida durante um período determinado;
- b) A deflagração e a propagação do fogo e do fumo dentro da obra de construção sejam limitadas;
- c) A propagação do fogo às construções adjacentes seja limitada;
- d) Os ocupantes possam abandonar a obra de construção ou ser salvos por outros meios;
- e) A segurança das equipas de socorro seja contemplada.

3. Higiene, saúde e ambiente

As obras de construção devem ser concebidas e realizadas de modo a não causarem, durante o seu ciclo de vida, danos à higiene, à saúde e à segurança dos trabalhadores, dos ocupantes e dos vizinhos, e a não exercerem um impacto excessivamente importante, durante todo o seu ciclo de vida, na qualidade ambiental nem no clima durante a sua construção, utilização ou demolição, em consequência, nomeadamente, de:

- a) Libertação de gases tóxicos;
- b) Emissão de substâncias perigosas, de compostos orgânicos voláteis (COV), de gases com efeito de estufa ou de partículas perigosas para o ar interior ou exterior;
- c) Emissão de radiações perigosas;
- d) Libertação de substâncias perigosas em águas subterrâneas, em águas marinhas, em águas superficiais ou no solo;
- e) Libertação de substâncias perigosas na água potável ou de substâncias que tenham qualquer outro efeito negativo na água potável;
- f) Descarga deficiente de águas residuais, emissão de efluentes gasosos ou eliminação deficiente de resíduos sólidos ou líquidos;
- g) Humidade em partes ou em superfícies da obra de construção.

4. Segurança e acessibilidade na utilização

As obras de construção devem ser concebidas e realizadas de modo a não apresentarem riscos inaceitáveis de acidentes ou danos durante a sua utilização e funcionamento, como, por exemplo, riscos de escorregamento, queda, colisão, queimadura, electrocussão e lesões provocadas por explosão e roubo. Em especial, as obras de construção devem ser concebidas e realizadas tendo em conta a acessibilidade e a utilização por pessoas com deficiência.

5. Protecção contra o ruído

As obras de construção devem ser concebidas e realizadas de modo a que o ruído captado pelos ocupantes ou pelas pessoas próximas se mantenha a um nível que não prejudique a sua saúde e lhes permita dormir, descansar e trabalhar em condições satisfatórias.

6. Economia de energia e isolamento térmico

As obras de construção e as suas instalações de aquecimento, arrefecimento, iluminação e ventilação devem ser concebidas e realizadas de modo a que a quantidade de energia necessária para a sua utilização seja baixa, tendo em conta os ocupantes e as condições climáticas do local. As obras de construção devem também ser eficientes em termos energéticos e utilizar o mínimo de energia possível durante a construção e desmontagem.

7. Utilização sustentável dos recursos naturais

As obras de construção devem ser concebidas, realizadas e demolidas de modo a garantir uma utilização sustentável dos recursos naturais e, em particular, a assegurar:

- a) A reutilização ou a reciclabilidade das obras de construção, dos seus materiais e das suas partes após a demolição;
- b) A durabilidade das obras de construção;
- c) A utilização, nas obras de construção, de matérias-primas e materiais secundários compatíveis com o ambiente.

A.2 - Procedimento de aprovação do Documento de Avaliação Europeu

1. Pedido de Avaliação Técnica Europeia

Quando um fabricante apresenta um pedido de Avaliação Técnica Europeia ao OAT responsável por um produto da construção, e após o fabricante e o OAT (a seguir designado por «OAT responsável») terem assinado um acordo de sigilo e confidencialidade comercial, salvo decisão em contrário do fabricante, este apresenta ao OAT responsável um dossiê técnico com a descrição do produto, a sua utilização prevista pelo fabricante e informações pormenorizadas sobre o controlo de produção em fábrica que tenciona aplicar.

2. Contrato

Para os produtos de construção referidos na alínea c) do n.º 1 do artigo 21.º é celebrado, no prazo de um mês a contar da recepção do dossiê técnico, um contrato entre o fabricante e o OAT responsável pela elaboração da Avaliação Técnica Europeia que define o programa de trabalho para a elaboração do Documento de Avaliação Europeu, incluindo:

- a organização do trabalho no âmbito da organização dos OAT,
- a composição do grupo de trabalho a criar no âmbito da organização dos OAT, encarregado da gama de produtos em questão,
- a coordenação dos OAT.

3. Programa de trabalho

Após a celebração do contrato com o fabricante, a organização dos OAT deve informar a Comissão sobre o programa de trabalho para a elaboração do Documento de Avaliação Europeu e sobre o calendário previsto para a sua execução, e fornecer indicações sobre o programa de avaliação. Esta comunicação tem lugar no prazo de três meses a contar da recepção do pedido de Avaliação Técnica Europeia.

4. Projecto de Documento de Avaliação Europeu

A organização dos OAT ultima um projecto de Documento de Avaliação Europeu através do grupo de trabalho coordenado pelo OAT responsável e transmite-o às partes interessadas no prazo de seis meses a contar da data em que a Comissão foi informada sobre o programa de trabalho.

5. Participação da Comissão

Um representante da Comissão pode participar, como observador, em todas as fases de execução do programa de trabalho.

6. Prorrogação e atrasos

Qualquer atraso em relação aos prazos previstos nas secções 1 a 4 do presente anexo é comunicado pelo grupo de trabalho à organização dos OAT e à Comissão.

Se se justificar uma prorrogação do prazo para a elaboração do Documento de Avaliação Europeu, nomeadamente devido à falta de uma decisão da Comissão sobre o sistema aplicável de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção ou devido à necessidade de elaborar um novo método de ensaio, a Comissão prorroga esse prazo.

7. Alterações e aprovação de um Documento de Avaliação Europeu

O OAT responsável comunica o projecto de Documento de Avaliação Europeu ao fabricante, que dispõe de quinze dias úteis para apresentar os seus comentários. Após esse prazo, a organização dos OAT deve:

- a) Se for caso disso, informar o fabricante do modo como os seus comentários foram tomados em consideração;
- b) Aprovar o projecto de Documento de Avaliação Europeu; e
- c) Enviar uma cópia à Comissão.

Se, no prazo de quinze dias úteis a contar da recepção, a Comissão comunicar as suas observações sobre o projecto de Documento de Avaliação Europeu à organização dos OAT, esta, após ter tido a oportunidade de apresentar os seus comentários, procede à alteração do projecto no mesmo sentido e envia uma cópia do Documento de Avaliação Europeu aprovado ao fabricante e à Comissão.

8. Versão final do Documento de Avaliação Europeu a publicar

Logo que a primeira Avaliação Técnica Europeia tenha sido emitida pelo OAT responsável com base no Documento de Avaliação Europeu aprovado, esse Documento de Avaliação Europeu é ajustado, se necessário, com base na experiência adquirida. A organização dos OAT aprova o Documento de Avaliação Europeu final e envia uma cópia à Comissão, juntamente com uma tradução do seu título em todas as línguas oficiais da União, para publicação da respectiva referência. A organização dos OAT deve tornar o Documento de Avaliação Europeu disponível por via electrónica assim que a marcação CE tiver sido aposta no produto.

A.3 - Declaração de Desempenho

N.º

1. Código de identificação único do produto-tipo:
2. Número do tipo, do lote ou da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do n.º 4 do artigo 11.º:
.....
3. Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:
.....
.....
4. Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do n.º 5 do artigo 11.º:
.....
.....
5. Se aplicável, nome e endereço de contacto do mandatário cujo mandato abrange os actos especificados no n.º 2 do artigo 12.º:
.....
.....
6. Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:
.....
.....
7. No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:
.....
(nome e número de identificação do organismo notificado, se pertinente)
realizouno âmbito do sistema
(descrição das tarefas efectuadas enquanto terceiros referidas no anexo V)
e emitiu
(certificado de regularidade do desempenho, certificado de conformidade do controlo de produção em fábrica, relatórios de ensaios/cálculos – conforme o caso)
8. No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção para o qual tenha sido emitida uma Avaliação Técnica Europeia:
.....
(nome e número de identificação do organismo de avaliação técnica, se pertinente)
emitiu
(número de referência da Avaliação Técnica Europeia)
com base em
(número de referência do documento de avaliação europeia)

realizouno âmbito do sistema
(descrição das tarefas efectuadas enquanto terceiros referidas no anexo V)

e emitiu
(certificado de regularidade do desempenho, certificado de conformidade do controlo de produção em fábrica, relatórios de ensaios/cálculos – conforme o caso)

9. Desempenho declarado

Notas ao quadro:

1. A coluna 1 deve conter a lista das características essenciais tal como determinadas nas especificações técnicas harmonizadas para a utilização ou utilizações previstas indicadas no ponto 3.

2. Para cada característica essencial constante da coluna 1 e de acordo com os requisitos do artigo 6.º, a coluna 2 deve indicar o desempenho declarado, expresso por nível ou classe, ou por meio de uma descrição correspondente às características essenciais respectivas. As letras NPD (Desempenho Não Determinado) são indicadas se não for declarado nenhum desempenho.

3. Para cada característica essencial constante da coluna 1, a coluna 3 deve conter:

a) A referência datada da norma harmonizada correspondente e, se pertinente, o número de referência da documentação técnica específica ou adequada utilizada;

ou

b) A referência datada do documento de avaliação europeia correspondente, se disponível, e o número de referência da Avaliação Técnica Europeia utilizada.

Características essenciais (ver nota 1)	Desempenho (ver nota 2)	Especificações técnicas harmonizadas (ver nota 3)

Quando, nos termos do artigo 37.º ou do artigo 38.º, tenha sido utilizada documentação técnica específica, os requisitos a que o produto obedece:

.....
.....

10. O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 9.

A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Assinado por e em nome do fabricante por:

.....
(nome e cargo)

.....
(local e data de emissão) (assinatura)

A.4 - Gamas de produtos e requisitos aplicáveis aos OAT

Quadro 1 — Gamas de produtos

CÓDIGO DA ZONA	GAMA DE PRODUTOS
1	PRODUTOS PREFABRICADOS DE BETÃO NORMAL, BETÃO LEVE E BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO
2	PORTAS, JANELAS, PORTADAS, PORTÕES E RESPECTIVAS FERRAGENS
3	MEMBRANAS, INCLUINDO NA FORMA LÍQUIDA, E KITS (PARA CONTROLO DA ÁGUA E/OU DO VAPOR DE ÁGUA)
4	PRODUTOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO KITS/SISTEMAS DE ISOLAMENTO COMPÓSITOS
5	APARELHOS DE APOIO PERNOS PARA JUNTAS ESTRUTURAIS
6	CHAMINÉS, CONDUTAS DE EXAUSTÃO E PRODUTOS ESPECÍFICOS
7	PRODUTOS À BASE DE GESSO
8	GEOTÊXTEIS, GEOMEMBRANAS E PRODUTOS RELACIONADOS
9	FACHADAS – CORTINA/REVESTIMENTOS DESCONTÍNUOS DE FACHADA/SISTEMAS DE VIDROS EXTERIORES COLADOS
10	EQUIPAMENTO FIXO DE COMBATE A INCÊNDIO (ALARME DE INCÊNDIO, DETECÇÃO DE INCÊNDIOS, SISTEMAS FIXOS DE COMBATE A INCÊNDIOS, CONTROLO DE FUMO E INCÊNDIOS E PRODUTOS ANTIEXPLOÇÃO)
11	APARELHOS SANITÁRIOS
12	DISPOSITIVOS DE CIRCULAÇÃO RODOVIÁRIA/EQUIPAMENTO RODOVIÁRIO
13	PRODUTOS E ELEMENTOS DE MADEIRA PARA ESTRUTURAS E PRODUTOS CONEXOS
14	PLACAS E ELEMENTOS DE DERIVADOS DE MADEIRA
15	CIMENTOS, CAIS DE CONSTRUÇÃO E OUTROS LIGANTES HIDRÁULICOS
16	ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO (E PRODUTOS CONEXOS) KITS/SISTEMAS DE PÓS-TENSÃO PARA PRÉ-ESFORÇO DE ESTRUTURAS
17	ALVENARIA E PRODUTOS ASSOCIADOS BLOCOS DE ALVENARIA, ARGAMASSAS, PRODUTOS CONEXOS
18	SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS
19	REVESTIMENTOS DE PISO
20	PRODUTOS METÁLICOS PARA ESTRUTURAS E PRODUTOS CONEXOS
21	ACABAMENTOS INTERIORES E EXTERIORES PARA PAREDES E TECTOS KITS PARA DIVISÓRIAS
22	REVESTIMENTOS DE COBERTURAS, CLARABÓIAS, JANELAS DE SÓTÃO E PRODUTOS CONEXOS KITS PARA COBERTURAS
23	PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA
24	AGREGADOS
25	COLAS PARA CONSTRUÇÃO

CÓDIGO DA ZONA	GAMA DE PRODUTOS
26	PRODUTOS RELATIVOS A BETÃO, ARGAMASSAS E CALDAS DE INJEÇÃO
27	APARELHOS PARA AQUECIMENTO AMBIENTE
28	TUBOS, RESERVATÓRIOS E ACESSÓRIOS NÃO DESTINADOS A ENTRAR EM CONTACTO COM ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
29	PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO DESTINADOS A ENTRAR EM CONTACTO COM: ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
30	PRODUTOS DE VIDRO PLANO, VIDRO PERFILADO E BLOCOS DE ALVENARIA DE VIDRO
31	CABOS ELÉTRICOS, DE COMANDO E PARA COMUNICAÇÕES
32	VEDANTES PARA JUNTAS
33	FIXAÇÕES
34	KITS, UNIDADES MODULARES E ELEMENTOS PREFABRICADOS PARA CONSTRUÇÃO
35	PRODUTOS CORTA-FOGO, PRODUTOS DE VEDAÇÃO ANTIFOGO E PRODUTOS DE PROTECÇÃO CONTRA O FOGO PRODUTOS IGNÍFUGOS

Quadro 2 — Requisitos aplicáveis aos OAT

Competência	Descrição da competência	Requisitos
1. Análise de riscos	Identificar os possíveis riscos e benefícios decorrentes da utilização de produtos de construção inovadores quando não existe informação técnica estabelecida/consolidada sobre o seu desempenho, uma vez instalados em obras de construção.	Os OAT devem estar constituídos nos termos do direito nacional e ser dotados de personalidade jurídica. Os OAT devem ser independentes das partes envolvidas e dos interesses particulares em jogo. Além disso, o pessoal dos OAT deve ser dotado de:
2. Fixação de critérios técnicos	Transformar o resultado da análise de risco em critérios técnicos para avaliar o comportamento e o desempenho de produtos de construção no tocante ao cumprimento das regras nacionais aplicáveis; Facultar a informação técnica necessária aos participantes no processo de construção enquanto utilizadores potenciais de produtos de construção (fabricantes, projectistas, empreiteiros, instaladores).	a) Objectividade e sólida capacidade de julgamento técnico; b) Conhecimentos pormenorizados das disposições normativas e outros requisitos em vigor no Estado-Membro em que o OAT é designado, no tocante às gamas de produtos para os quais o OAT for designado; c) Compreensão generalizada das práticas de construção e conhecimentos técnicos aprofundados sobre as gamas de produtos para os quais o OAT for designado;
3. Fixação de métodos de avaliação	Conceber e validar métodos adequados (ensaios ou cálculos) para avaliar o desempenho em função das características essenciais dos produtos de construção, tendo em conta o progresso técnico.	d) Conhecimento aprofundado dos riscos específicos envolvidos e dos aspectos técnicos do processo de construção; e) Conhecimento aprofundado das normas harmonizadas existentes e dos métodos de ensaio no tocante às gamas de produtos para os quais o OAT for designado; f) Competências linguísticas adequadas. A remuneração do pessoal dos OAT não deve depender do número de avaliações realizadas nem do resultado das mesmas.

Competência	Descrição da competência	Requisitos
4. Determinação do controlo de produção em fábrica	Compreender e avaliar o processo de fabrico do produto específico para poder identificar as medidas mais adequadas de maneira a garantir a regularidade do produto ao longo de todo o processo de fabrico.	O pessoal dos OAT deve ter conhecimento adequado da relação entre os processos de fabrico e as características do produto relacionadas com o controlo de produção em fábrica.
5. Avaliação do produto	Avaliar o desempenho em função das características essenciais dos produtos de construção com base em métodos harmonizados de verificação do cumprimento de critérios harmonizados.	Além dos requisitos constantes dos pontos 1, 2 e 3, os OAT devem ter acesso aos meios e ao equipamento necessários para avaliar o desempenho em função das características essenciais dos produtos de construção dentro da gama de produtos para os quais forem designados.
6. Gestão geral	Garantir a coerência, a fiabilidade, a objectividade e a rastreabilidade através da aplicação regular de métodos de gestão adequados.	Os OAT devem: <ul style="list-style-type: none"> a) Comprovadamente, respeitar as boas práticas administrativas; b) Seguir uma política e os correspondentes procedimentos de garantia de confidencialidade das informações sensíveis que detêm, juntamente com todos os seus parceiros; c) Ser dotados de um sistema de controlo documental para garantir o registo, a rastreabilidade, a manutenção e o arquivo de todos os documentos relevantes; d) Aplicar um mecanismo de auditoria interna e de fiscalização da gestão para garantir o controlo regular do cumprimento dos métodos de gestão adequados; e) Tratar objectivamente recursos e reclamações.

A.5 - Avaliação e verificação da regularidade do desempenho

1. SISTEMAS DE AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DO DESEMPENHO
- 1.1. Sistema 1+ – Declaração de desempenho, em função das características essenciais do produto de construção, elaborada pelo fabricante com base nos seguintes elementos:
 - a) O fabricante realiza:
 - i) o controlo da produção em fábrica;
 - ii) os ensaios adicionais de amostras colhidas na fábrica de acordo com um programa de ensaios previamente estabelecido;
 - b) O organismo de certificação de produtos notificado emite o certificado de regularidade de desempenho do produto, baseando-se:
 - i) na determinação do produto-tipo com base nos ensaios de tipo (incluindo a amostragem), nos cálculos de tipo, nos valores tabelados ou em documentação descritiva do produto;
 - ii) na inspeção inicial da unidade fabril e no controlo da produção em fábrica;
 - iii) no acompanhamento, apreciação e avaliação contínuos do controlo da produção em fábrica;
 - iv) nos ensaios aleatórios de amostras colhidas antes da colocação do produto no mercado.
- 1.2. Sistema 1 – Declaração de desempenho, em função das características essenciais do produto de construção, elaborada pelo fabricante com base nos seguintes elementos:
 - a) O fabricante realiza:
 - i) o controlo da produção em fábrica;
 - ii) os ensaios adicionais de amostras colhidas na fábrica pelo fabricante de acordo com um programa de ensaios previamente estabelecido;
 - b) O organismo de certificação de produtos notificado emite o certificado de regularidade de desempenho do produto, baseando-se:
 - i) na determinação do produto-tipo com base nos ensaios de tipo (incluindo a amostragem), nos cálculos de tipo, nos valores tabelados ou em documentação descritiva do produto;
 - ii) na inspeção inicial da unidade fabril e no controlo da produção em fábrica;
 - iii) no acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica;
- 1.3. Sistema 2+ – Declaração de desempenho, em função das características essenciais do produto de construção, elaborada pelo fabricante com base nos seguintes elementos:
 - a) O fabricante realiza:
 - i) a determinação do produto-tipo com base nos ensaios de tipo (incluindo a amostragem), nos cálculos de tipo, nos valores tabelados ou em documentação descritiva do produto;
 - ii) o controlo da produção em fábrica;
 - iii) os ensaios de amostras colhidas em fábrica de acordo com um programa de ensaios previamente estabelecido;

- b) O organismo de certificação do controlo da produção notificado emite o certificado de conformidade do controlo da produção em fábrica, baseando-se:
 - i) na inspeção inicial da unidade fabril e no controlo da produção em fábrica;
 - ii) no acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica;
- 1.4. Sistema 3 – Declaração de desempenho, em função das características essenciais do produto de construção, elaborada pelo fabricante com base nos seguintes elementos:
- a) O fabricante realiza o controlo da produção em fábrica;
 - b) O laboratório de ensaios notificado determina o produto-tipo com base nos ensaios de tipo (baseados na amostragem realizada pelo fabricante), nos cálculos de tipo, nos valores tabelados ou em documentação descritiva do produto;
- 1.5. Sistema 4 – Declaração de desempenho, em função das características essenciais do produto de construção, elaborada pelo fabricante com base nos seguintes elementos:
- a) O fabricante realiza:
 - i) a determinação do produto-tipo com base nos ensaios de tipo, nos cálculos de tipo, nos valores tabelados ou em documentação descritiva do produto;
 - ii) o controlo da produção em fábrica;
 - b) Não são atribuídas tarefas ao organismo notificado.
2. ORGANISMOS ENVOLVIDOS NA AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DO DESEMPENHO
- No que respeita à função dos organismos notificados envolvidos na avaliação e verificação da regularidade do desempenho dos produtos de construção, devem distinguir-se:
- 1. O organismo de certificação dos produtos: um organismo notificado, governamental ou não, com a competência e a responsabilidade necessárias para proceder à certificação da conformidade de um produto de acordo com as regras processuais e de gestão estabelecidas;
 - 2. O organismo de certificação do controlo da produção em fábrica: um organismo notificado, governamental ou não, com a competência e a responsabilidade necessárias para proceder à certificação do controlo da produção em fábrica de acordo com as regras processuais e de gestão estabelecidas;
 - 3. O laboratório de ensaios notificado: um laboratório notificado, que mede, examina, ensaia, calibra ou determina de qualquer outro modo as características ou o desempenho dos materiais ou dos produtos de construção.
3. CASOS DE CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS EM QUE NÃO É EXIGIDA A REFERÊNCIA A UMA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA HARMONIZADA PERTINENTE
- 1. Reacção ao fogo;
 - 2. Resistência ao fogo;
 - 3. Desempenho relativamente ao fogo no exterior;
 - 4. Absorção sonora;
 - 5. Emissões de substâncias perigosas.
-

ANEXO B

RESUMO DE ESTUDOS SOBRE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS

—

ESTUDO	ABORDAGEM E CONCLUSÕES
Ravenshorst et al. (2010)	<p>Foi estudada a relação entre provetes de pequenas dimensões e de dimensões estruturais, em amostras de Cumaru (<i>Dypterix odorata</i>) com origem no Brasil e no Peru.</p> <p>Para a tensão de rotura em provetes de pequenas dimensões, obtiveram 180 e 183,9 MPa, respetivamente.</p> <p>Para provetes de dimensão estrutural, segundo a EN 408 (CEN, 2012a), obtiveram-se: 113,0 e 79,8 MPa, respetivamente.</p> <p>Segundo a EN 384 (CEN, 2010), estar-se-ia perante espécies semelhantes, porém, observando os resultados em provetes de dimensões estruturais, o valor dos respectivos coeficientes deveriam ser substancialmente diferentes, com implicações óbvias na determinação dos respectivos valores característicos.</p>
Ravenshorst et al. (2004)	<p>Desenvolveram um modelo de caracterização das propriedades mecânicas através da combinação de resultados de ensaios destrutivos e não destrutivos (emissão de ondas de vibração), definindo por população a totalidade das espécies analisadas.</p> <p>Para a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de rotura à flexão obteve-se $r^2=0,63$. Para a correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e o estático à flexão, obteve-se $r^2=0,73$.</p> <p>Propôs-se, então, a combinação de 75% (30 provetes) dos resultados obtidos por ensaios de medição da frequência de vibração natural dos provetes, e 25% (10 provetes) por métodos destrutivos, seguindo o preconizado na norma EN 408 (CEN, 2012a).</p>
Kuilen et al. (2002)	<p>Desenvolveram um modelo de caracterização das propriedades mecânicas que resultasse da combinação de resultados de ensaios destrutivos com não destrutivos, definindo por população a totalidade das espécies analisadas.</p> <p>Obtiveram-se expressões de regressões lineares e logarítmicas. Excluindo da base de dados de cada expressão, os resultados da espécie a caracterizar, obteve-se uma precisão de $\pm 20\%$ para a tensão de rotura à flexão nas diferentes espécies.</p> <p>Da totalidade dos resultados da base de dados (incluindo todas as espécies), resultaram as expressões linear e logarítmica, das quais se obtiveram 0,58 e 0,62 para os respectivos coeficientes de determinação.</p>
Íñiguez et al (2006)	<p>Estudaram a aplicação de métodos não destrutivos, baseados nas técnicas de ultrassom e na análise de vibração para o controlo de qualidade da madeira estrutural de Tali.</p> <p>Foram observadas fortes correlações entre estes procedimentos e o módulo de elasticidade à flexão, obtendo-se coeficientes de determinação da ordem de 0,61 e 0,88, respetivamente.</p> <p>Na correlação com a tensão de rotura à flexão, os coeficientes de determinação revelaram-se bastante inferiores.</p> <p>Este facto, foi atribuído aos defeitos locais por terem maior influência na tensão de rotura do que na qualidade geral do elemento de madeira.</p>

ESTUDO	ABORDAGEM E CONCLUSÕES
Ravenshorst et al (2013)	<p>Voltam a abordar a possibilidade da classificação das madeiras tropicais ser independente da espécie.</p> <p>São atribuídas classes de resistência correlacionando os valores médios obtidos dos ensaios em provetes de pequenas dimensões, com os valores característicos de provetes de dimensões estruturais.</p> <p>Analisa amostras de Cumaru eram provenientes de 3 zonas do Brasil, de uma zona do Peru e outra da Bolívia.</p> <p>Os valores característicos para a tensão de rotura, obtidos através de ensaios em provetes de dimensão estrutural segundo a EN 408 (CEN, 2012a), mostraram a possibilidade de uma amostra proveniente do Brasil ter um valor característico para a tensão de rotura, superior ao dobro da amostra proveniente do Peru.</p> <p>Foram apresentadas 4 possibilidades de justificação:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) diferentes condições de crescimentos das zonas de onde provêm as amostras; 2) a dificuldade em avaliar o ângulo de alinhamento das fibras com o eixo das peças; 3) as próprias espécies de cada amostra de Cumaru; 4) a arbitrariedade na escolha dos provetes de cada amostra. <p>O estudo refere que os resultados demonstram a evidência de que cada amostra acaba por não cobrir as variações naturais de parâmetros tais como a origem, o número de provetes do mesmo género, as condições de crescimento, etc.</p> <p>Procurou-se ainda, estabelecer uma correlação entre a tensão de rotura à flexão obtida através de provetes de pequenas dimensões, com a obtida em provetes de dimensão estrutural.</p> <p>Analizados os dados de cerca de 15 espécies de madeira foi estabelecida uma relação entre o valor médio da resistência à flexão de provetes de pequenas dimensões, com o valor característico de provetes de dimensões estruturais.</p> <p>Numa segunda fase, o estudo foi estendido a amostras de provetes de pequenas dimensões extraídos de provetes de dimensões estruturais. Procurou-se investigar a relação básica com os provetes de pequenas dimensões, para prever a tensão de rotura de provetes de dimensões estruturais, das mesmas amostras.</p> <p>O estudo propõe uma linha de correlação $Y = 0,30X$, dado que, haveria apenas um ponto para o qual o valor correspondente ao percentil de 5% de uma amostra ficaria abaixo.</p> <p>Relativamente à classificação por máquina, o estudo conclui que o uso de provetes de pequenas dimensões para prever os valores característicos, implicaria o uso de factores de segurança com substancial redução das capacidades resistentes, uma vez que a diferenciação entre as amostras através de provetes de pequenas dimensões, não acontece.</p> <p>Para a previsão das tensões de rotura através do módulo de elasticidade dinâmico, conclui-se ser possível obter valores de elevada precisão, capazes de estimar o valor de cada elemento individual, tornando-se desnecessária a atribuição de uma Classe de Resistência para a espécie.</p>

ESTUDO	ABORDAGEM E CONCLUSÕES
Mvogo et al (2011)	<p>Procurou dividir a classificação das espécies tropicais por 4 grupos, baseando-se em ensaios de análise das frequências de vibração naturais transversais das madeiras.</p> <p>Comparando os resultados do módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade à flexão estático, determinado a partir de ensaios à flexão em 4 pontos, observou-se que os segundos eram em média, 6% superiores.</p> <p>Relativamente à correlação entre o módulo de elasticidade dinâmica com a massa volúmica, a tensão de rotura e o módulo de elasticidade à flexão, para o coeficiente de determinação, obtiveram-se os valores de 0,79, 0,76 e 0,89, respectivamente.</p>
Jamil et al. (2013)	<p>Estudou-se a relação entre resultados obtidas em provetes de dimensão estrutural, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012a), e os obtidos em provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos, ensaiados de forma similar ao previsto na norma BS 373 (1957).</p> <p>De uma forma geral, o valor obtido para a tensão de rotura à flexão nos provetes de dimensão estrutural foram inferiores aos de pequenas dimensões, sendo que numa análise à totalidade dos resultados das diferentes espécies, não se conseguiu observar uma tendência clara de correlação obtendo-se 0,4 para o coeficiente de determinação.</p> <p>Realizada uma inspeção visual aos provetes de dimensão estrutural de Keruing, constatou-se uma diminuta presença de defeitos. Corroborando a justificação apresentada pelos autores, constatou-se um coeficiente de determinação de 0,72 entre as duas escalas de provetes, para a mesma propriedade mecânica.</p> <p>Para o módulo de elasticidade à flexão, as correlações mostraram-se consistentes, mesmo quando se misturaram os resultados das diferentes espécies analisadas, obtendo-se o valor de 0,64 para o coeficiente de determinação entre os provetes de dimensões estruturais e provetes de pequenas dimensões.</p>
Alik et al. (2006)	<p>Para condições de madeira verde e de madeira seca ao ar.</p> <p>Correlacionaram-se provetes de pequenas dimensões isentos de defeitos com provetes de dimensão estrutural.</p> <p>Apresentaram-se resultados de 0,56 e 0,55, respectivamente, para o coeficiente de determinação, na análise da correlação para valores da tensão de rotura à flexão entre provetes de dimensão estrutural e de pequenas dimensões, para a espécie de <i>Dryobalanops</i>.</p> <p>O estudo, também atribuiu à existência de defeitos nos provetes de dimensão estrutural, a principal causa do desfasamento de resultados.</p>
Ahmad et al. (2010)	<p>Demonstrou que a média do módulo de elasticidade à flexão em provetes de dimensão estrutural para a espécie de madeira de Kedondong, eram superiores à média obtida para provetes de pequenas dimensões.</p>

ESTUDO	ABORDAGEM E CONCLUSÕES
Lanvin et al. (2009)	<p>Comparou os resultados obtidos em provetes de pequenas dimensões com os obtidos em provetes de dimensões estruturais.</p> <p>Obteve a expressão $Y=0,35X$, sendo Y equivalente a 90% do valor característico da tensão de rotura à flexão obtido nos ensaios em provetes de dimensão estrutural, e X o valor obtido da tensão de rotura à flexão dos provetes de pequenas dimensões.</p> <p>O estudo relata, que, pelo lado da segurança se poderia assumir, para os provetes de dimensão estrutural, o valor do módulo de elasticidade obtido a partir dos provetes de pequenas dimensões.</p>
Hugh (2010)	<p>Propõe que o módulo de elasticidade possa ser determinado a partir de provetes de pequenas dimensões sem qualquer correção de valores.</p>
Arriaga et al. (2006)	<p>Analizou a norma BS 5756 (2007), quanto aos limites definidos na medição e quantificação dos defeitos visuais e respectiva atribuição da Classe de Resistência.</p> <p>De uma forma geral, concluiu-se que a classificação visual com as novas limitações permitiu atribuir a mesma classe de resistência para a espécie de Tali, D50, com uma reprovação de provetes extremamente inferior.</p>
Bucur et al. (1984)	<p>Verificou boas correlações entre a velocidade do ultrassom e o módulo de elasticidade à flexão, atingindo valores para o coeficiente de determinação de 0,74, em provetes com secção de 200x250 mm².</p> <p>Relativamente à correlação da velocidade com a tensão de rotura, verificou-se uma ausência de correlação, variando r^2 entre 0,07 e 0,12 entre as dimensões dos diferentes provetes.</p> <p>Curiosa foi ainda a correlação estabelecida entre a velocidade do ultrassom e a variação do comprimento dos provetes, situando-se num r^2 de 0,78.</p> <p>O estudo afirma concluir-se que o método de ultrassons poderia ser utilizada como um parâmetro adicional para a classificação da qualidade da elasticidade da peça.</p>
Kuilen et al. (2007)	<p>Foram estudadas mais de 30 espécies, em mais de 1500 vigas, determinando-se as amplitudes de resistência, rigidez e massas volúmicas através de procedimentos destrutivos e não-destrutivos.</p> <p>Foram utilizadas técnicas de inspeção visual e foram determinados os módulos de elasticidade dinâmicos baseado na medição das frequências naturais de vibração das madeiras.</p> <p>Para os elementos de dimensões estruturais foi seguida a EN 408 (CEN, 2012a).</p> <p>O conjunto das espécies analisadas foi considerado como sendo uma população única a caracterizar.</p> <p>Uma vez que a optimização do rendimento das madeiras de folhosas através da inspeção visual é dificilmente atingível, concluiu-se que os procedimentos não destrutivos em madeiras de folhosas permitem obter classes de resistência mais elevadas, melhorando o rendimento das madeiras.</p>

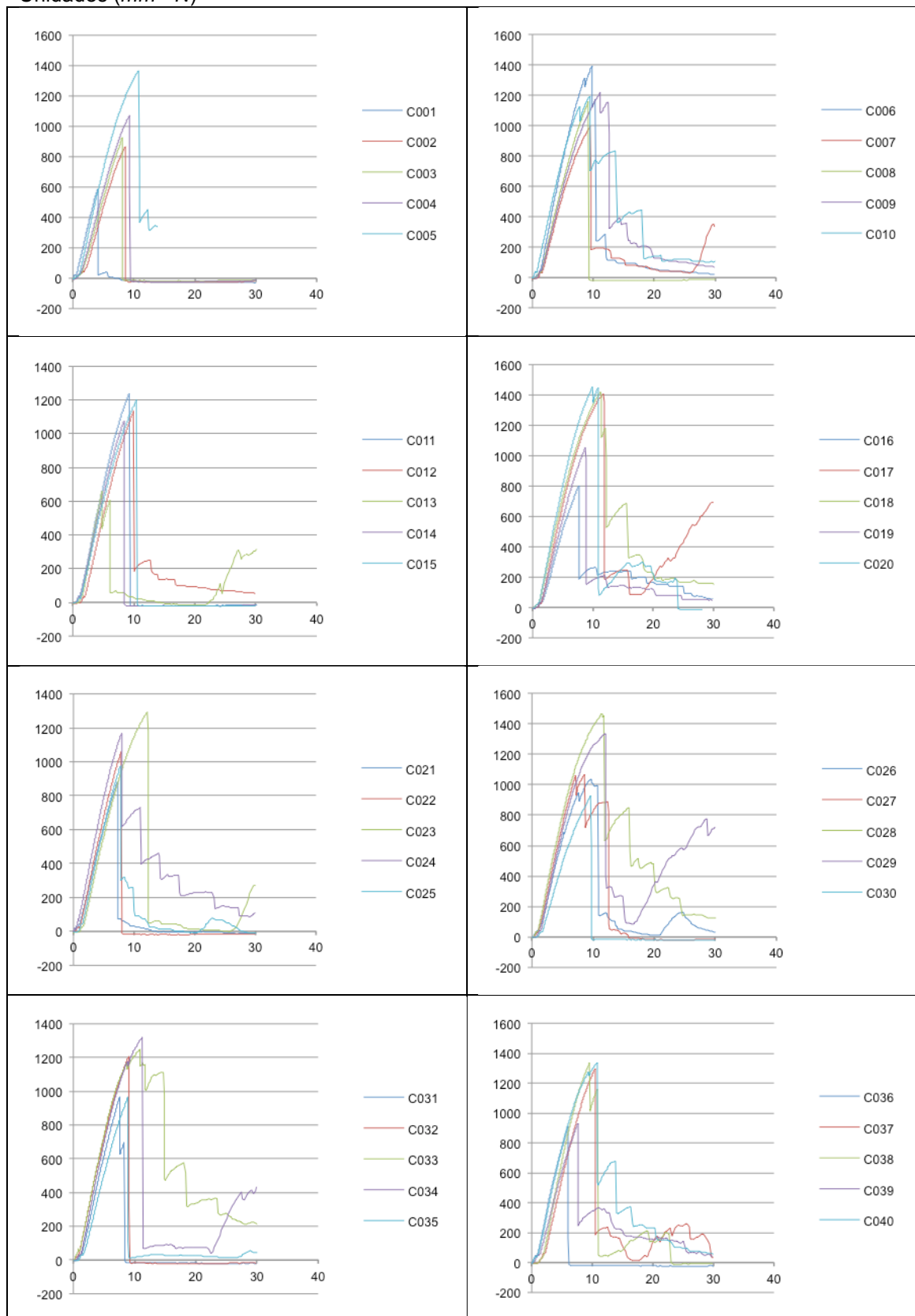
ANEXO C

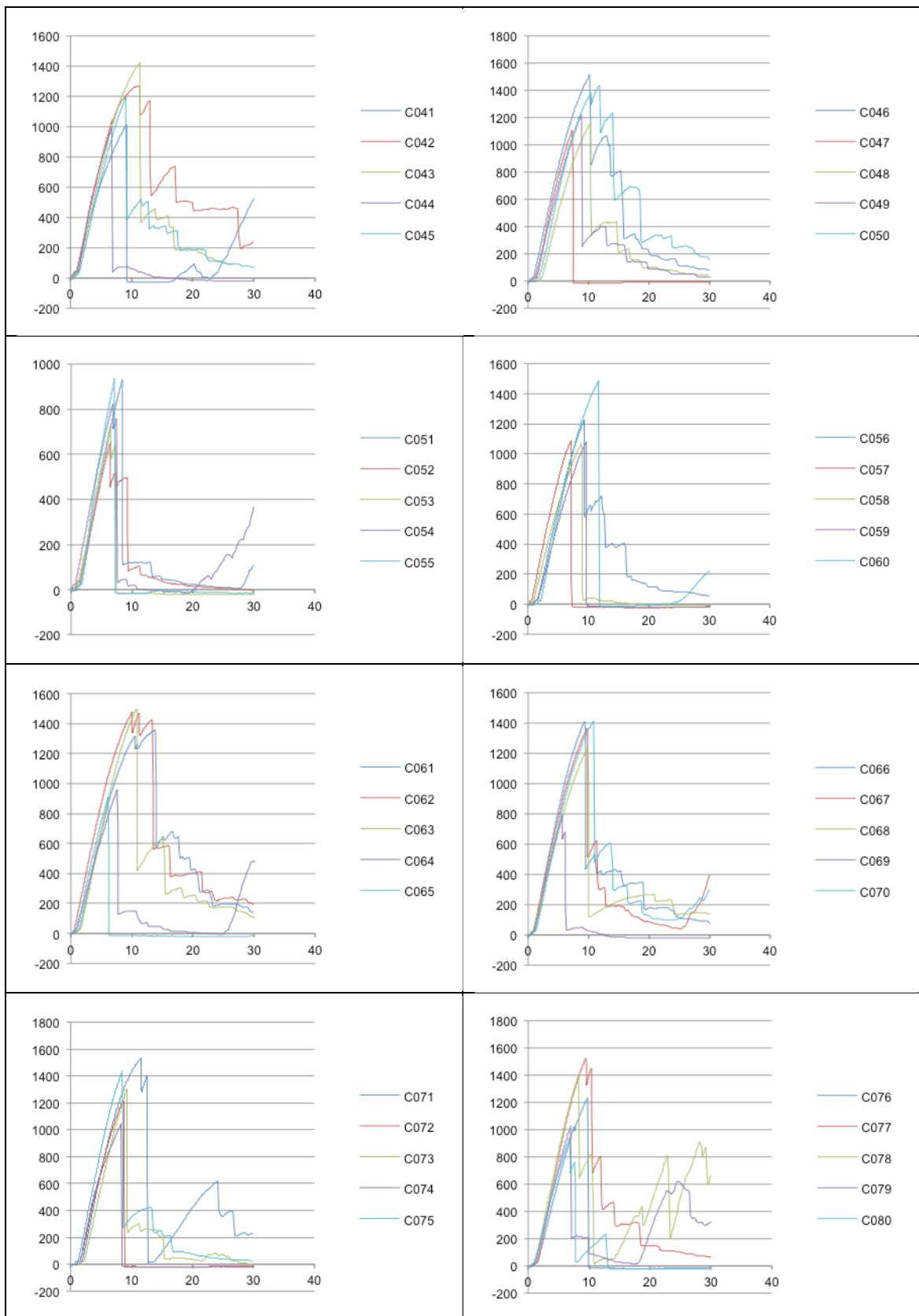
**RESULTADOS GRÁFICOS DOS ENSAIOS EM
PROVETES DE PEQUENAS DIMENSÕES, ISENTOS DE
DEFEITOS, SUJEITOS À FLEXÃO ESTÁTICA EM 3
PONTOS – CAPÍTULO 4**

—

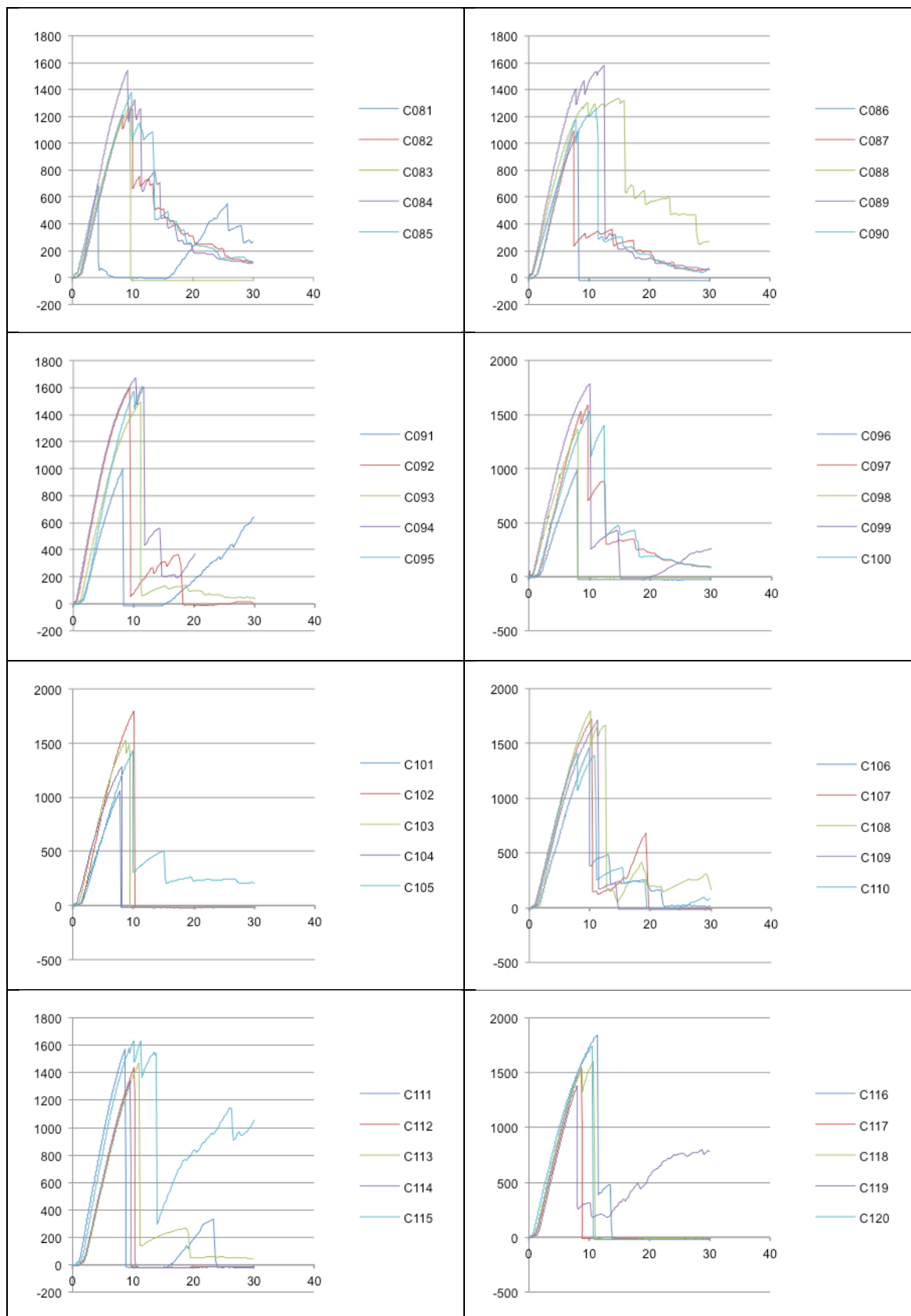
C.1 – Provetes de Câmbala

Unidades (mm - N)

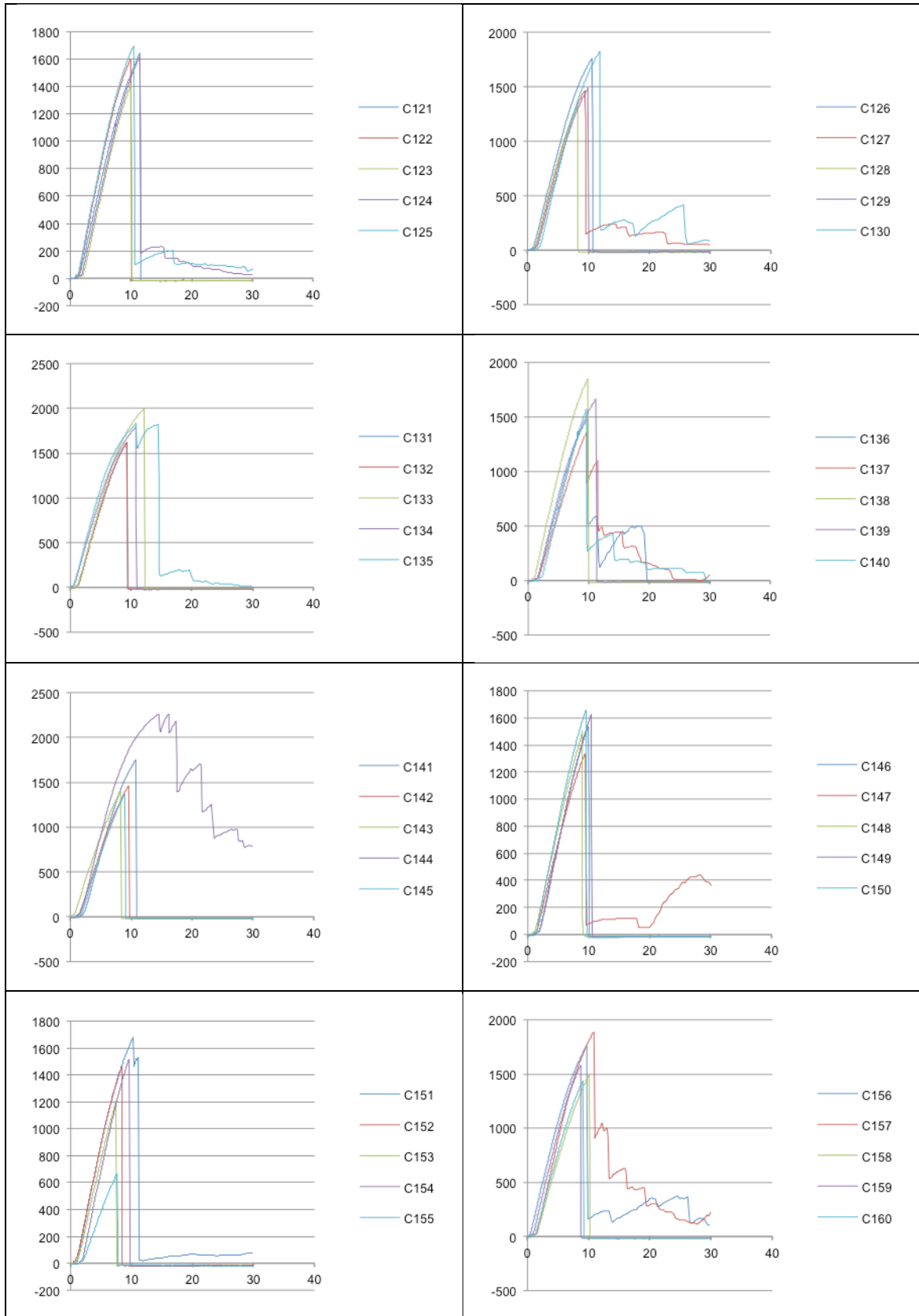




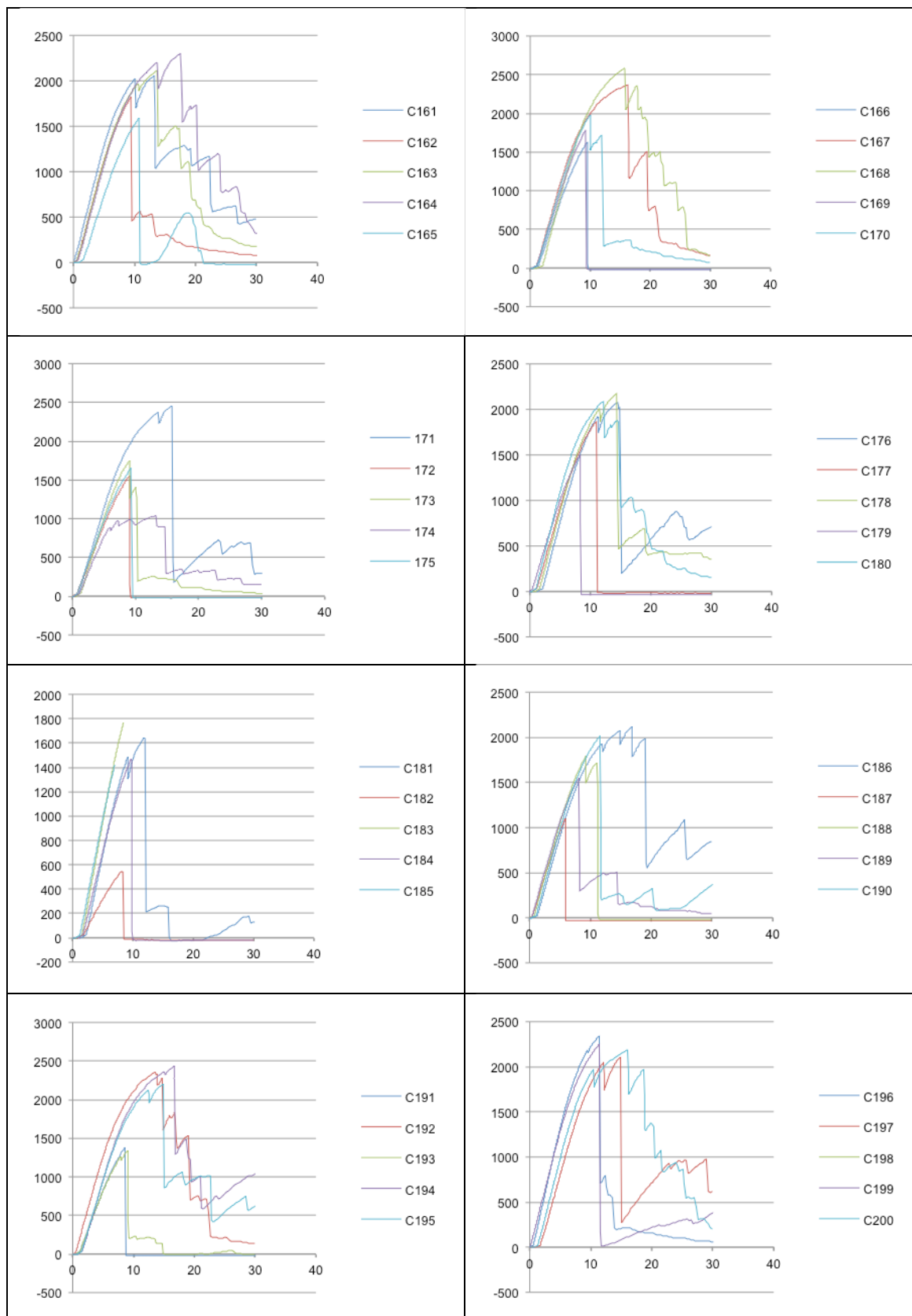
Unidades (mm - N)



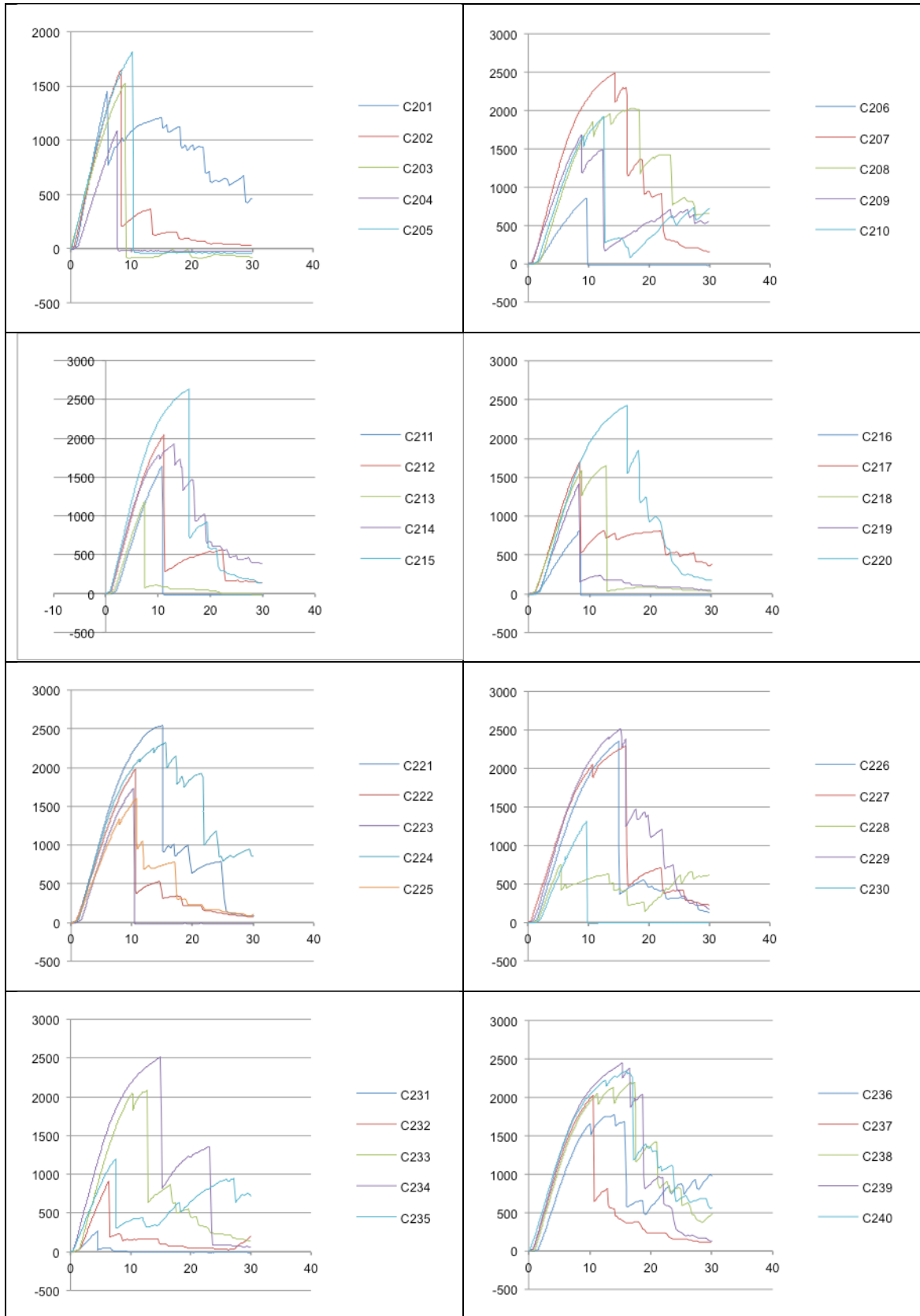
Unidades (mm - N)



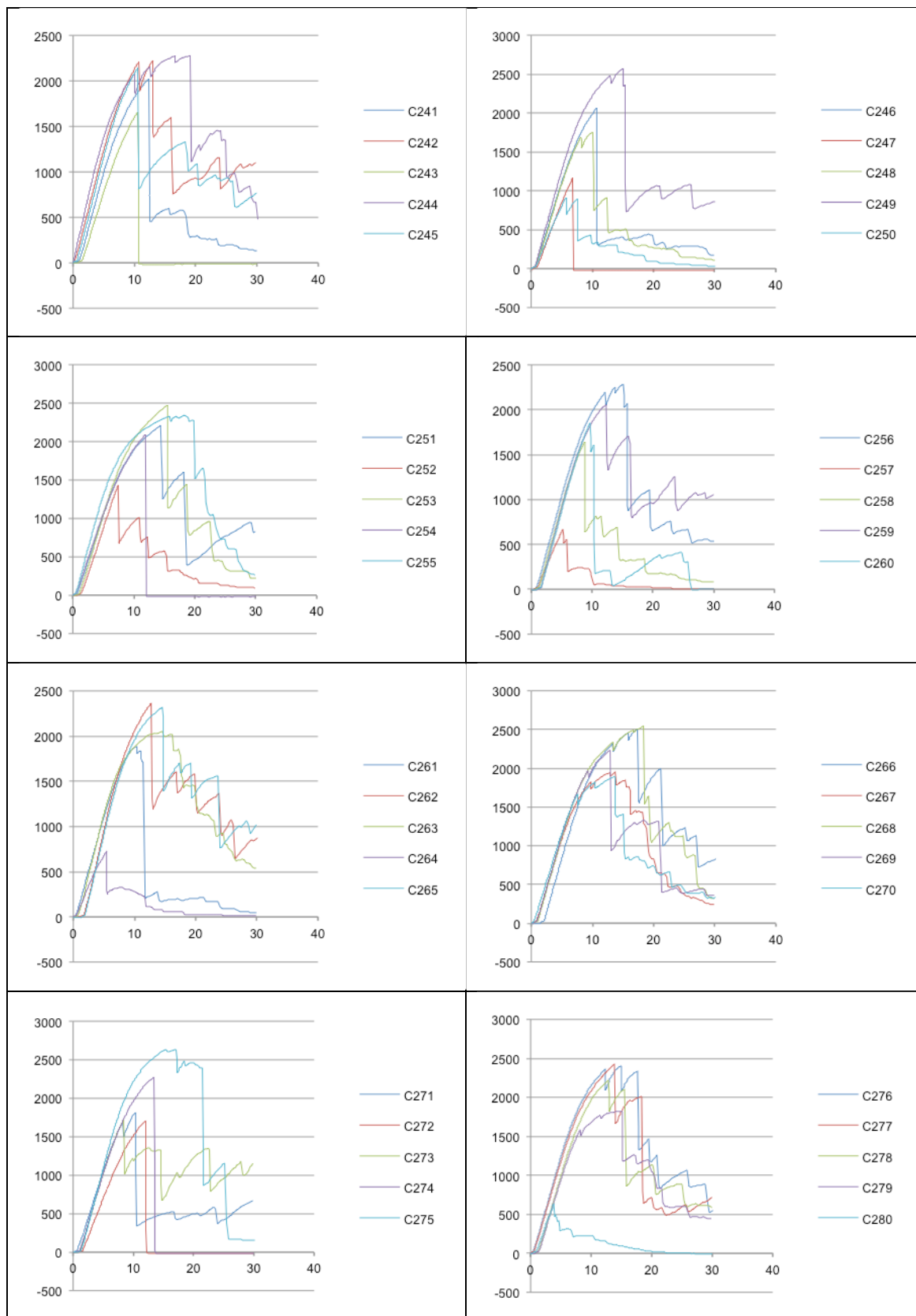
Unidades (mm - N)



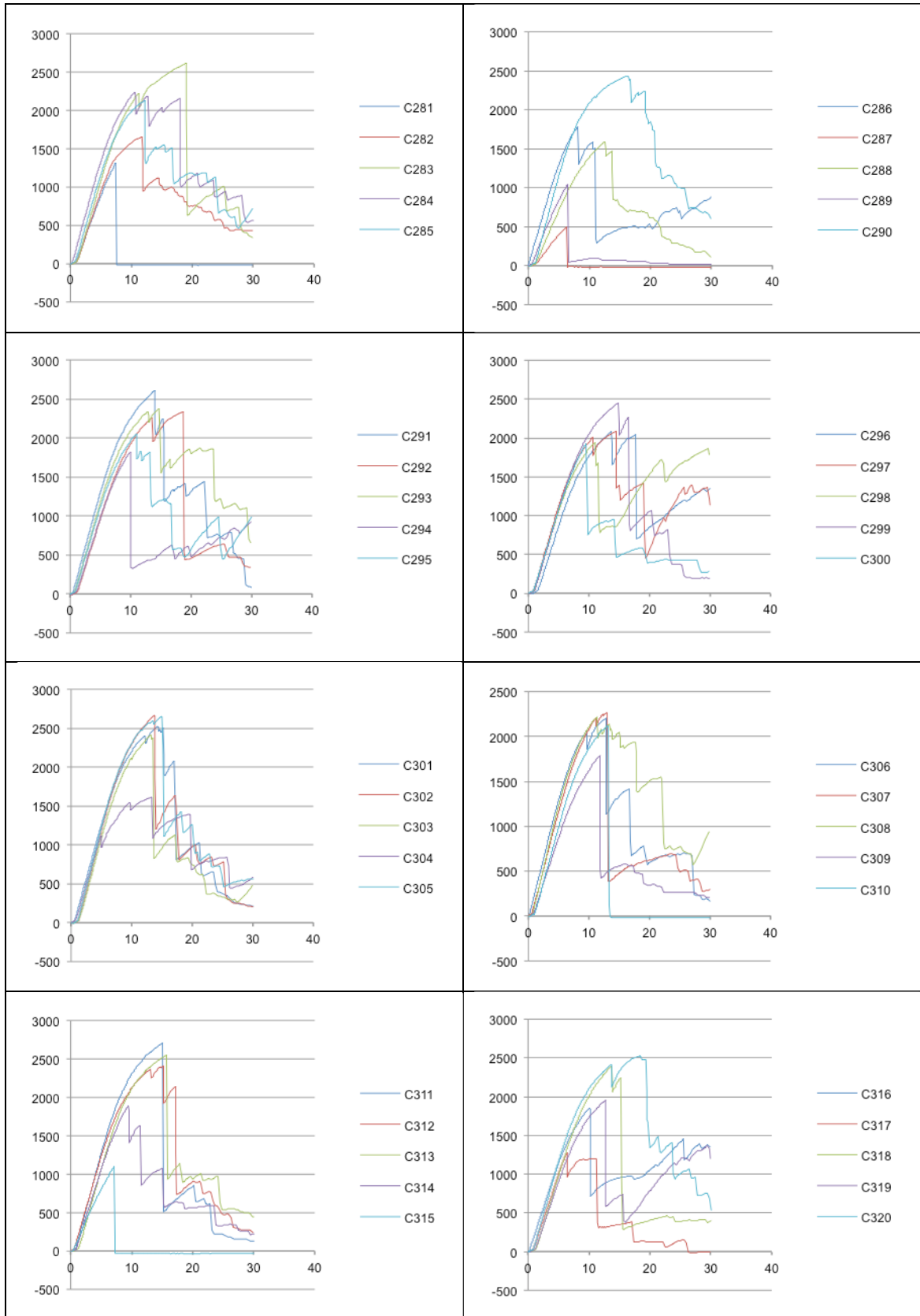
Unidades (mm - N)



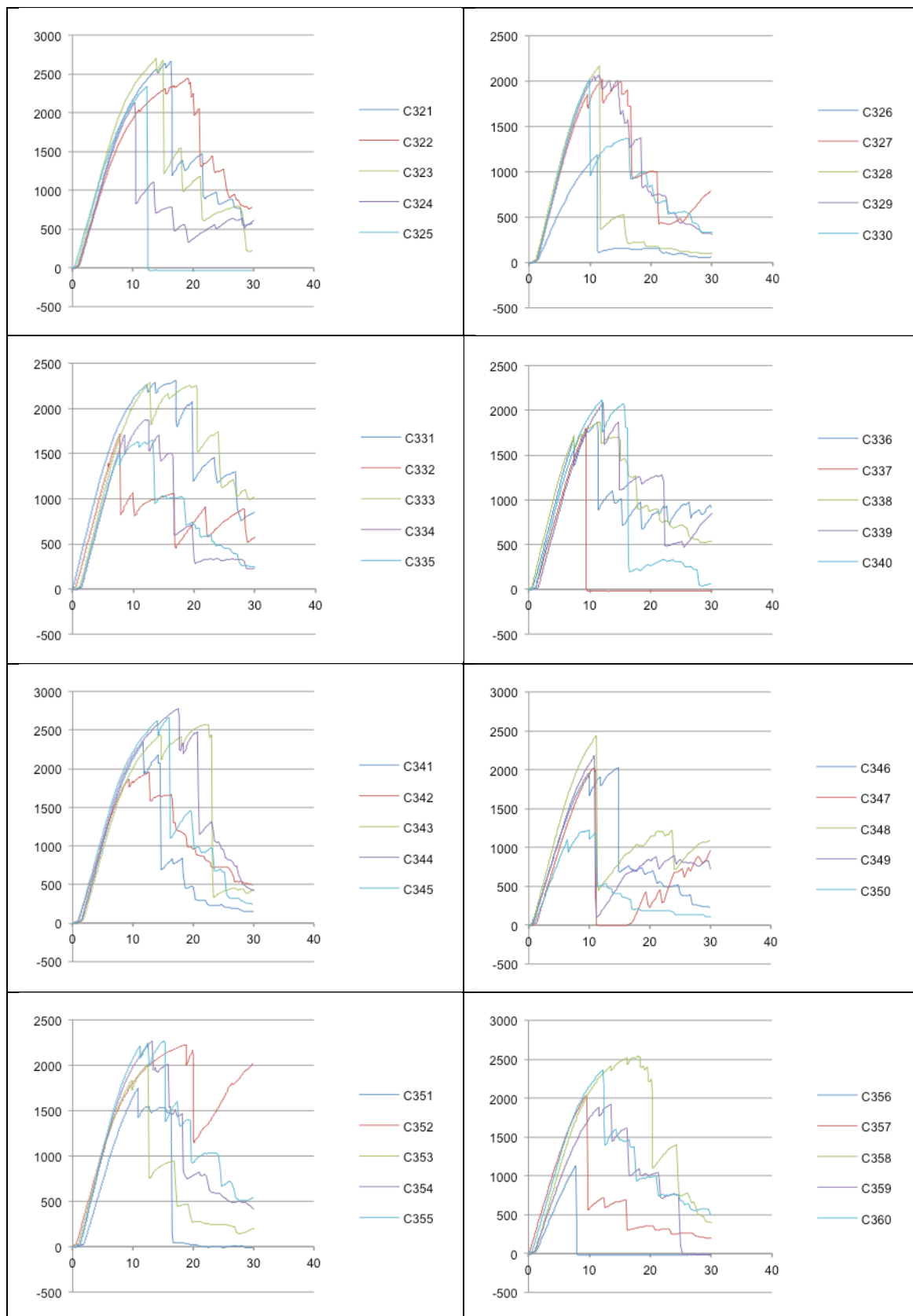
Unidades (mm - N)



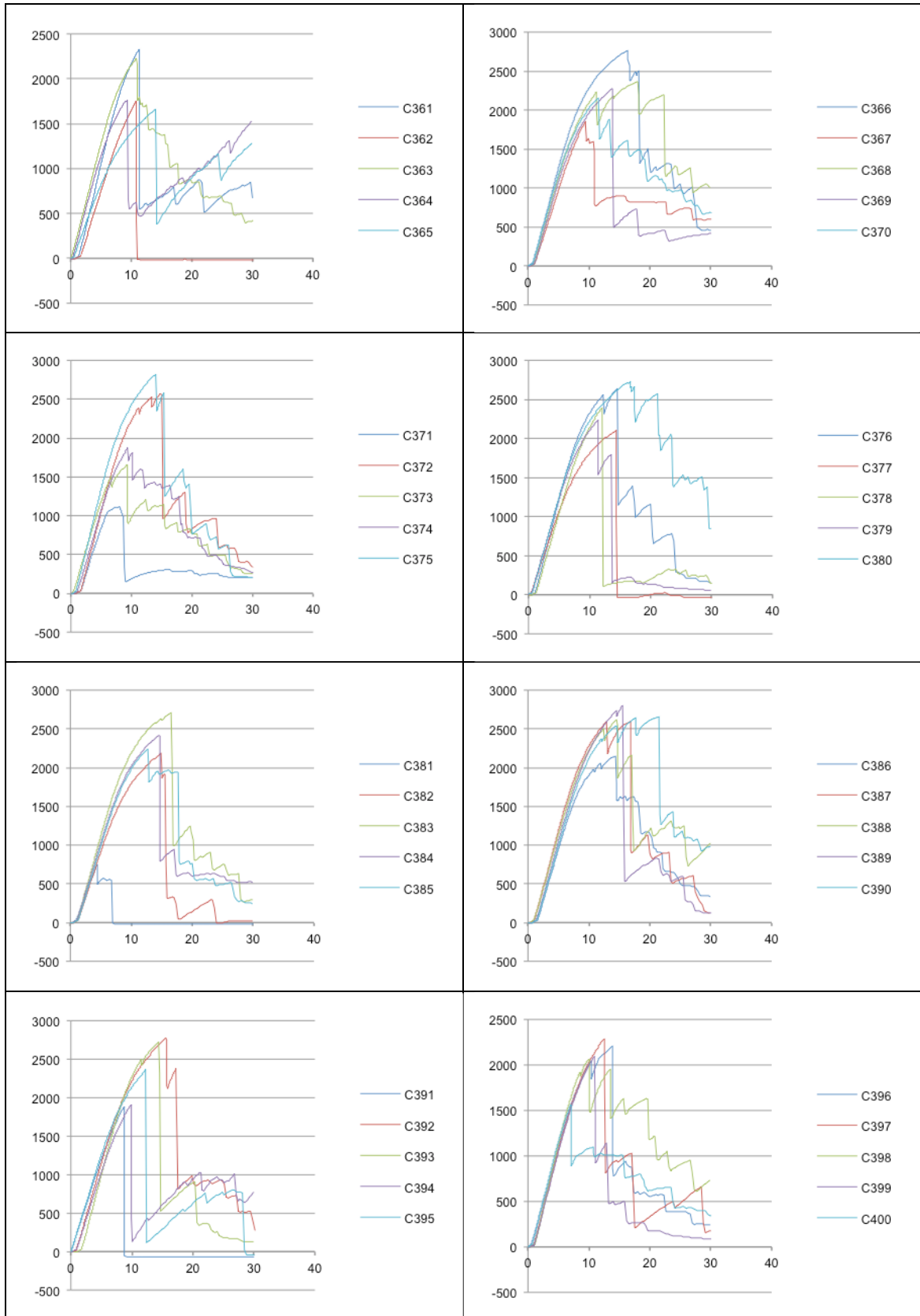
Unidades (mm - N)



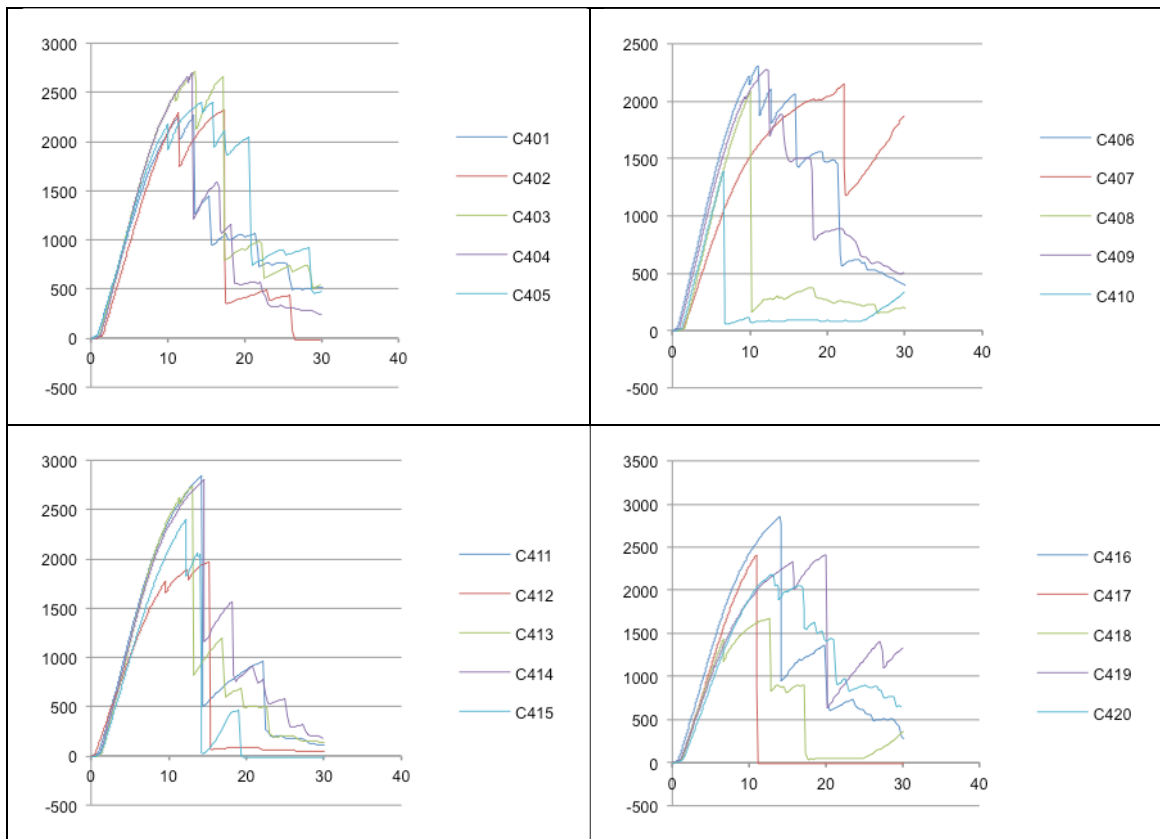
Unidades (mm - N)



Unidades (mm - N)



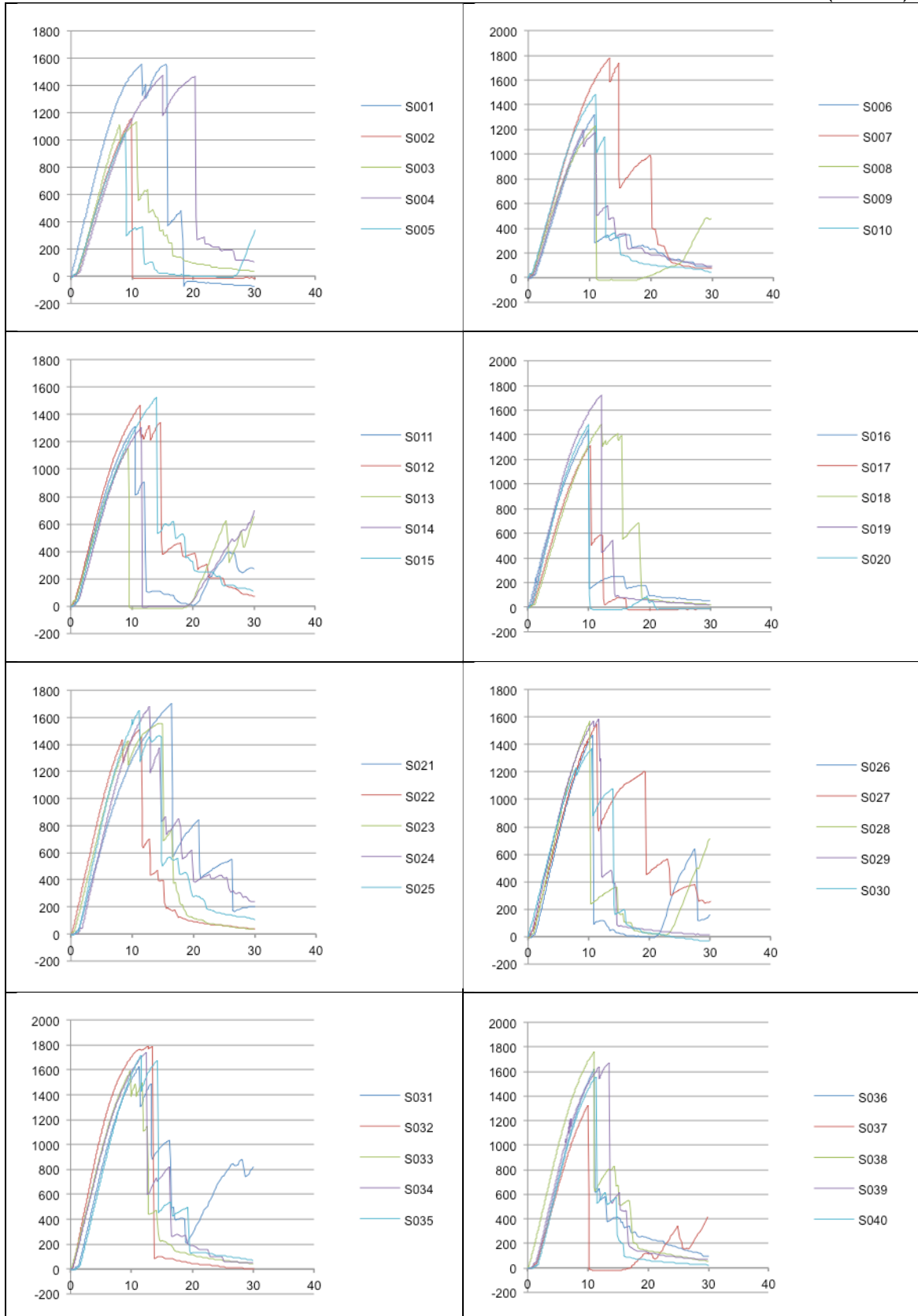
Unidades (mm - N)

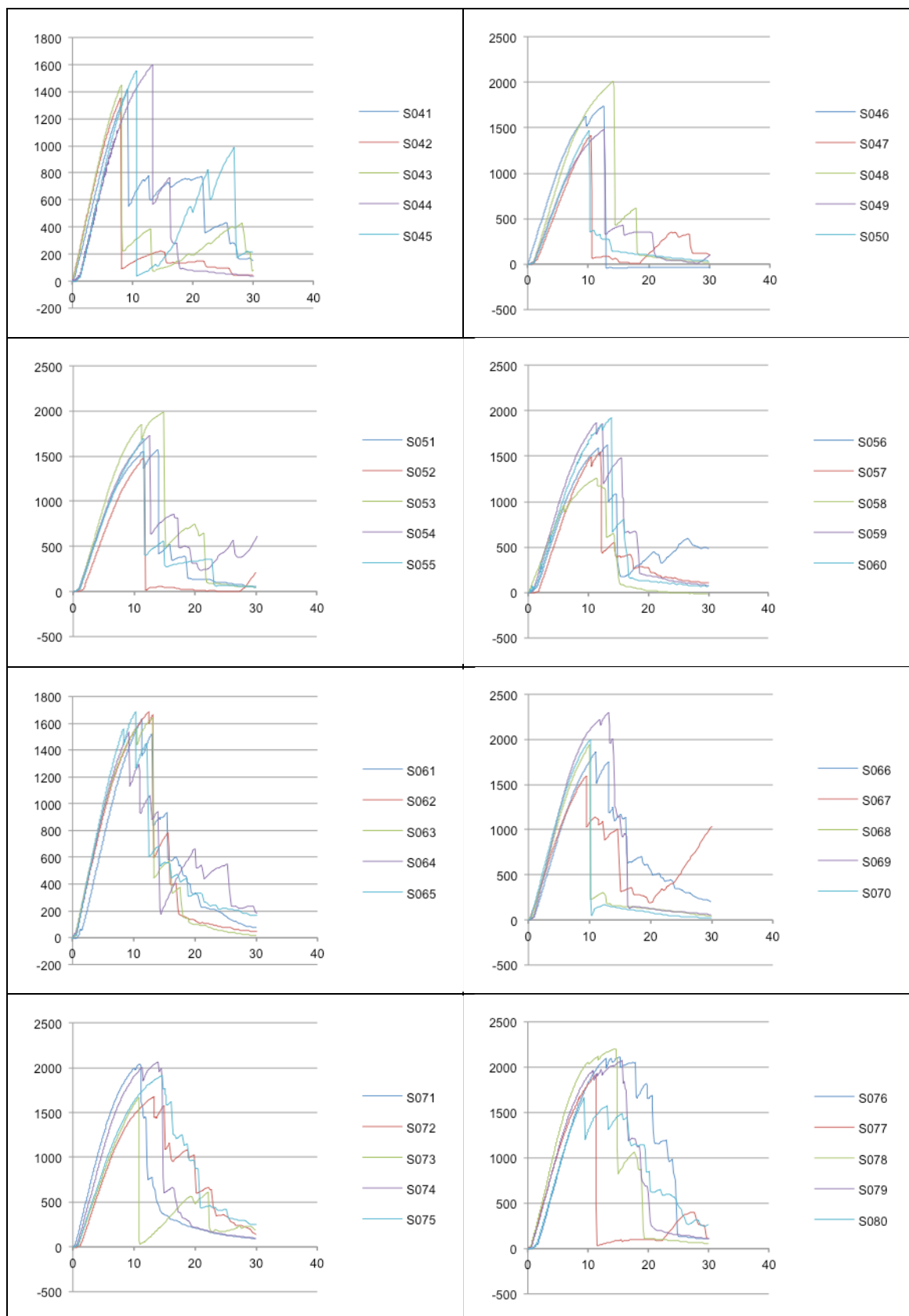


Unidades (mm - N)

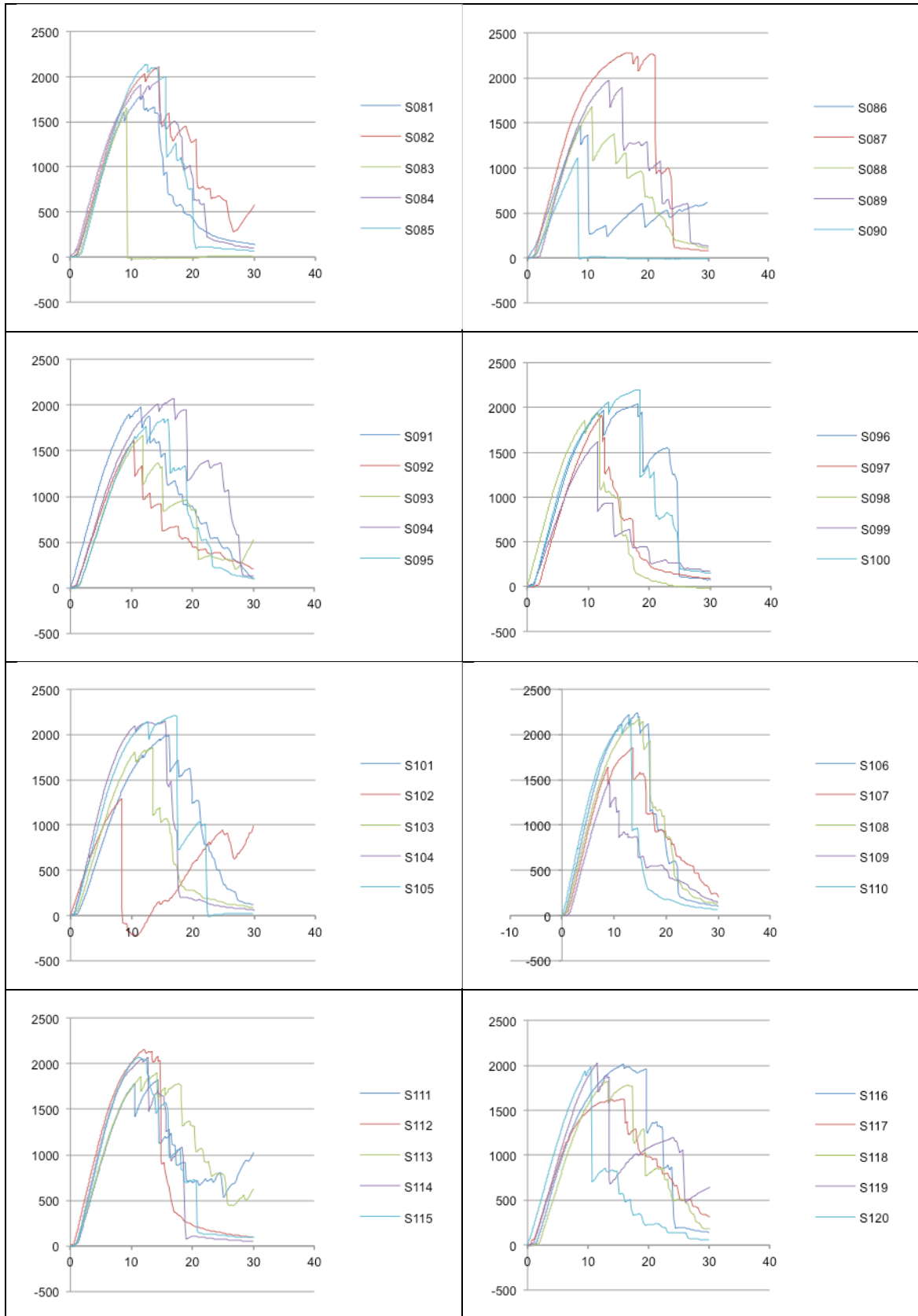
C.2 - Provetes de Sapelli

Unidades (mm - N)

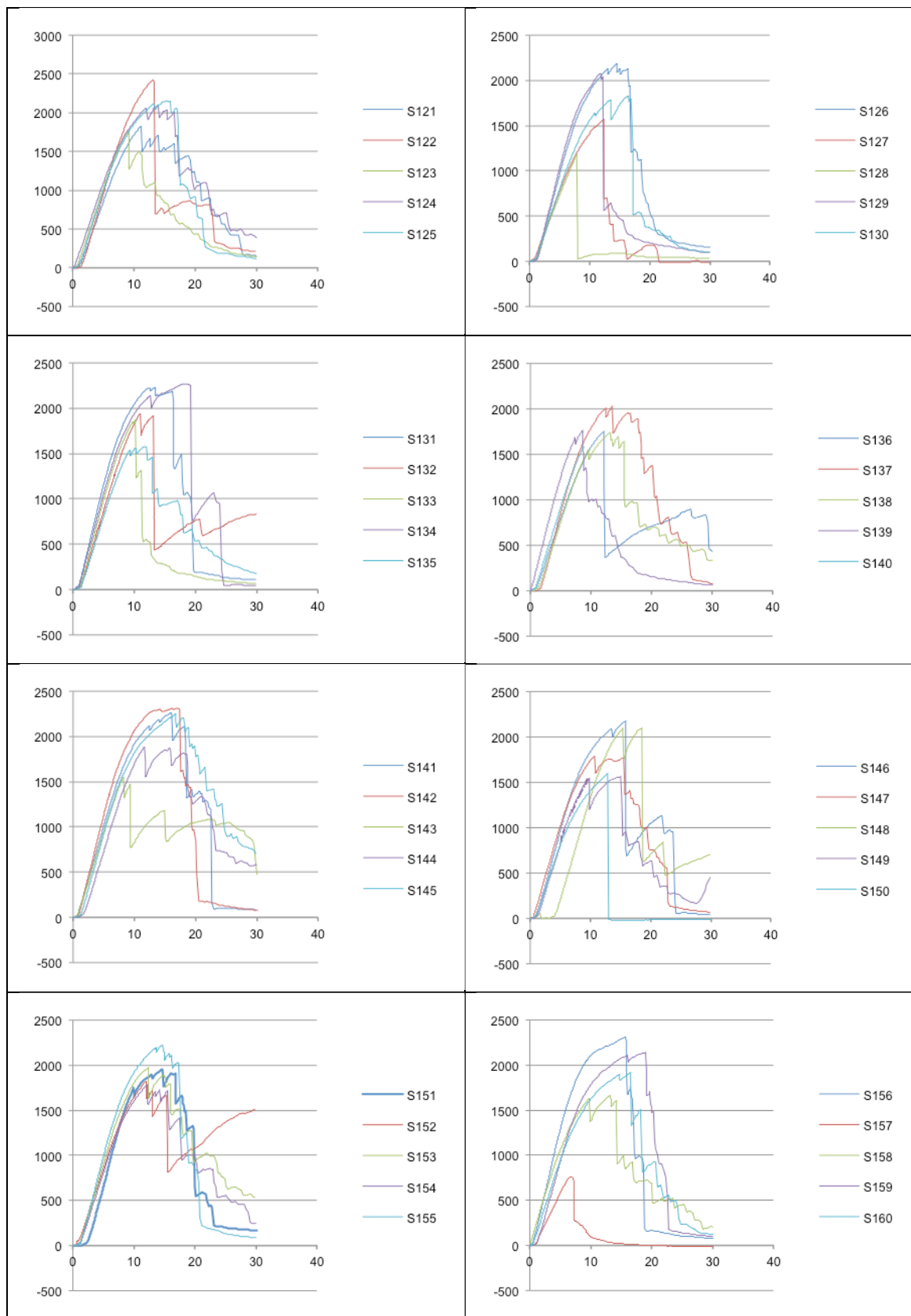




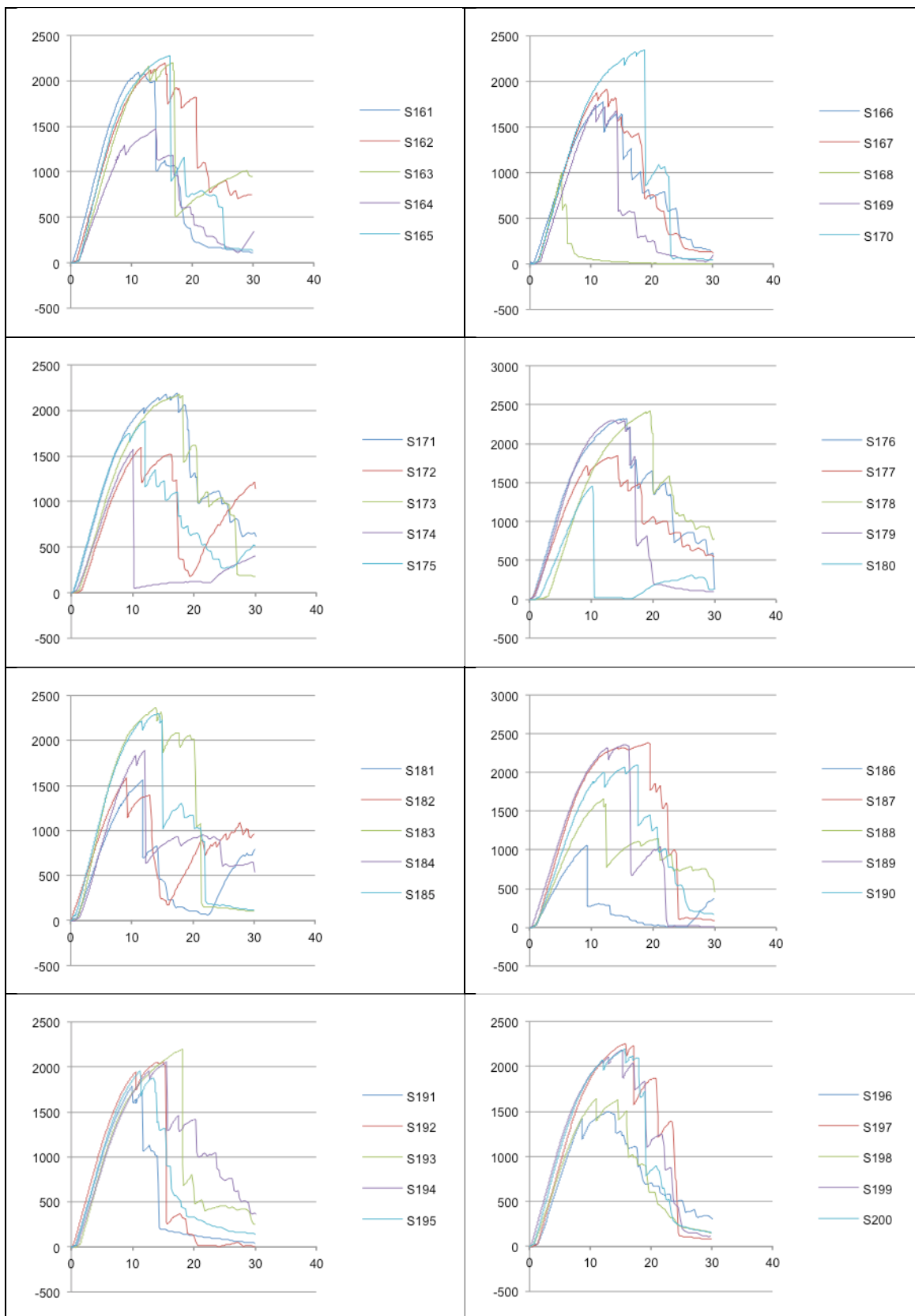
Unidades (mm - N)



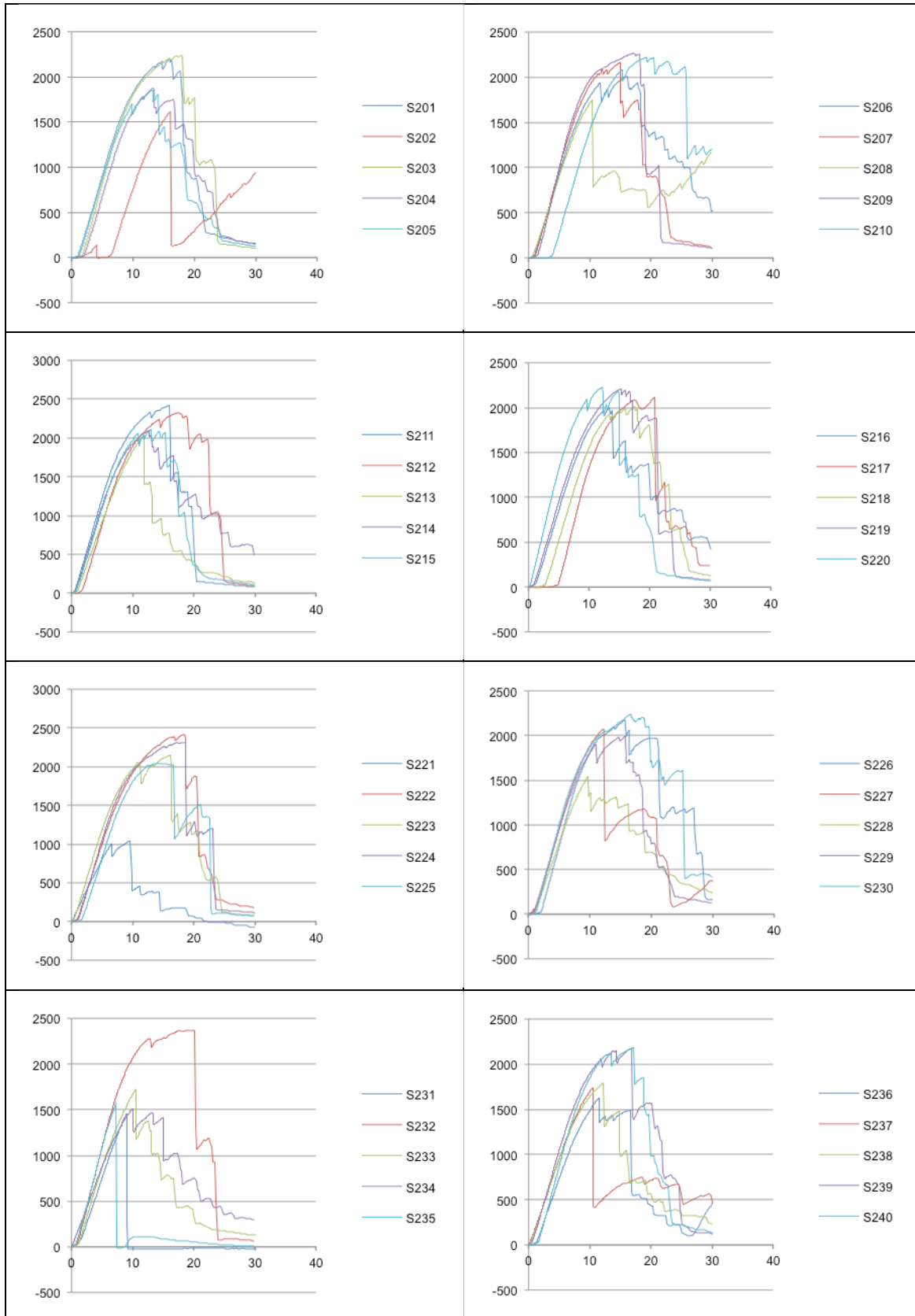
Unidades (mm - N)



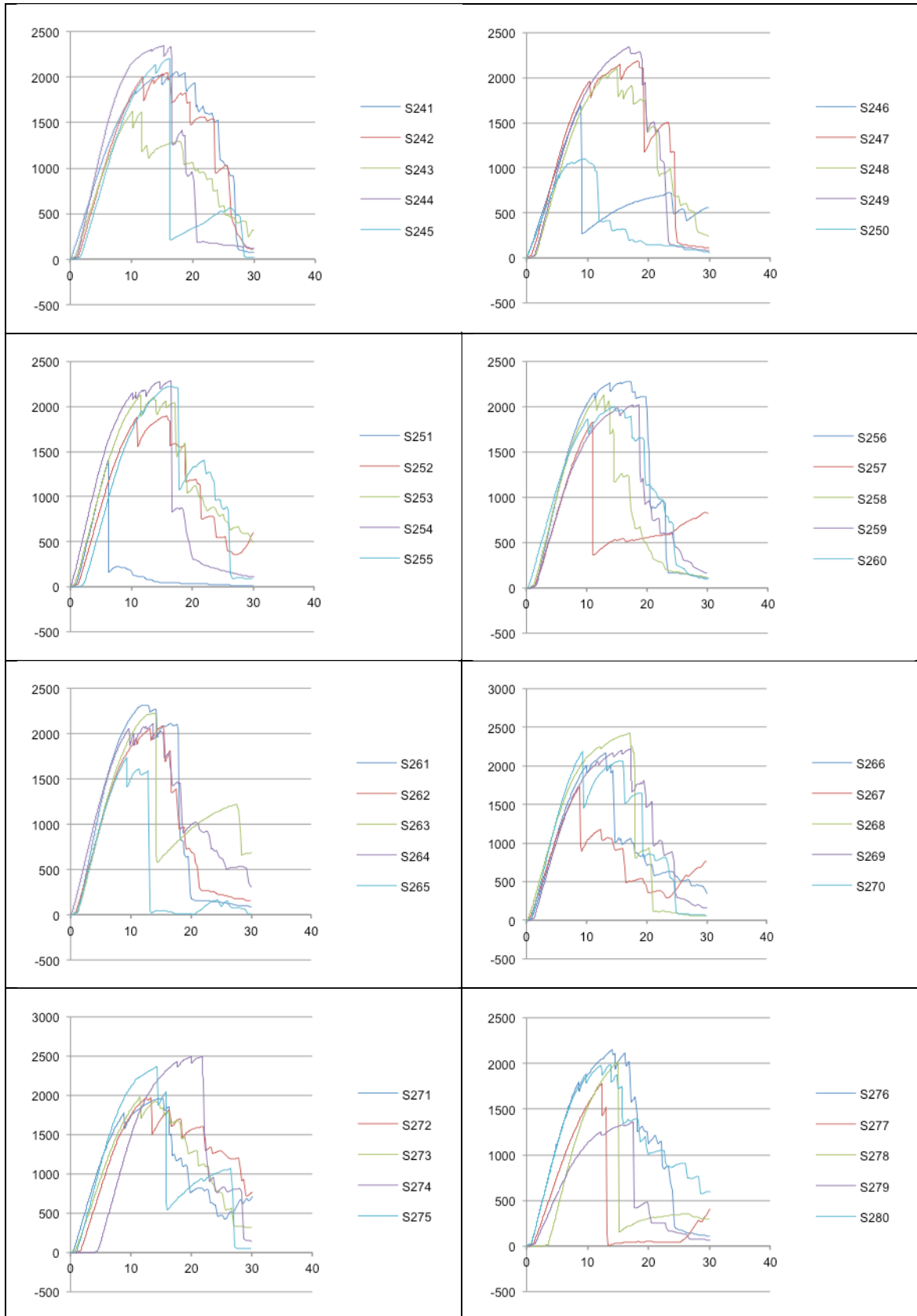
Unidades (mm - N)



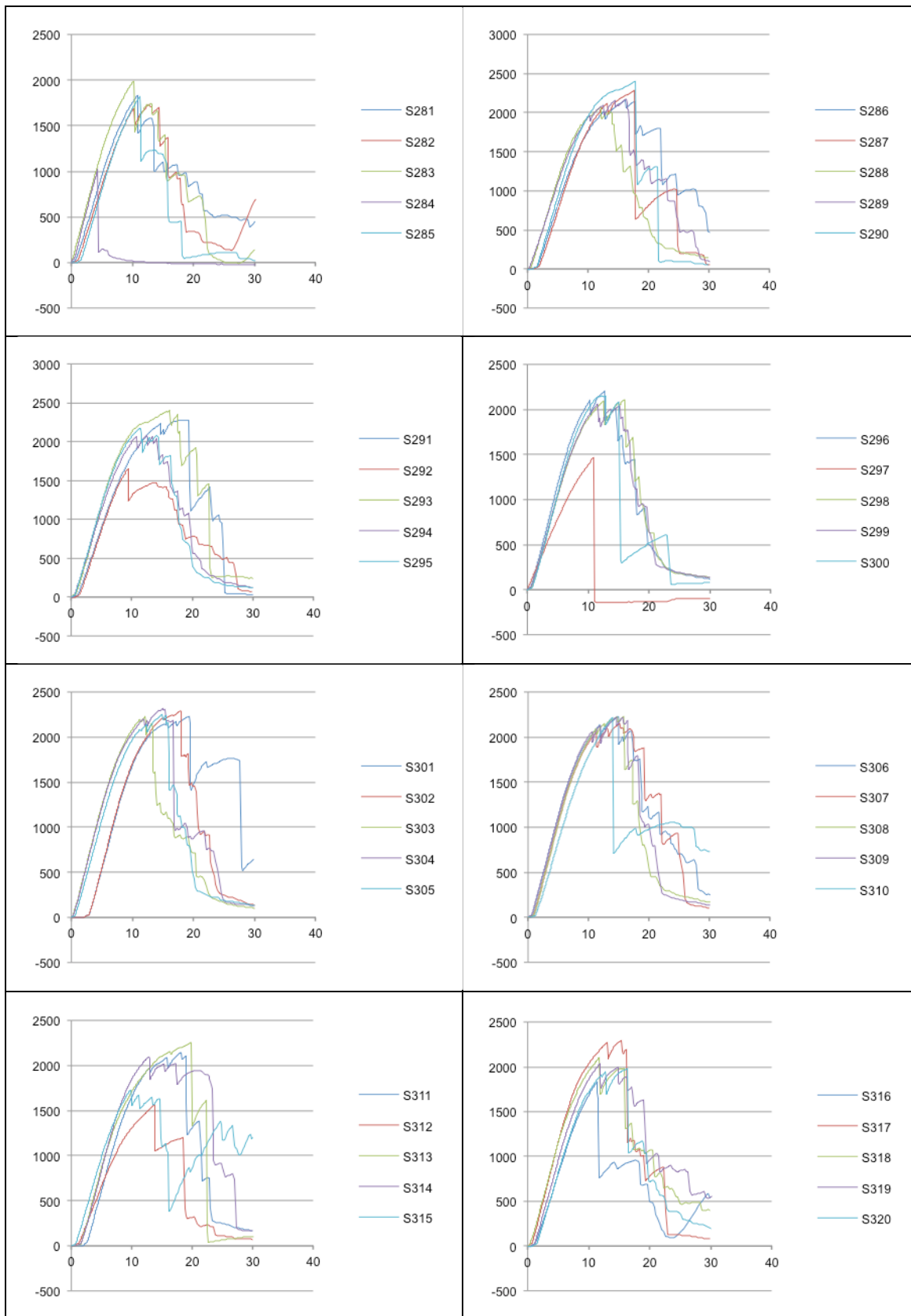
Unidades (mm - N)



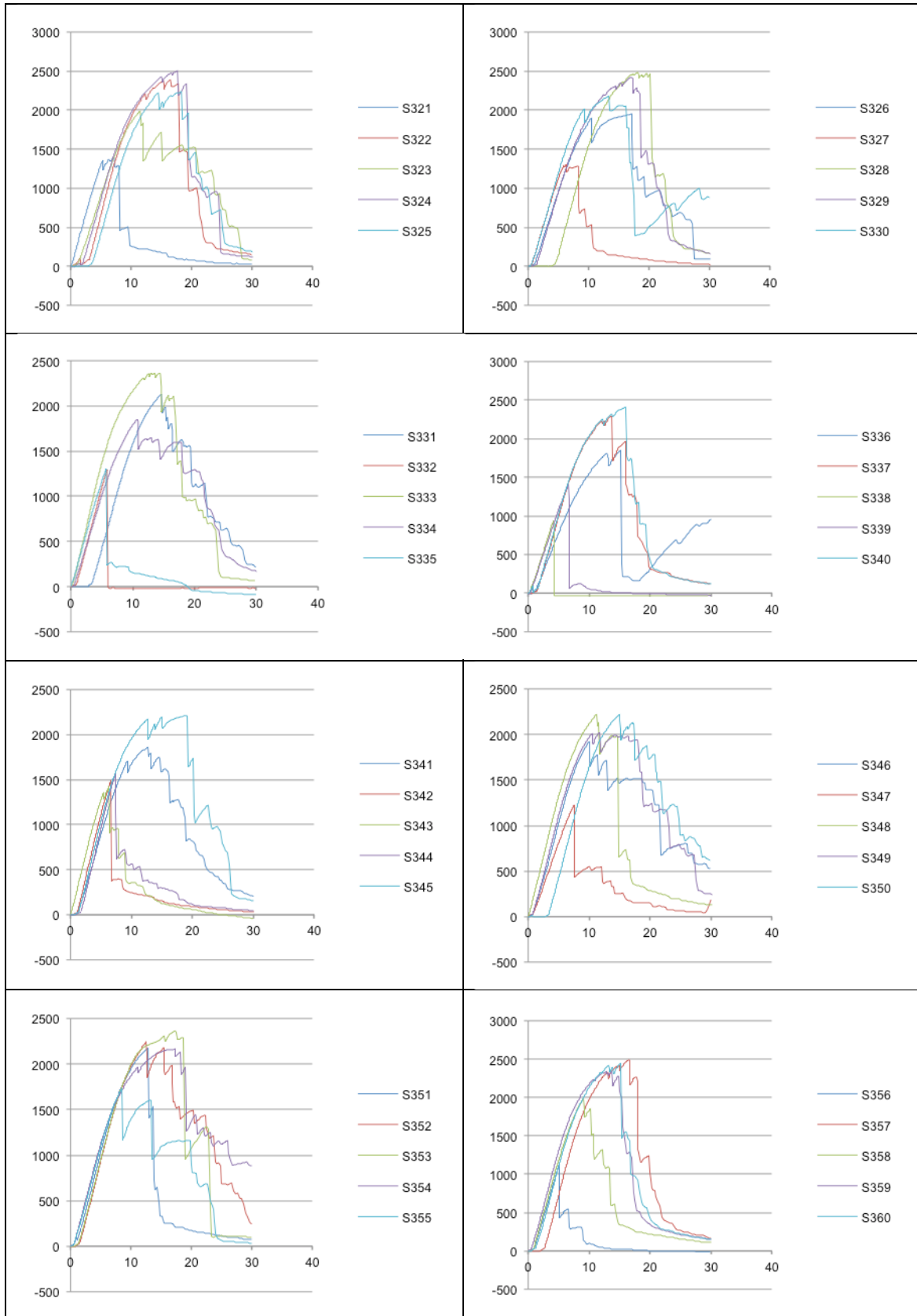
Unidades (mm - N)



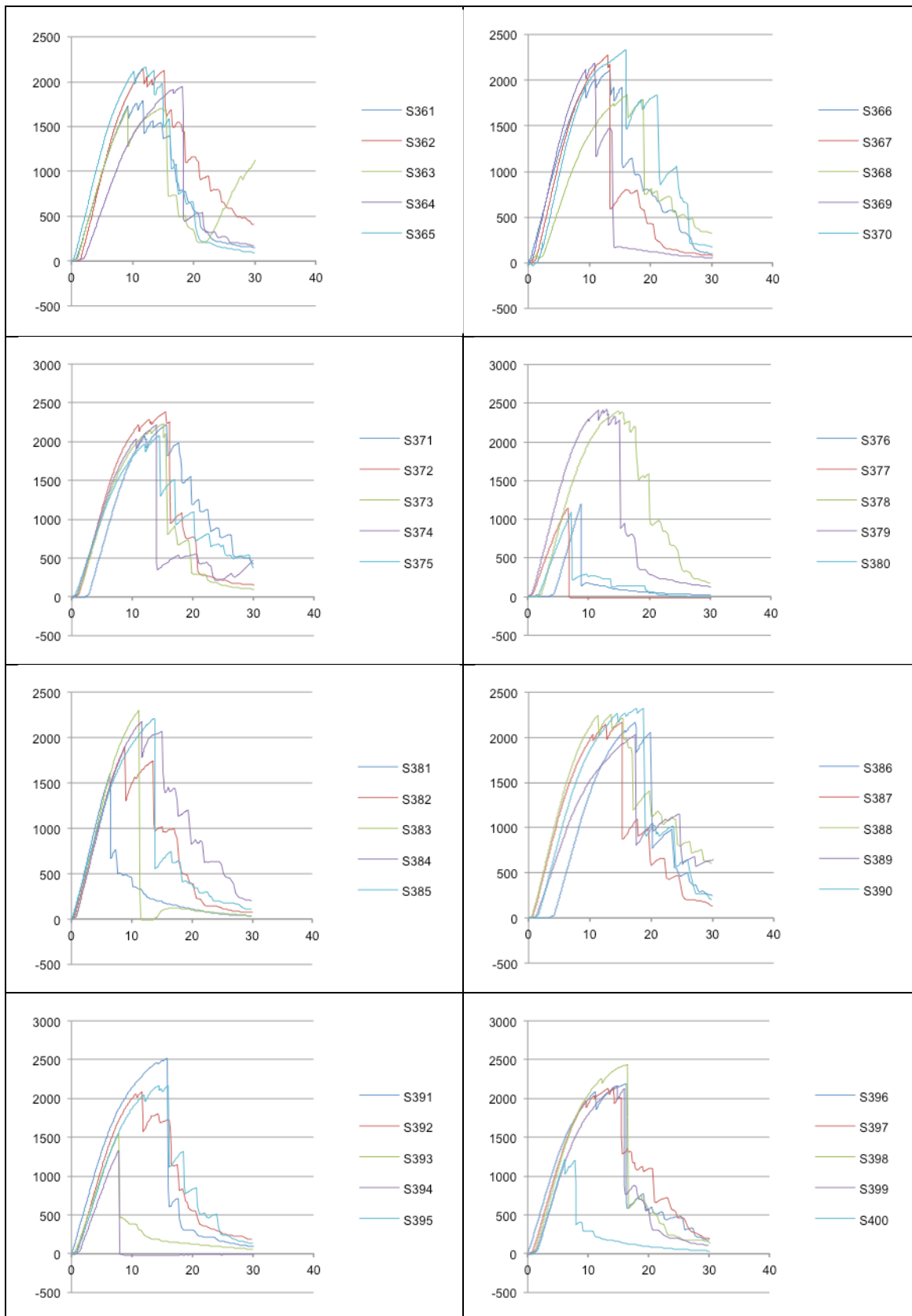
Unidades (mm - N)



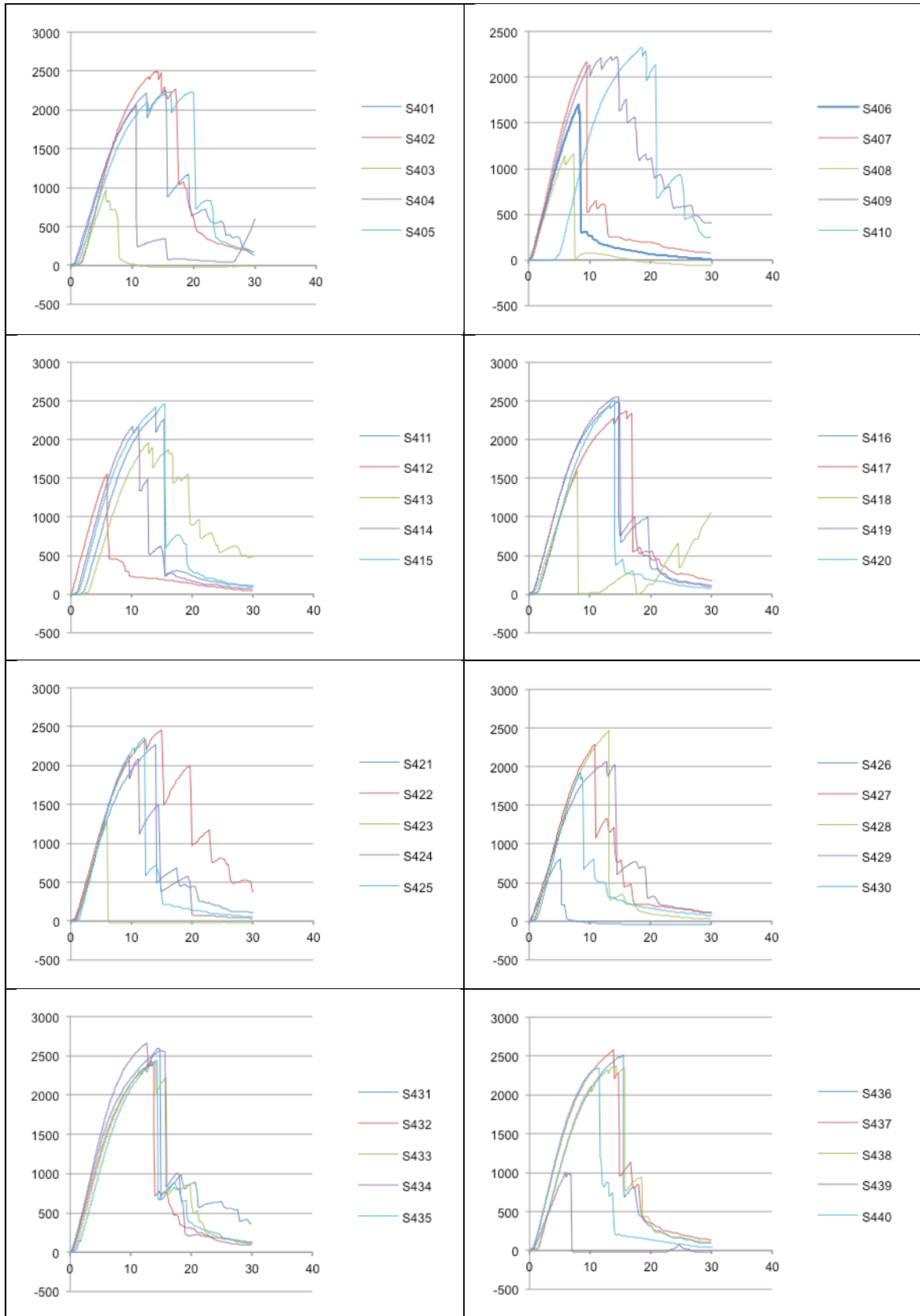
Unidades (mm - N)



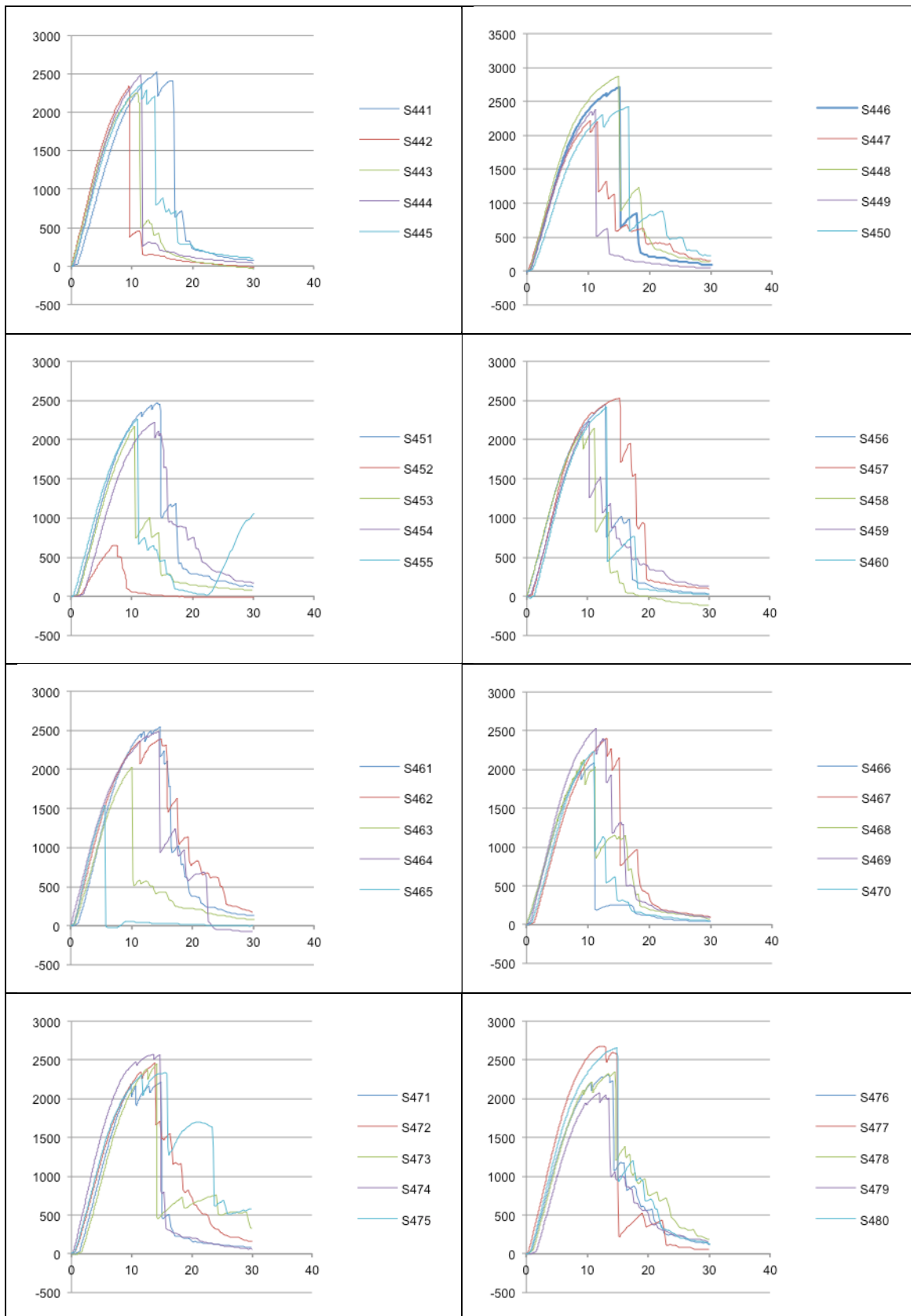
Unidades (mm - N)



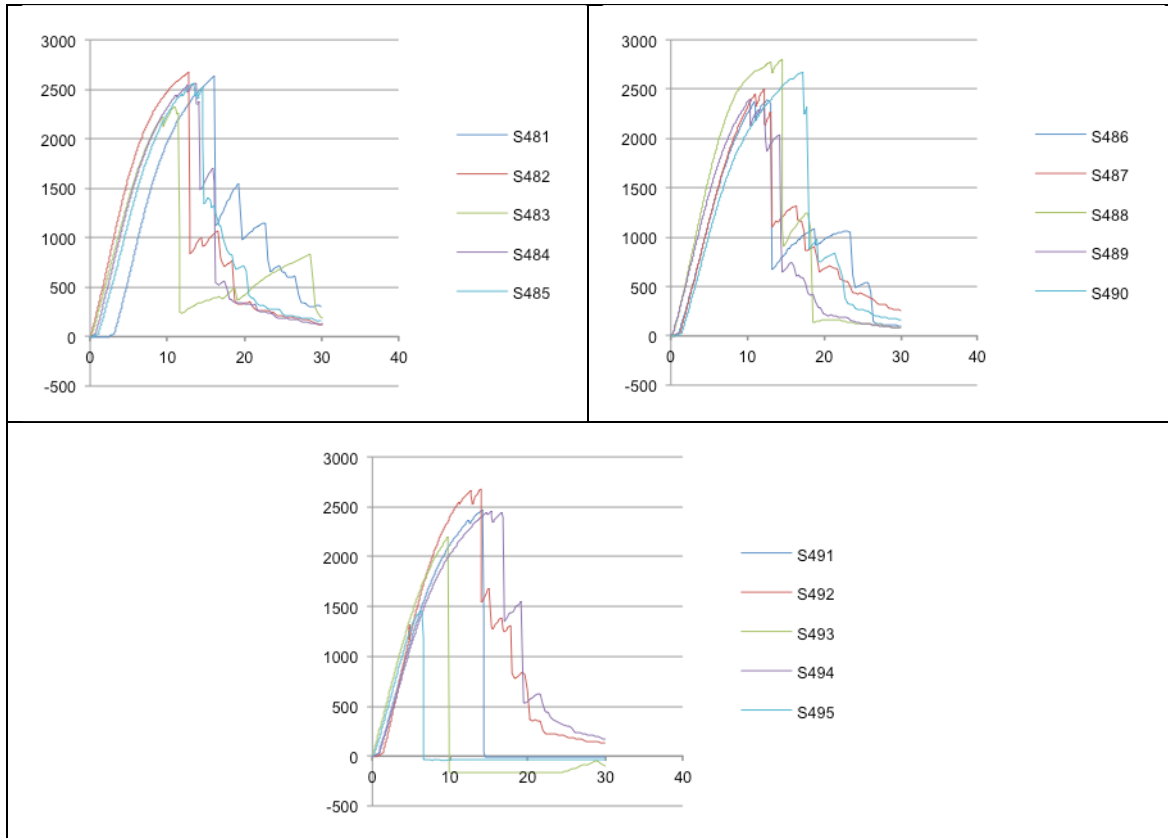
Unidades (mm - N)



Unidades (mm - N)



Unidades (mm - N)



Unidades (mm - N)

ANEXO D

CORRELAÇÕES POUCO SIGNIFICATIVAS ENTRE PROPRIEDADES AFERIDAS EM ENSAIOS DE PROVETES DE PEQUENAS DIMENSÕES

—

D.1 Propriedades de provetes de pequenas dimensões

D.1.1 Correlação velocidade do ultrassom (v) com a massa volúmica (ρ)

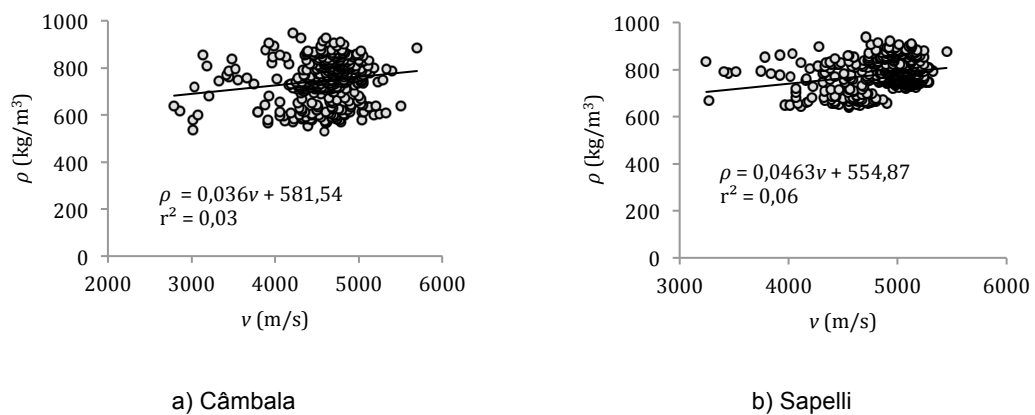
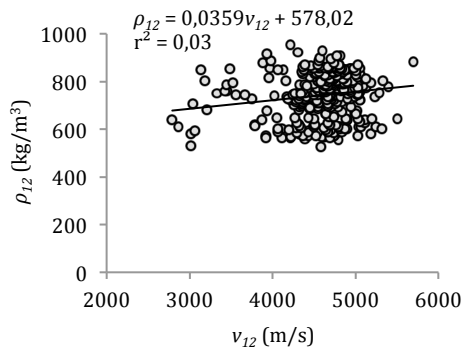
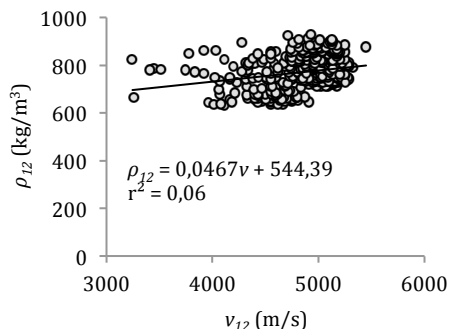


Figura D.1: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, sem correção do teor em água (1ª Fase).

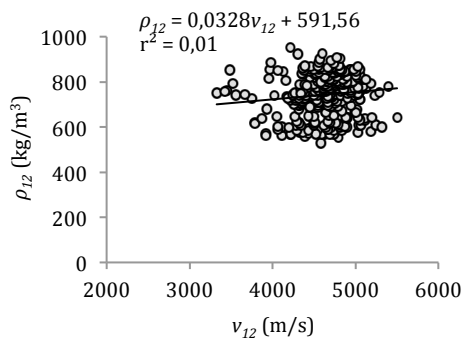


a) Câmbala

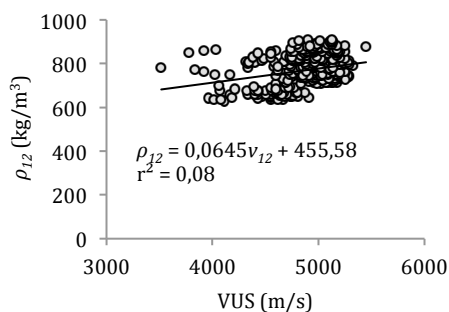


b) Sapelli

Figura D.2: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

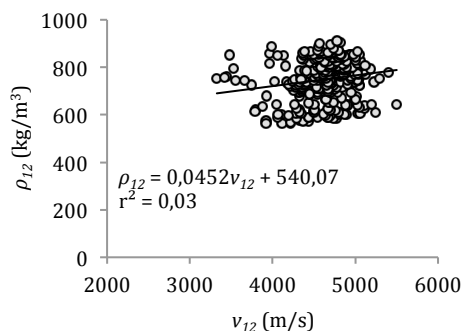


a) Câmbala

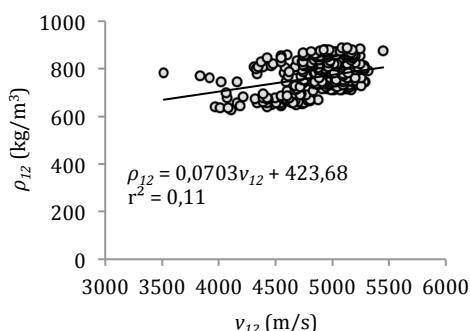


b) Sapelli

Figura D.3: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura D.4: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela D.1: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e massa volúmica (ρ).

Espécie	$v - \rho$	Número de provetes	Expressão Regressão linear: $v - \rho$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$\rho = 0,036v + 581,54$	0,026	0,00%
	2ª Fase	420	$\rho = 0,0359v + 578,02$	0,025	0,00%
	3ª Fase	406	$\rho = 0,0328v + 591,56$	0,013	3,33%
	4ª Fase	386	$\rho = 0,0452v + 540,07$	0,031	4,93%
	Total retirados				8,10%
Sapelli	1ª Fase	495	$\rho = 0,0463v + 554,87$	0,065	0,00%
	2ª Fase	495	$\rho = 0,0467v + 544,39$	0,062	0,00%
	3ª Fase	467	$\rho = 0,0645v + 455,58$	0,085	5,66%
	4ª Fase	444	$\rho = 0,0703v + 423,68$	0,114	4,93%
	Total retirados				10,3%

D.1.2 Correlação entre a velocidade do ultrassom (v) com E_m e f_m

D.1.2.1 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m

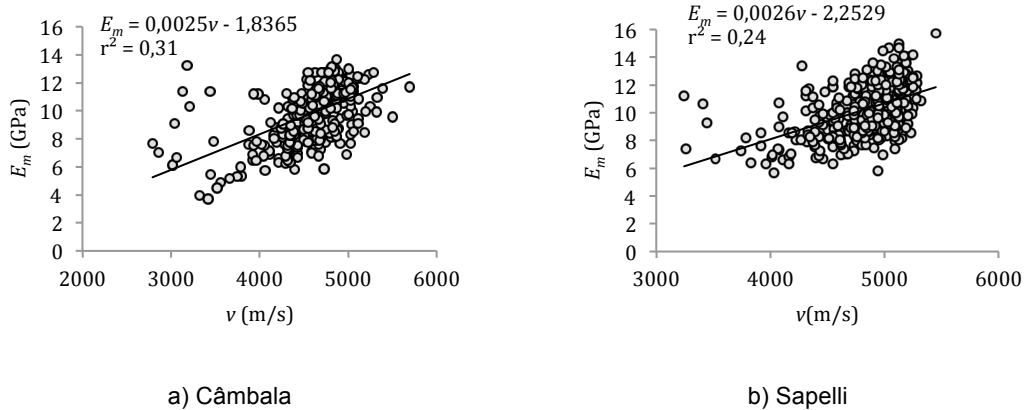
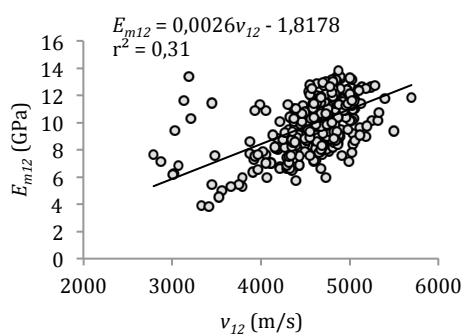
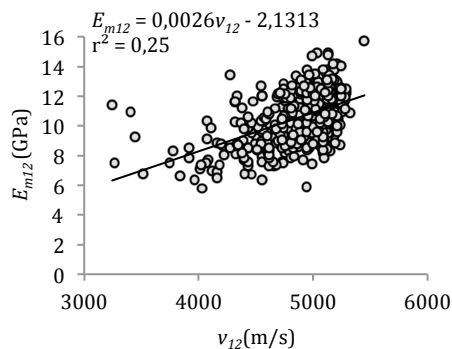


Figura D.5: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

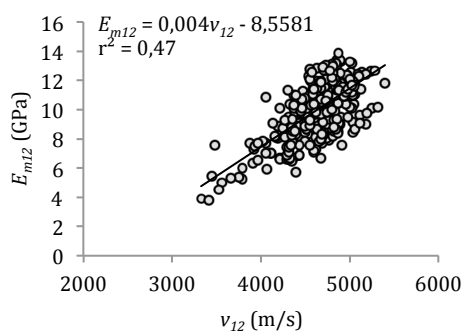


a) Câmbala

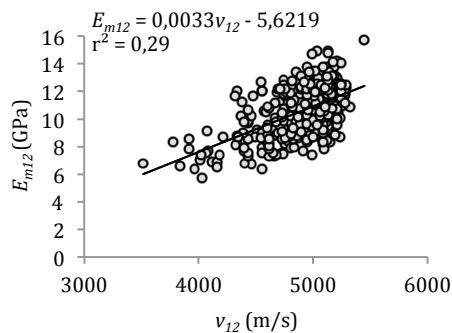


b) Sapelli

Figura D.6: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

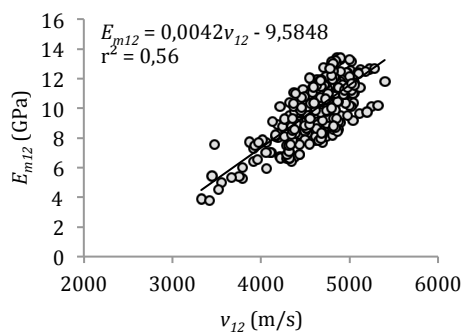


a) Câmbala

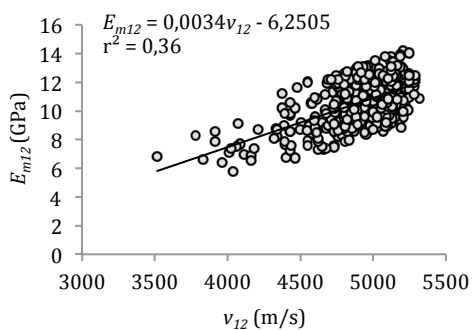


b) Sapelli

Figura D.7: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura D.8: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela D.2: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e E_m .

Espécie	$v - E_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $v - E_m$	r^2	% de valores retirados entre fases
Câmbala	1ª Fase	420	$E_m = 0,0025v - 1,8365$	0,307	0,00%
	2ª Fase	420	$E_m = 0,0026v - 1,8178$	0,306	0,00%
	3ª Fase	401	$E_m = 0,004v - 8,5581$	0,468	4,52%
	4ª Fase	381	$E_m = 0,0042v - 9,5848$	0,557	4,99%
	Total retirados				9,29%
Sapelli	1ª Fase	495	$E_m = 0,0026v - 2,2529$	0,242	0,00%
	2ª Fase	495	$E_m = 0,0026v - 2,1313$	0,250	0,00%
	3ª Fase	468	$E_m = 0,0033v - 5,6219$	0,294	5,45%
	4ª Fase	445	$E_m = 0,0034v - 6,2505$	0,358	4,91%
	Total retirados				10,10%

D.1.2.2 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com f_m

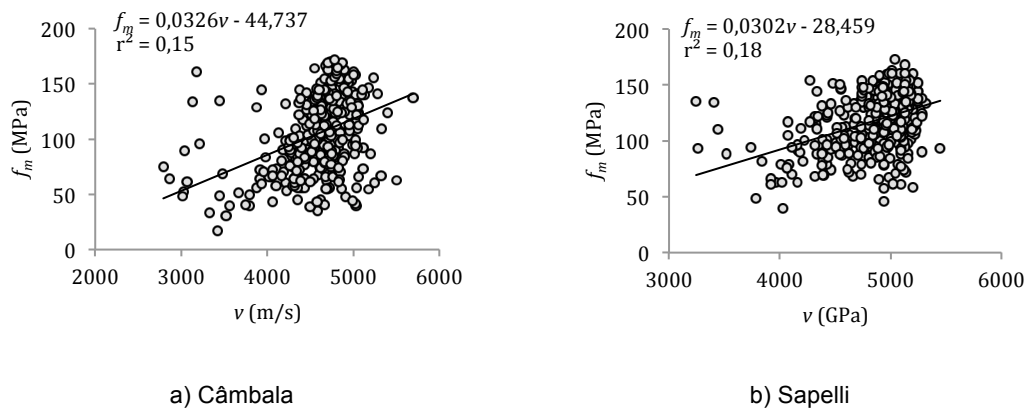


Figura D.9: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

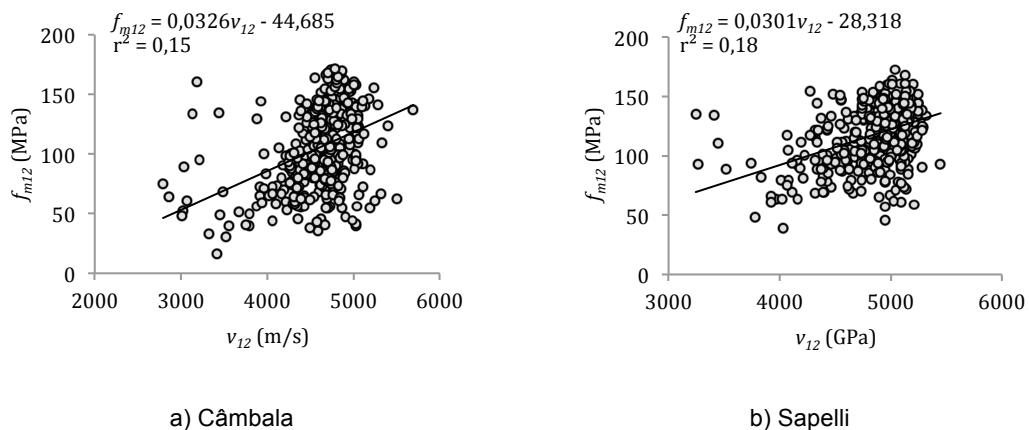


Figura D.10: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

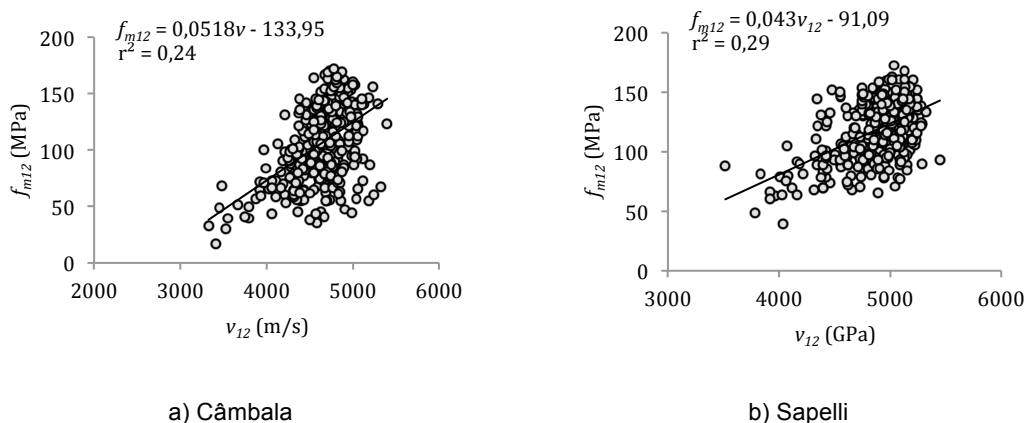


Figura D.11: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

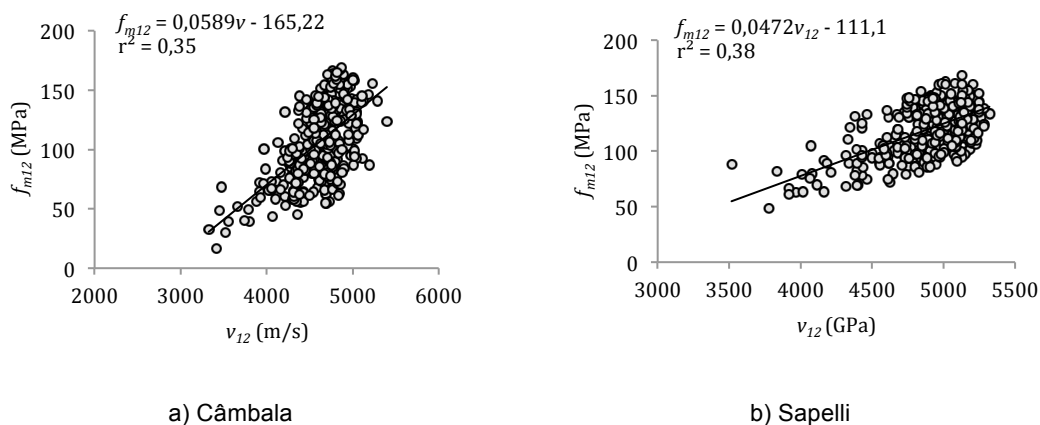


Figura D.12: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela D.3: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e f_m .

Espécie	$v - f_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $v - f_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	420	$f_m = 0,0326v - 44,737$	0,153	0,00%
	2ª Fase	420	$f_m = 0,0326v - 44,685$	0,153	0,00%
	3ª Fase	403	$f_m = 0,0518v - 113,95$	0,240	4,05%
	4ª Fase	383	$f_m = 0,0589v - 165,22$	0,346	4,96%
	Total retirados				10,85%
Sapelli	1ª Fase	495	$f_m = 0,0302v - 28,459$	0,177	0,00%
	2ª Fase	495	$f_m = 0,0301v - 28,318$	0,177	0,00%
	3ª Fase	461	$f_m = 0,043v - 91,09$	0,279	6,87%
	4ª Fase	438	$f_m = 0,0472v - 111,1$	0,375	4,99%
	Total retirados				16,98%

ANEXO E

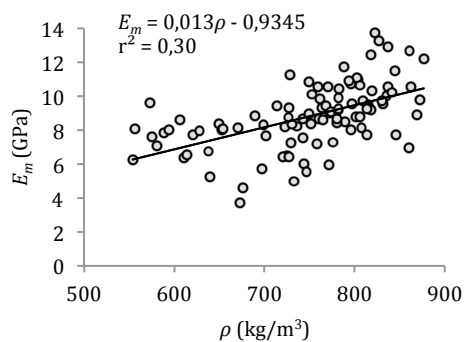
CORRELAÇÕES POUCO SIGNIFICATIVAS ENTRE PROPRIEDADES AFERIDAS DAS CAMPANHAS DE ENSAIOS DESCRITAS NO CAPÍTULO 5

—

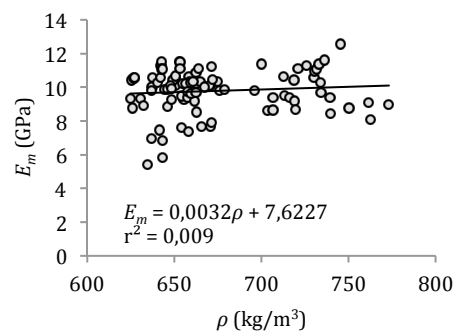
E.1 Propriedades de provetes de pequenas dimensões

E.1.1 Correlação da massa volúmica (ρ) com E_m e f_m

E.1.1.1 Correlação da massa volúmica (ρ) com E_m

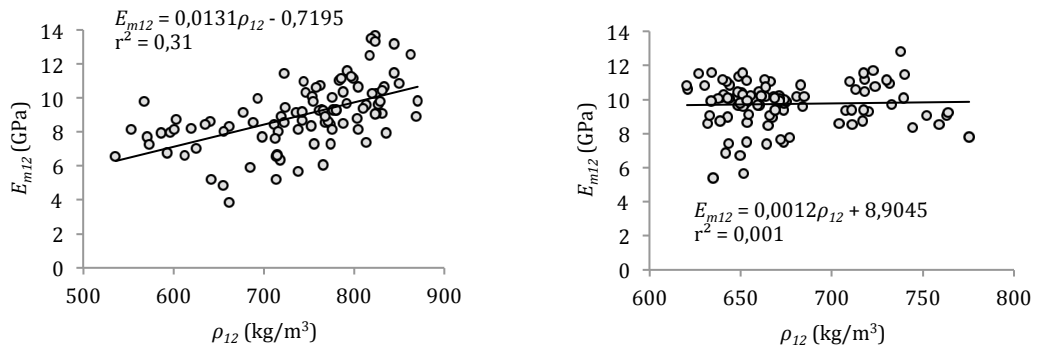


a) Câmbala



b) Sapelli

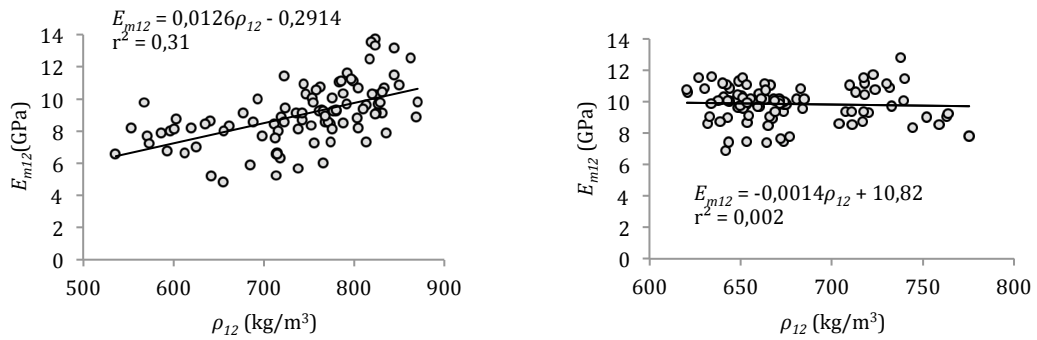
Figura E.1: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).



a) Câmbala

b) Sapelli

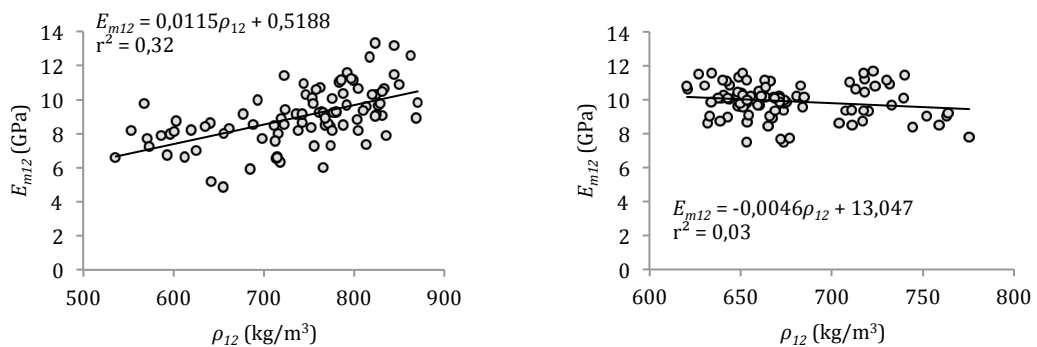
Figura E.2: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).



a) Câmbala

b) Sapelli

Figura E.3: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala

b) Sapelli

Figura E.4: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.1: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e E_m em provetes extraídos.

Espécie	$\rho - E_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $\rho - E_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$E_m = 0,013\rho - 0,9345$	0,297	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,0131\rho - 0,7195$	0,310	0,00%
	3ª Fase	97	$E_m = 0,0126\rho - 0,2914$	0,306	1,02%
	4ª Fase	93	$E_m = 0,0115\rho - 0,5188$	0,315	4,12%
	Total retirados				5,10%
Sapelli	1ª Fase	98	$E_m = 0,0032\rho + 7,6227$	0,009	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,0012\rho + 8,9045$	0,001	0,00%
	3ª Fase	95	$E_m = -0,0014\rho + 10,82$	0,002	3,06%
	4ª Fase	91	$E_m = -0,0046\rho + 13,047$	0,030	4,21%
	Total retirados				7,14%

E.1.1.2 Correlação da massa volúmica (ρ) com f_m

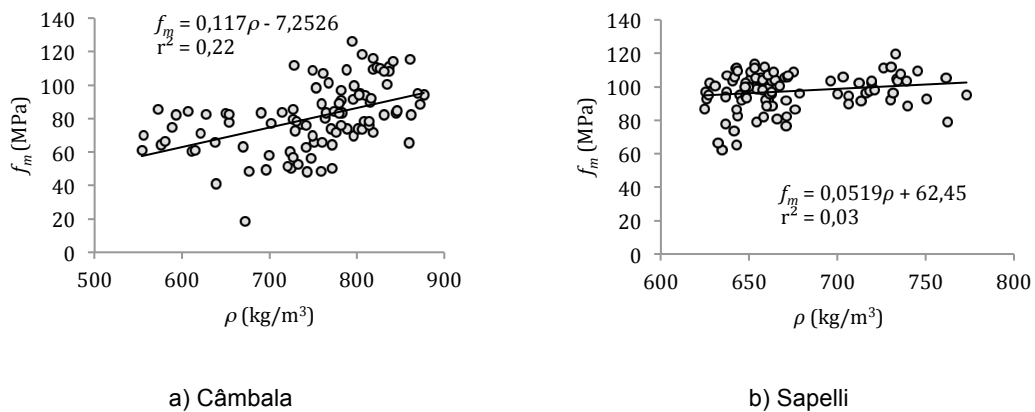


Figura E.5: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

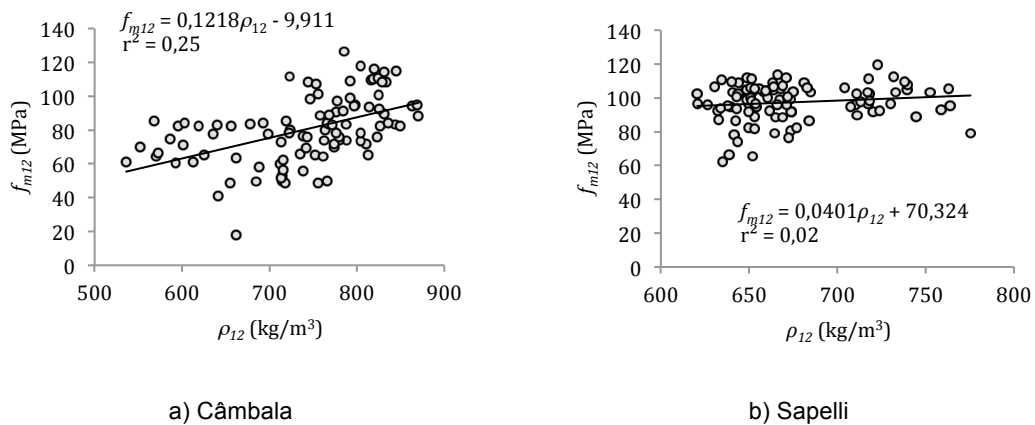


Figura E.6: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

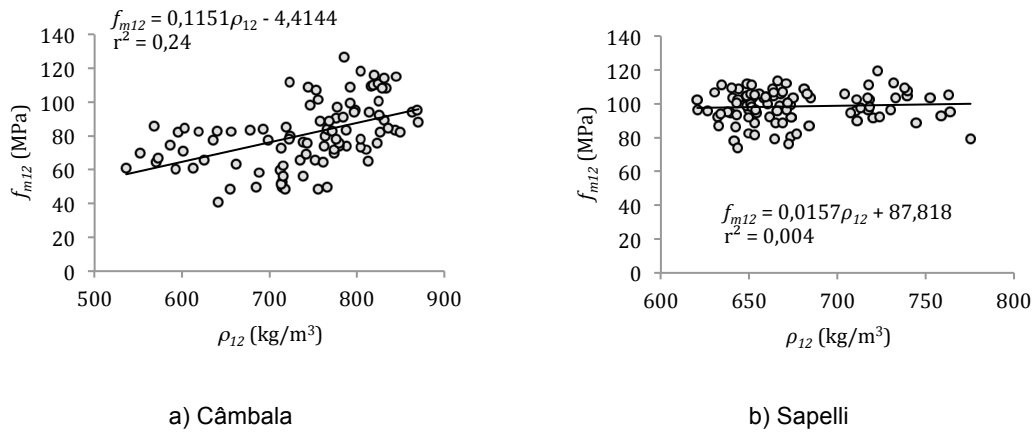


Figura E.7: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

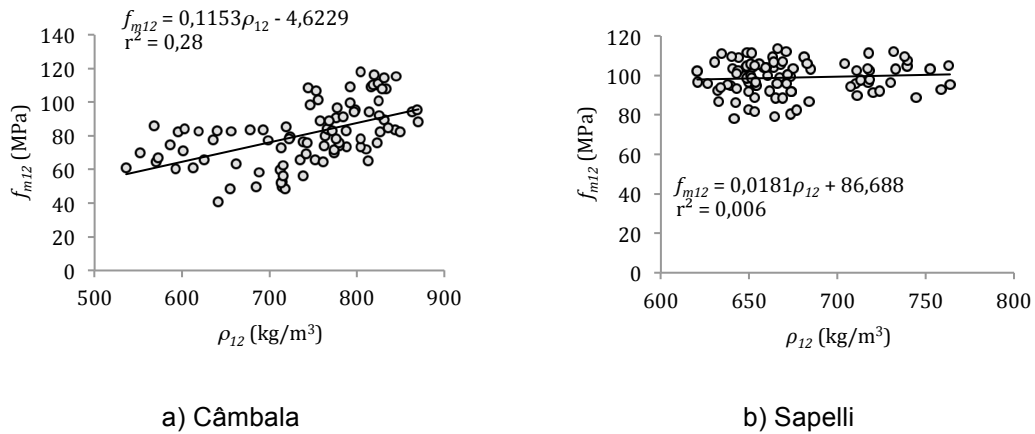


Figura E.8: Correlação entre as propriedades da massa volúmica e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.2: Resumo da correlação entre massa volúmica (ρ) e f_m em provetes extraídos.

Espécie	$\rho - f_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $\rho - f_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$f_m = 0,117\rho - 7,2526$	0,222	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 0,1218\rho - 9,911$	0,246	0,00%
	3ª Fase	97	$f_m = 0,1151\rho - 4,4144$	0,242	1,02%
	4ª Fase	93	$f_m = 0,1153\rho - 4,6229$	0,283	4,12%
	Total retirados				5,10%
Sapelli	1ª Fase	98	$f_m = 0,0519\rho + 62,45$	0,031	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 0,0401\rho + 70,324$	0,019	0,00%
	3ª Fase	95	$f_m = 0,0157\rho + 87,818$	0,004	3,06%
	4ª Fase	91	$f_m = 0,0181\rho + 86,688$	0,006	4,21%
	Total retirados				7,14%

E.1.2 Correlação velocidade do ultrassom (v) com massa volúmica (ρ)

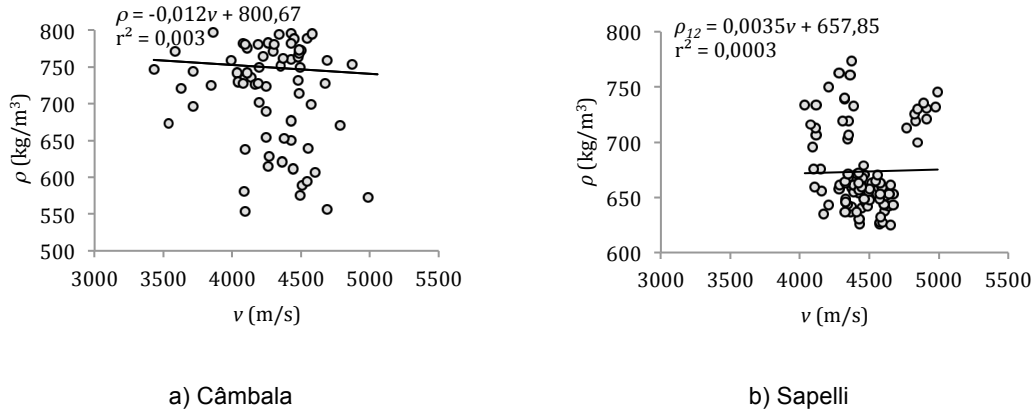


Figura E.9: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, sem correção do teor em água (1ª Fase).

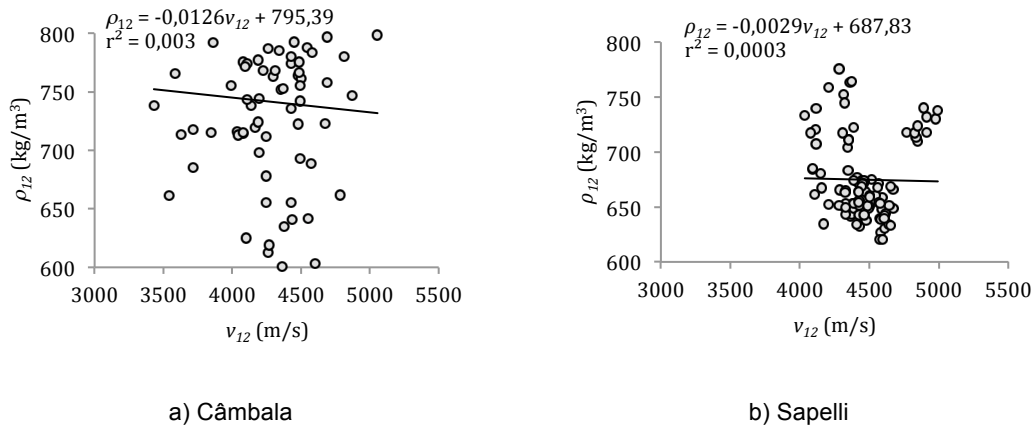


Figura E.10: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

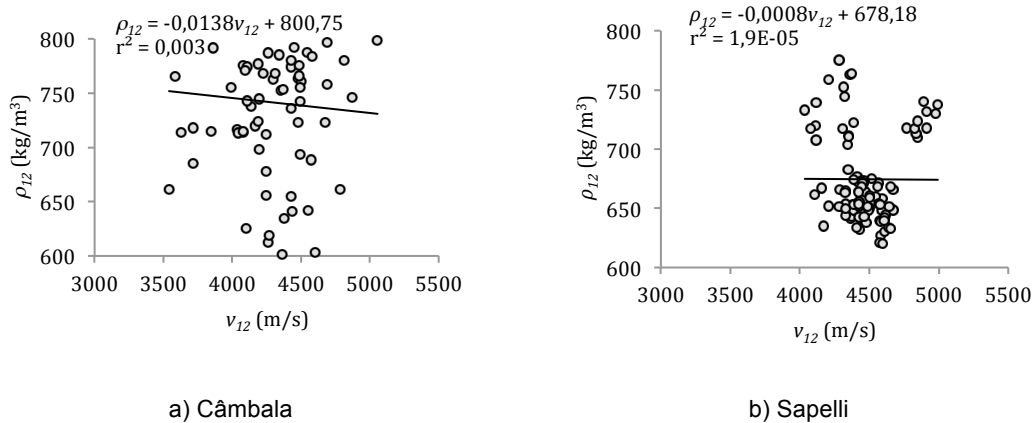


Figura E.11: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

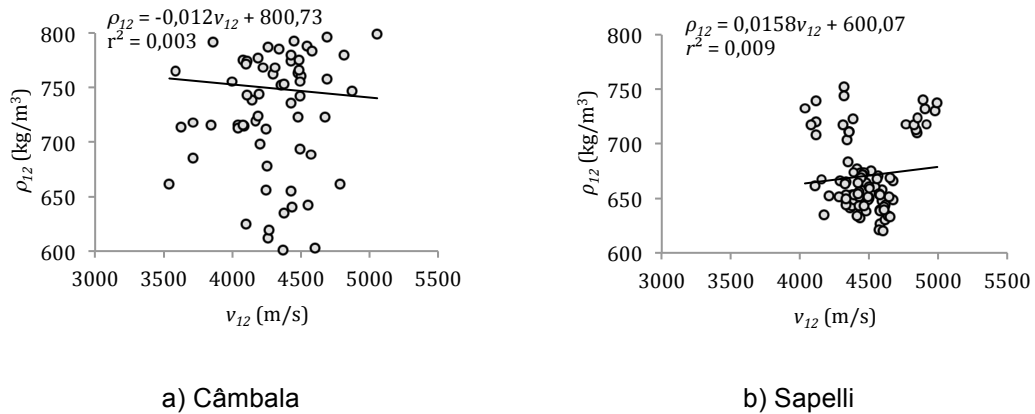


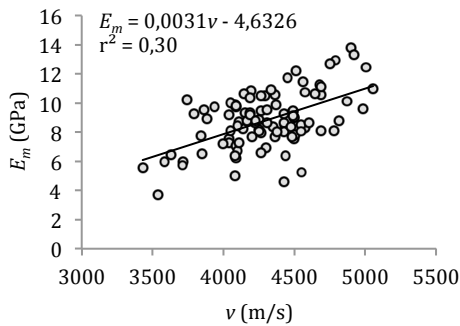
Figura E.12: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a massa volúmica, após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.3: Resumo da correlação entre velocidade de ultrassom (v) e massa volúmica (ρ) em provetes extraídos.

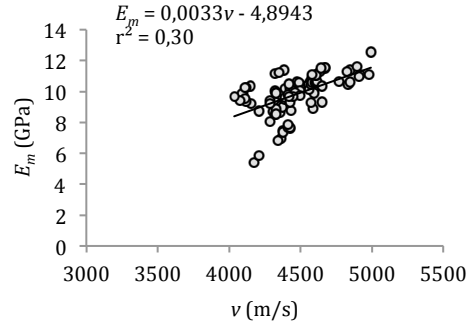
Espécie	$v - \rho$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $v - \rho$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$\rho = -0,012v + 800,67$	0,003	0,00%
	2ª Fase	98	$\rho = -0,0126v + 795,39$	0,003	0,00%
	3ª Fase	97	$\rho = 0,0138v + 800,75$	0,003	1,02%
	4ª Fase	93	$\rho = -0,012v + 800,73$	0,003	4,12%
	Total retirados				5,10%
Sapelli	1ª Fase	98	$\rho = 0,0035v + 657,85$	0,000	0,00%
	2ª Fase	98	$\rho = -0,0029v + 687,83$	0,000	0,00%
	3ª Fase	95	$\rho = -0,00085v + 678,18$	0,000	3,06%
	4ª Fase	91	$\rho = 0,0158v + 600,07$	0,009	4,21%
	Total retirados				7,14%

E.1.3 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m e f_m

E.1.3.1 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com E_m

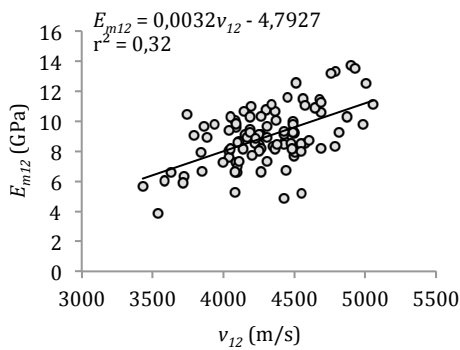


a) Câmbala

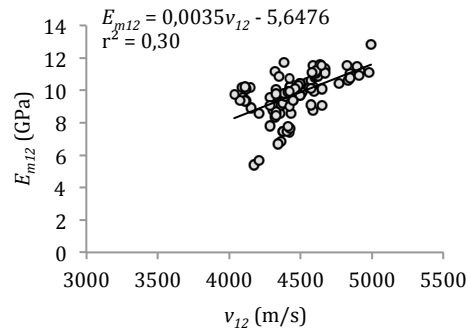


b) Sapelli

Figura E.13: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e o E_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

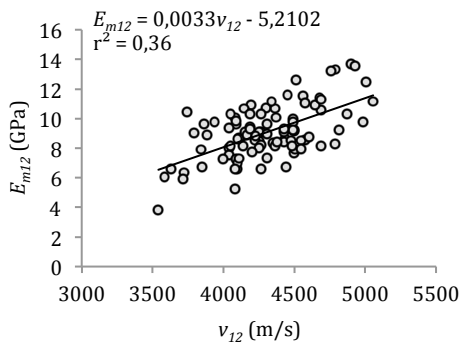


a) Câmbala

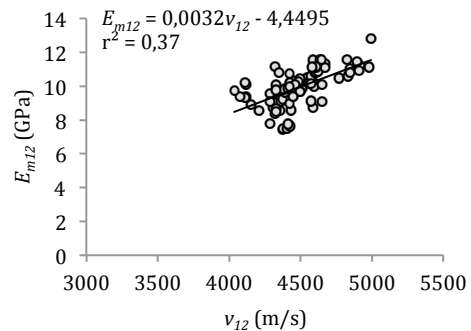


b) Sapelli

Figura E.14: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

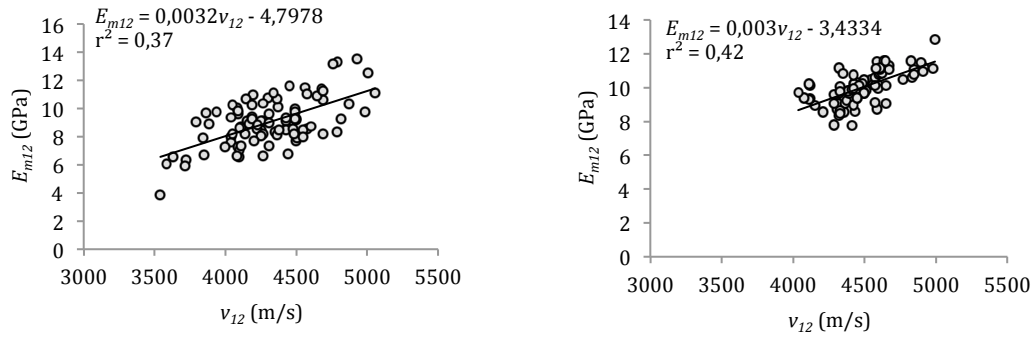


a) Câmbala



b) Sapelli

Figura E.15: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala

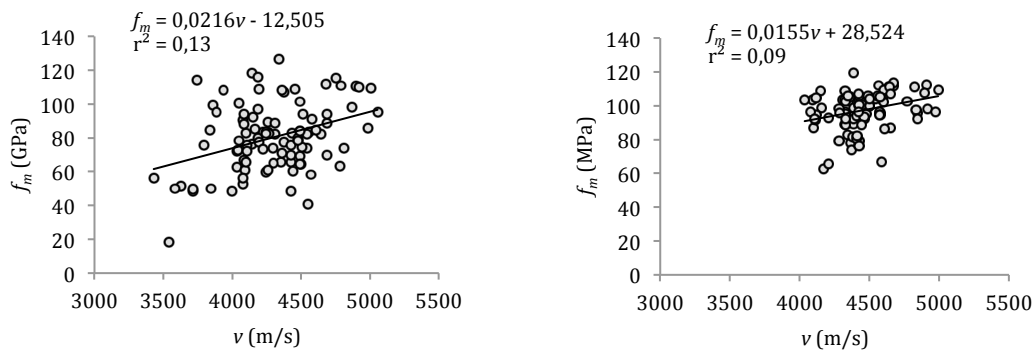
b) Sapelli

Figura E.16: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e E_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.4: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e E_m em provetes extraídos.

Espécie	$v - E_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $v - E_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$E_m = 0,0031v - 4,6326$	0,298	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,0032v - 4,7927$	0,316	0,00%
	3ª Fase	95	$E_m = 0,0033v - 5,2102$	0,358	3,06%
	4ª Fase	91	$E_m = 0,0032v - 4,7978$	0,361	4,21%
	Total retirados				7,14%
Sapelli	1ª Fase	98	$E_m = 0,0033v - 4,8943$	0,296	0,00%
	2ª Fase	98	$E_m = 0,0035v - 5,6476$	0,301	0,00%
	3ª Fase	89	$E_m = 0,0032v - 4,4495$	0,368	9,18%
	4ª Fase	85	$E_m = 0,003v - 3,41818$	0,418	4,49%
	Total retirados				13,27%

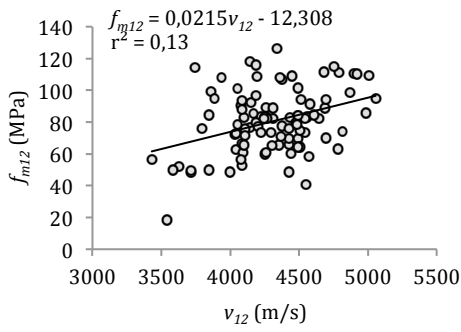
E.1.3.2 Correlação da velocidade do ultrassom (v) com f_m



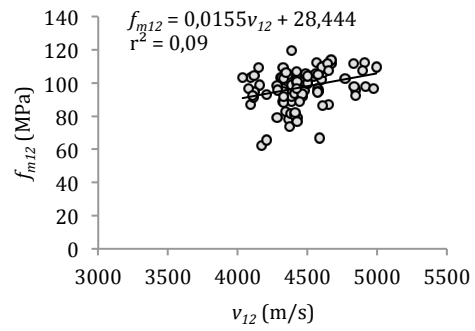
a) Câmbala

b) Sapelli

Figura E.17: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e a f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

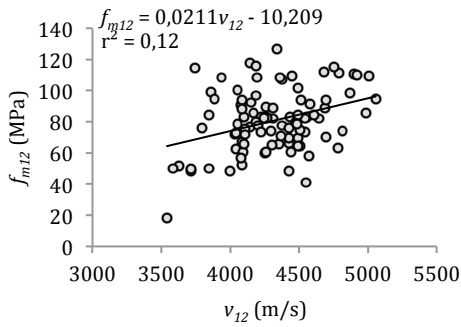


a) Câmbala

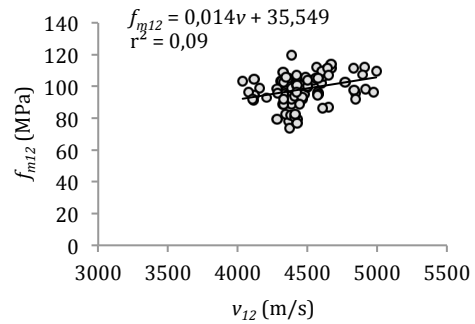


b) Sapelli

Figura E.18: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

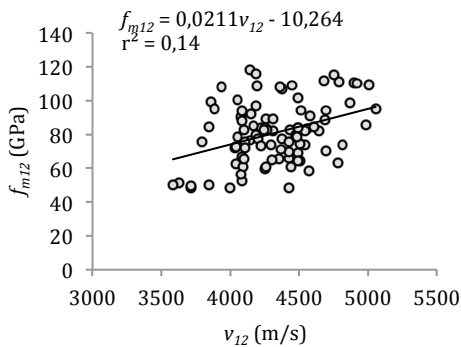


a) Câmbala

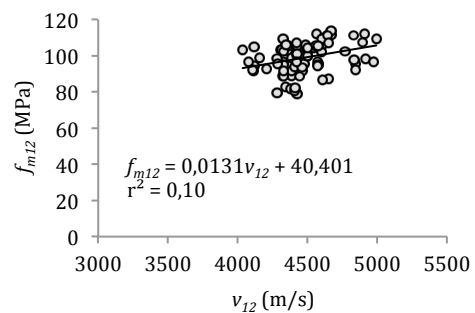


b) Sapelli

Figura E.19: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).



a) Câmbala



b) Sapelli

Figura E.20: Correlação entre as propriedades da velocidade de ultrassom e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.5: Resumo da correlação entre velocidade do ultrassom (v) e f_m em provetes extraídos.

Espécie	$v - f_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $v - f_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$f_m = 0,0216v - 12,505$	0,132	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 0,0215v - 12,308$	0,131	0,00%
	3ª Fase	97	$f_m = 0,0211v - 10,209$	0,118	1,02%
	4ª Fase	93	$f_m = 0,0211v - 10,264$	0,139	4,12%
	Total retirados				5,10%
Sapelli	1ª Fase	98	$f_m = 0,0155v + 28,524$	0,087	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 0,0155v + 28,444$	0,087	0,00%
	3ª Fase	92	$f_m = 0,014v + 35,549$	0,091	6,12%
	4ª Fase	88	$f_m = 0,0131v + 40,401$	0,104	4,35%
	Total retirados				10,20%

E.1.4 Correlação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) com f_m

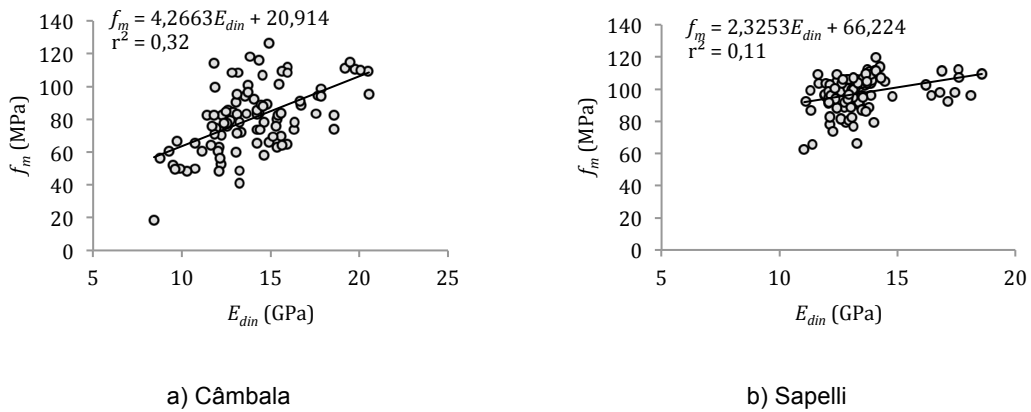


Figura E.21: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , sem correção do teor em água (1ª Fase).

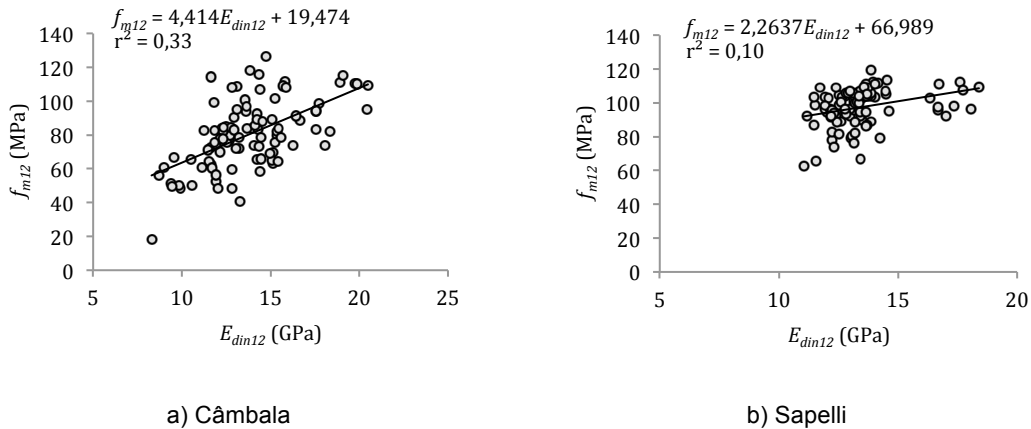


Figura E.22: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12% (2ª Fase).

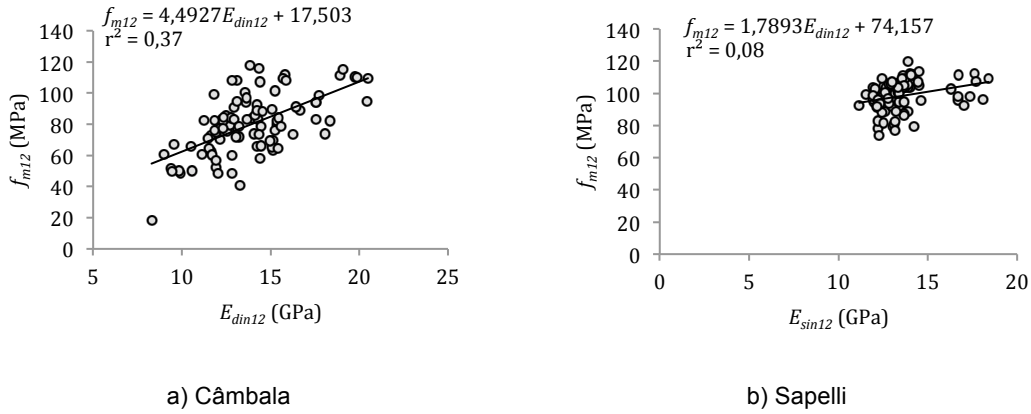


Figura E.23: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, e após exclusão dos valores anormais (3ª Fase).

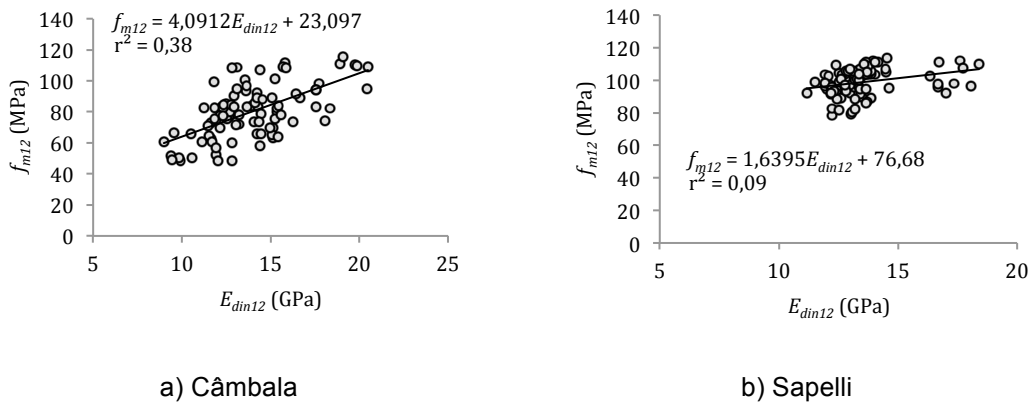


Figura E.24: Correlação entre as propriedades E_{din} e f_m , após correção do teor em água para 12%, após exclusão dos valores anormais, e após exclusão dos 5% dos valores mais afastados da recta de regressão linear da fase anterior (4ª Fase).

Tabela E.6: Resumo da correlação entre E_{din} e f_m em provetes extraídos.

Espécie	$E_{din} - f_m$	Número de provetes	Expressão de correlação linear: $E_{din} - f_m$	r^2	% de valores retirados entre Fases
Câmbala	1ª Fase	98	$f_m = 4,2663E_{din} + 20,914$	0,316	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 4,414E_{din} + 19,474$	0,334	0,00%
	3ª Fase	95	$f_m = 4,4927E_{din} + 17,503$	0,367	3,06%
	4ª Fase	91	$f_m = 4,0912E_{din} + 23,097$	0,377	4,21%
	Total retirados				7,14%
Sapelli	1ª Fase	98	$f_m = 2,3253E_{din} + 66,224$	0,108	0,00%
	2ª Fase	98	$f_m = 2,2637E_{din} + 66,989$	0,100	0,00%
	3ª Fase	92	$f_m = 1,7893E_{din} + 74,157$	0,082	6,12%
	4ª Fase	88	$f_m = 1,6395E_{din} + 76,68$	0,090	4,35%
	Total retirados				10,20%

E.2 Propriedades de mesoprovetes

E.2.1 Correlação do módulo de elasticidade à tração ($E_{t,0}$) com a tensão de rotura à tração ($f_{t,0}$), em mesoprovetes

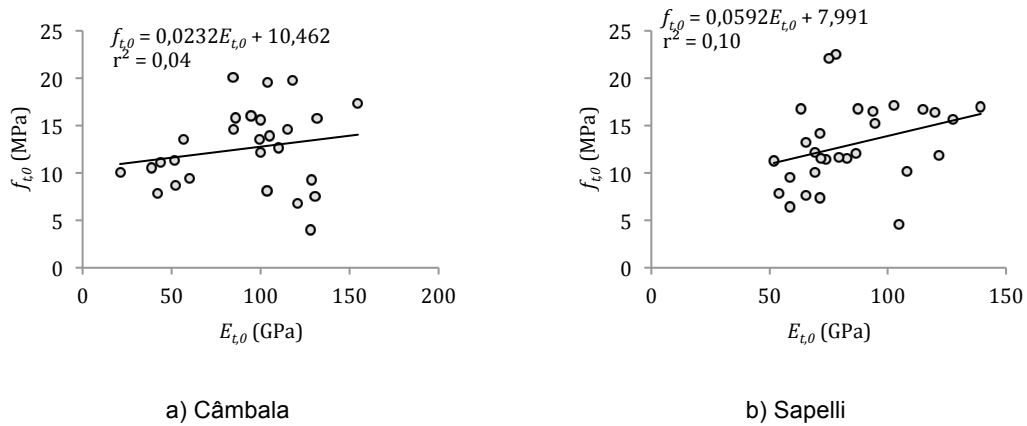


Figura E.25: Correlação entre o módulo de elasticidade à tração no sentido das fibras ($E_{t,0}$), e a tensão de rotura à tração no sentido das fibras ($f_{t,0}$).

E.3 Correlações entre vigas e mesoprovetes

E.3.1 Correlação para aferição das f_{mv} das vigas

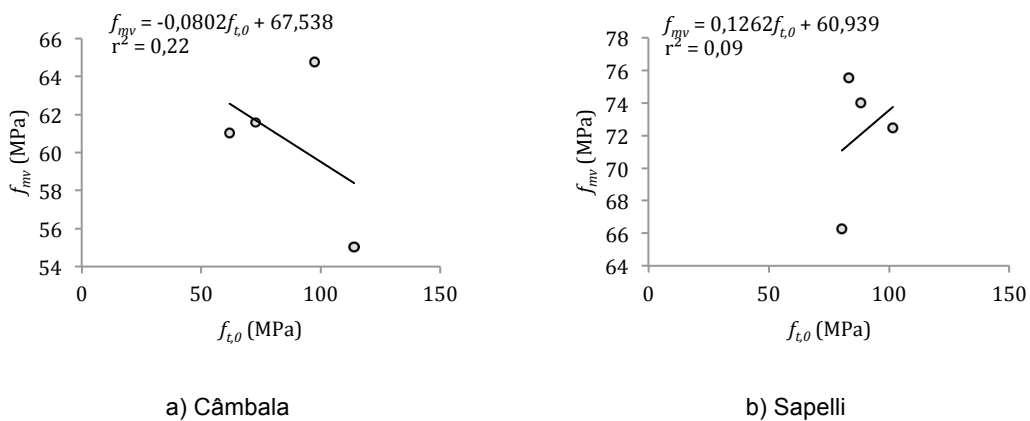
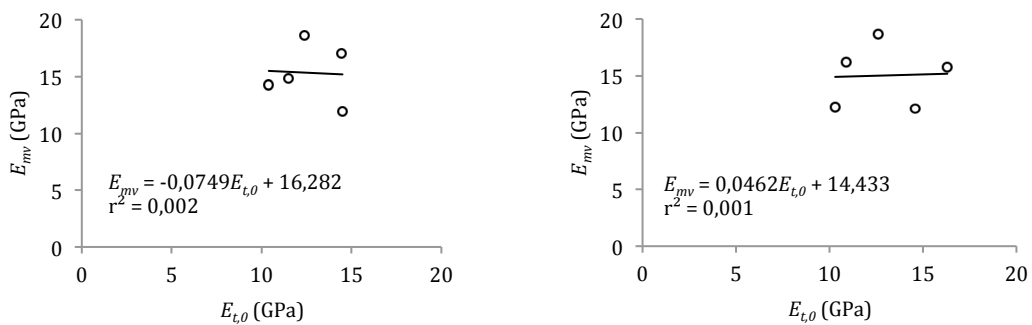


Figura E.26: Correlação entre a tensão de rotura à tração nos mesoprovetes ($f_{t,0}$) e a tensão de rotura à flexão das viga (f_{mv}).

Tabela E.7: Resultados das tensões de rotura à flexão por viga (f_{mv}), e das médias das tensões de rotura à tração dos mesoprovetes ($f_{t,0}$), por viga.

Espécie		Vigas f_{mv} (MPa)	Mesopro. $f_{t,0}$ (MPa)	$(f_{t,0}-f_{mv})/f_{t,0}$ %
Câmbala	N.º Viga			
	2	61,58	72,70	15%
	3	64,76	97,24	33%
	4	55,02	114,00	52%
	5	61,07	61,90	1%
	Média	60,60	86,46	25%
	C.V.	7%	27%	86%
	Min. / Max.	55,02 / 64,76	61,90 / 114,00	1% / 52%
Sapelli	N.º Viga			
	2	66,30	80,40	18%
	3	73,98	88,10	16%
	4	75,57	83,30	9%
	5	72,50	101,60	29%
	Média	72,09	88,35	18%
	C.V.	6%	11%	45%
	Min. / Max.	66,30 / 75,57	80,40 / 101,60	9% / 29%

E.3.2 Correlação para aferição das E_{mv} das vigas



a) Câmbala

b) Sapelli

Figura E.27: Correlação entre o módulo de elasticidade à tração dos mesoprovetes ($E_{t,0}$) e o módulo de elasticidade à flexão das viga (E_{mv}).

Tabela E.8: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão por viga (E_{mv}), e das médias dos módulos de elasticidade à tração dos mesoprovets (E_{mp}), por viga.

Espécie		Vigas E_{mv} (GPa)	Mesoprov. $E_{i,0}$ (GPa)	$(E_{i,0}-E_{mv})/E_{i,0}$ %	
Câmbala	N.º Viga	1	14,24	10,40	-37%
		2	18,64	12,40	-50%
		3	17,00	14,46	-18%
		4	11,97	14,50	17%
		5	14,82	11,50	-29%
	Média	15,19	15,33	12,65	
	C.V.	22%	17%	14%	
	Min.	11,65	11,97	10,40	
	Max.	18,48	18,64	14,50	
	Sapelli	N.º Viga	1	12,13	14,60
2			12,31	10,30	-20%
3			16,24	10,90	-49%
4			18,69	12,60	-48%
5			15,78	16,30	3%
Média		14,60	15,03	12,94	
C.V.		23%	19%	19%	
Min.		9,94	12,13	10,30	
Max.		17,93	18,69	16,30	