

João Rodrigues Dias

CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE PINHO MANSO

CARACTERIZATION
OF THE STONE PINE TIMBER

Dissertação de Mestrado em Construção Metálica e Mista,
orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias

Coimbra, Setembro, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

João Rodrigues Dias

CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE PINHO MANSO

CARACTERIZATION OF THE STONE PINE TIMBER

Dissertação de Mestrado em Construção Metálica e Mista,
orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 25 de Setembro de 2017

RESUMO

O pinheiro manso é uma árvore gimnospérmica da divisão conífera detentor de uma madeira branda, com propriedades de rigidez semelhantes à do pinho bravo e resistências à flexão ligeiramente inferiores a este.

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre as propriedades mecânicas da madeira de pinho manso, *pinus pinea*, em particular, a tensão de rotura à flexão, o módulo de elasticidade de flexão com recurso a ensaios dinâmicos (MTG) e ensaios mecânicos.

Além das propriedades mecânicas foram também determinadas as propriedades físicas da massa volúmica e do teor de água. É, ainda, proposta uma fórmula de correlação entre os valores do módulo de elasticidade em flexão obtido pelo ensaio MTG e a tensão de rotura do provete.

O trabalho elabora uma comparação dos resultados da classificação visual com os resultados obtidos nos ensaios MTG e mecânicos.

Palavras chave: Pinho Manso; *Pinus Pinea*; MTG; Classificação Visual; Madeira para construção.

ABSTRACT

The stone pine is gymnosperm tree from the coniferae division holder of a softwood with rigidity properties similar to the maritime pine and resistance to bending slightly below this.

In this work the mechanical properties of the stone pine, *pinus pinea*, bending strength, modulus of elasticity are evaluated using dynamic tests (MTG) and mechanical tests.

Besides the mechanical properties, the physical properties of the density and the moisture content are checked. It is also proposed a correlation formula between the values of modulus of elasticity in flexion obtained by the MTG test and the bending strength of the specimen.

The work elaborates a comparison of the results of the visual classification with the results obtained in the MTG and mechanical tests.

Keywords: Stone Pine; *Pinus Pinea*; MTG; Visual Classification; Timber for construction.

AGRADECIMENTOS

Ao professor doutor Alfredo Dias pela possibilidade que me deu em realizar o estudo sobre esta espécie que tanto interesse económico e social tem na minha comunidade local.

Ao André Marques e ao André Dias que possibilitaram a realização dos ensaios, trabalhando incansavelmente para que fosse possível realizar todos os testes e ensaios em apenas dois dias.

À minha família pelo apoio que me deu e ajuda suprimo a minha falta enquanto me tive que dedicar a este estudo. E em especial ao meu filho João que poderá um dia ver o seu mundo melhorado pela pequena contribuição que estudo dará.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	i
AGRADECIMENTOS	ii
ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABELAS	vi
SIMBOLOGIA	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho e objetivos	1
1.2. Descrição sumária do trabalho proposto	2
1.3. Organização do documento	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. A árvore	3
2.2. A madeira	8
2.3. Ensaio não destrutivos	11
2.3.1. Classificação visual.....	11
2.3.2. Radiografia.....	11
2.3.3. Perfuração Controlada	12
2.3.4. Humidímetro	12
2.3.5. Ultrassons.....	13
2.3.6. Vibração.....	14
2.4. Normas aplicáveis	15
3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	16
3.1. Caracterização da Amostra	16
3.2. Classificação Visual	18
3.2.1. Nós	19
3.2.2. Fio	23

3.2.3.	Taxa de crescimento	24
3.2.4.	Fendas	25
3.2.5.	Descaio.....	26
3.2.6.	Empenos.....	27
3.2.7.	Bolsas de Resina e casca inclusa	28
3.2.8.	Medula	28
3.2.9.	Lenho Juvenil.....	28
3.2.10.	Resultados da Classificação Visual.....	29
3.3.	Ensaio Dinâmico	30
3.3.1.	Procedimento do ensaio	30
3.3.1.	Resultados obtidos no ensaio	32
3.4.	Ensaio Mecânico	33
3.4.1.	Procedimento do ensaio	33
3.4.2.	Aquisição de resultados	36
3.4.1.	Resultados.....	40
3.5.	Massa volúmica e teor de água.....	42
3.5.1.	Procedimento do ensaio	43
3.5.1.	Aquisição de resultados	44
3.5.1.	Resultados.....	45
3.6.	Discussão dos Resultados.....	47
3.6.1.	Comparação entre Ensaio Dinâmico e Mecânico	47
3.6.2.	Propriedades mecânicas da madeira para estruturas.....	52
3.6.2.1.	Tensão característica de rotura em flexão.....	52
3.6.2.2.	Módulo de elasticidade global em flexão.....	54
3.6.2.3.	Massa volúmica característica.....	55
3.6.2.4.	Outras propriedades obtidas indirectamente	56
3.6.3.	Comparação dos resultados com as classes da norma EN 338:2003.....	57
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
4.1.	Conclusões.....	58

4.2. Trabalho Futuro	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática da árvore, das folhas e dos frutos (Costa 1995)	3
Figura 2 – Esboço ecológico do Pinheiro Manso – sombreada zona de desenvolvimento natural (Costa 1995)	5
Figura 3 - Presença do Pinheiro manso em Território Nacional 2010 (Santos 2015)	6
Figura 4 – Evolução das áreas ocupadas por espécie [área em hectares] (Uva 2013)	7
Figura 5 – Distribuição dos usos do solo em Portugal no ano de 2010 (Uva 2013)	7
Figura 6 – Madeira de pinho manso (Carvalho 1997)	8
Figura 7 – Madeira de pinho manso ampliada (Carvalho 1997)	9
Figura 8 – À esquerda equipamento para efectuar ensaio de radiografia; à direita exemplo de uma radiografia (Botelho Júnior 2006)	12
Figura 9 – À esquerda o corpo central do resitógrafo e à direita a impressora portátil (Botelho Júnior 2006)	12
Figura 10 – Humidímetro de contacto à esquerda e humidímetro de agulhas à direita	13
Figura 11 – Aparelho de ensaio de ultrassons Sylvatest trio (fotografia do fabricante)	13
Figura 12 – À esquerda equipamento MTG; À direita software de input e output do MTG	14
Figura 13 – Mapa com a proveniência da amostra a encarnado (Fundação Wikimedia 2017)	17
Figura 14 – Temperatura média anual (IPMA 2017)	18
Figura 15 – Precipitação media acumulada anual (IPMA 2017)	18
Figura 16 – Classificação Köppen-Geiger (IPMA 2017)	18
Figura 17 – Representação da projecção dos nós na secção transversal (Cruz, et al. 2000)	20
Figura 18 - Nós agrupados (esquerda) e nós isolados (direita) (Cruz, et al. 2000)	21
Figura 19 – Esquema de classificação dos nós nas peças	21
Figura 20 – Representação dos nós na projecção da área da secção transversal	22
Figura 21 – Medição do fio da peça (Cruz, et al. 2000)	24
Figura 22 – Medição da taxa de crescimento (Cruz, et al. 2000)	24
Figura 23 – Comprimento de fendas (Cruz, et al. 2000)	26
Figura 24 – Medição do descaio (Cruz, et al. 2000)	26
Figura 25 – Medição de empenos (Cruz, et al. 2000)	27
Figura 26 – Resultados da classificação visual por classe de qualidade	29
Figura 27 – Pesagem do provete	30

Figura 28 – Medição do teor de água com um humidímetro de contacto	31
Figura 29 – Medição do teor de água com um humidímetro de agulhas	31
Figura 30 – Inserção dos valores dimensionais e do teor de água no software	31
Figura 31 – Realização do ensaio MTG	32
Figura 32 – Distribuição da frequência do valor do modulo de elasticidade por flexão global no ensaio dinâmico	33
Figura 33 – Marcação prévia do provete com os locais de apoio e de fixação dos defletómetros	34
Figura 34 – Proвете no local de ensaio com todo o equipamento montado para ensaio do módulo de elasticidade	34
Figura 35 – Proвете no local de ensaio para ensaio de rotura por flexão	35
Figura 36 – Proвете durante ensaio de rotura por flexão	35
Figura 37 – Esquema para a determinação do módulo de elasticidade local de flexão (EN 408+A1 2010)	36
Figura 38 – Esquema para a determinação do módulo de elasticidade global de flexão (EN 408+A1 2010)	37
Figura 39 – Gráfico força-deslocamento apresentado na norma (EN 408+A1 2010)	37
Figura 40 – Esquema de montagem dos defletómetros	38
Figura 41 – Esquema de montagem do provete para a determinação da tensão de rotura por flexão (EN 408+A1 2010)	40
Figura 42 – Ensaio para a determinação do modulo de elasticidade de flexão global	41
Figura 43 - Ensaio para a determinação do modulo de elasticidade de flexão local	42
Figura 44 – Ensaio para a determinação da tensão de rotura à flexão	42
Figura 45 – Corte de uma amostra do provete com uma espessura superior a 20mm	43
Figura 46 – Medição volumétrica da amostra e pesagem	44
Figura 47 – Colocação da amostra na estufa	44
Figura 48 – Amostra para a avaliação do teor de água (EN 13183-1 2002)	45
Figura 49 – Comparação entre os diferentes ensaios, módulo de elasticidade à flexão	48
Figura 50 - Comparação entre os diferentes ensaios, tensão de rotura à flexão	48
Figura 51 – Correlações entre módulo de elasticidade e tensão de rotura	49
Figura 52 – Correlação entre a densidade e a tensão de rotura	50
Figura 53 - Correlação entre o teor de água e a tensão de rotura	50
Figura 54 – Valores de tensão de rotura estimados	52
Figura 55 – Gráfico para obtenção do k_s , onde A é o valor k_s e B é o numero de espécimes na amostra	53
Figura 56 – Perfil fotográfico dos provetes 1-2	61
Figura 57 – Perfil fotográfico dos provetes 2-2	62

Figura 58 – Gráficos força-deslocamento dos ensaios dos módulos de elasticidade	63
Figura 59 – Gráficos dos ensaios de rotura	66
Figura 60 – cálculo do coeficiente k_s	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas da Madeira de Pinho Manso e Pinho Bravo (Carvalho 1997)	
10	
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas da Madeira de Pinho Manso (Carvalho 1997)	10
Tabela 3 – Dimensões da Amostra	17
Tabela 4– Cálculo dos índices KAR	23
Tabela 5 – Cálculo da taxa de crescimento	25
Tabela 6 – Medição do descaio na amostra	27
Tabela 7 – presença de lenho juvenil	28
Tabela 8 – Resultados da classificação visual	29
Tabela 9 – Resultados do Ensaio MTG	32
Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios	41
Tabela 11 – Medições de teor de água e massa volúmica	46
Tabela 12 – Comparação dos valores de teor de água medidos no ensaio e nos humidímetros	
47	
Tabela 13 – Resultados dos ensaios mecânicos, dinâmicos e classificação qualitativa	47
Tabela 14 – Resultados dos ensaios	49
Tabela 15 – Correlações lineares múltiplas	51
Tabela 16 – Valores estimados para tensão de rotura por flexão	51
Tabela 17 – Cálculo do Módulo de elasticidade corrigido para o teor de água de referência	54
Tabela 18 – Densidade corrigida para o teor de água de referência	55
Tabela 19 – Comparação entre as propriedades mecânicas do pinho manso com as propriedades da classe C24	57

SIMBOLOGIA

f – Frequência própria de vibração;

$f_{c,0,k}$ – Tensão característica de rotura à compressão na direcção das fibras;

$f_{c,90,k}$ – Tensão característica de rotura à compressão na direcção perpendicular às fibras;

f_m – Tensão de rotura em flexão;

$f_{m,k}$ – Tensão característica de rotura à flexão;

$f_{t,0,k}$ – Tensão característica de rotura em tração na direcção das fibras;

$f_{t,90,k}$ – Tensão característica de rotura à tração, na direcção perpendicular às fibras;

$f_{v,k}$ – Tensão característica de rotura por corte;

k – Constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira;

l – Comprimento;

m_w – Massa antes da colocação na estufa;

m_0 – Massa depois da colocação na estufa;

w – Teor de água;

\bar{E} – Módulo de elasticidade global em flexão;

$E_{90,mean}$ – Módulo de flexão na direcção perpendicular às fibras;

$E_{0,05}$ – Módulo de elasticidade característico para o percentil de 5%;

E_{dyn} – Módulo de elasticidade dinâmico;

$E_{m,l}$ – Módulo de elasticidade local;

$E_{mg,din}$ – Módulo de elasticidade à flexão dinâmico;

E_{static} – Módulo de elasticidade estático;

G_{mean} – Módulo de distorção.

V_w – Volume antes da colocação na estufa;

ρ – Massa volúmica;

ρ_k – Massa volúmica característica;

ρ_w – Massa volúmica para o teor de água w ;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do trabalho e objetivos

O trabalho que agora se introduz visa uma avaliação preliminar da madeira de Pinheiro Manso, *Pinus Pinea*, para aplicações estruturais.

O pinheiro manso é a segunda espécie de pinheiro mais importante em Portugal. Representando cerca de 20% da área total de povoamentos de pinheiros no país, com cerca de 175 mil hectares. É também uma das espécies que mais tem crescido nas últimas décadas, com um crescimento de 46% desde 1995 (Uva 2013).

Esta espécie é cultivada com o objetivo principal da produção de pinhas para pinhão. No entanto, para a gestão dos pinhais e como forma de os manter produtivos é necessário efetuar alguns cortes. A produção de pinhas requer a realização de desbastes de árvores sempre que as copas das árvores se toquem (Evaristo 2008). Deste modo, é entendível que mesmo quando o pinheiro manso é utilizado na produção do pinhão haverá sempre um subproduto económico que é a madeira de pinho manso das árvores removidas. Se juntarmos a este facto a existência de povoamentos vocacionados apenas para a madeira em zonas cujas condições climáticas não potenciam a produção de pinhão, verificamos que existe uma abundante disponibilidade de madeira de pinho manso.

Esta madeira, embora abundante em algumas regiões do país não se encontra classificada nem estudada como a madeira do pinheiro bravo. Fazendo com que esta esteja a ser utilizada de uma forma sistemática em utilizações com pouco valor acrescentado, como seja a produção de estilha. Esta utilização é um desaproveitamento de um recurso com tão boas propriedades.

Se repararmos nos pinhais mansos existentes, com facilidade vemos árvores com mais de 20m de altura e troncos com diâmetros superiores a 1.0m, árvores que, com alguma probabilidade, no final do corte são transformadas em pequenos fragmentos para serem queimadas em sistemas de aquecimento. Paralelamente, o país continua a importar grandes quantidades de madeira que é utilizada na construção.

O presente trabalho tem como objetivo efetuar uma caracterização das propriedades mecânicas da madeira de pinho manso, visando a sua aplicação na construção civil.

É, ainda, objetivo deste trabalho correlacionar as propriedades mecânicas do módulo de elasticidade à flexão e tensão de rotura estimadas por ensaios dinâmicos com recurso ao MTG com as propriedades medidas com recurso a ensaios mecânicos. O ensaio MTG, depois de calibrado para a madeira de Pinho Manso poderá possibilitar a classificação dos lotes de peças desta madeira segundo as classes de resistência da norma EN338 e com isso possibilitar a aplicação deste material em obras de construção civil.

Ao longo do presente trabalho aparecem referências e comparações com a madeira de pinho bravo. Esta facto acontece porque existem bastantes semelhanças entre as duas espécies, e dado

o uso generalizado da madeira de pinho bravo, esta encontra-se bastante bem estudada e caracterizada. Assim, o conhecimento existente sobre a madeira do pinheiro bravo é claramente uma mais valia significativa na análise dos resultados obtidos.

1.2. Descrição sumária do trabalho proposto

A madeira do pinheiro manso é uma madeira classificada como resinosa (softwood na literatura anglosaxónica), no entanto, é uma madeira que apresenta uma rigidez semelhante à rigidez do pinho bravo, sendo flexível, mas com rigidez não muito reduzida. A sua resistência em flexão é inferior à resistência do pinho bravo (Carvalho 1997).

No que diz respeito à retração a madeira de pinho manso é pouco retrátil comparada com outras madeiras nacionais, como seja o pinho bravo, é por esta razão e pela disponibilidade de encontrar peças com curvaturas ligeiras utilizada há séculos na construção naval (Costa 1995).

Nos capítulos seguintes serão apresentados os ensaios efectuados a uma amostra de madeira de pinho manso bem como discutidos os resultados obtidos.

Destes ensaios fazem parte ensaios mecânicos destrutivos para a obtenção da tensão de rotura em flexão, ensaios mecânicos para a obtenção do módulo de elasticidade em flexão segundo a direcção das fibras e ensaios não destrutivos como o ensaio MTG, a medição do teor de água, massa volúmica e classificação visual da amostra segundo a norma NP4305.

O trabalho é completando com um conjunto de análises de correlações entre propriedades obtidas pelos ensaios mecânicos e dinâmicos de forma a se poder criar uma equação que correlacione o ensaio dinâmico com as propriedades mecânicas, permitindo uma classificação das amostras de madeira de pinho manso segundo a norma EN338.

1.3. Organização do documento

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. No primeiro é feita uma introdução ao tema abordado no trabalho e explicado o conteúdo do documento.

No segundo capítulo é feito um pequeno levantamento do conhecimento existente sobre o tema tratado no presente trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados os ensaios laboratoriais realizados e os resultados obtidos nestes ensaios.

O quarto capítulo é referente às conclusões principais do trabalho, ficando o último capítulo para as referências bibliográficas .

Existem ainda os anexos que poderão ser consultados no fim do documento.

2. Revisão bibliográfica

O presente capítulo visa rever de forma sucinta algum do conhecimento disponível sobre os diferentes tipos de ensaios.

Nos pontos seguintes são introduzidos os principais conceitos que relevam para o estudo que se pretende realizar. São apresentados alguns aspectos relativos à árvore e à madeira que se podem encontrar na bibliografia existente. As propriedades físicas e mecânicas apresentadas neste capítulo serão comparadas com as propriedades que se obtiveram nos ensaios realizados.

São apresentados diferentes ensaios não destrutivos de caracterização das propriedades da madeira.

Por fim, neste capítulo também é resumido o enquadramento de normas que regem a classificação das peças de madeira maciça, a aplicação destas peças em obras de construção civil e o projeto de estruturas de madeira.

2.1. A árvore

O pinheiro manso, de seu nome científico *Pinus pinea* L. (1753), é uma árvore monoica, rústica, que atinge uma altura de 25m, com copa bastante densa, arredondada, tipo chapéu de sol. Esta configuração resulta do facto do crescimento terminal ser dominado pelo lateral das ramificações à sua volta, pormenor que se acentua com a idade. O tronco é limpo em grande parte, ramificado no cimo, com ramos patentes e ascendentes. Ritidoma de cor castanho-acinzentado, espesso, desprendendo-se em finas placas e deixando descobertos espaços de cor vermelho-alaranjada (Costa 1995).



Figura 1 – Ilustração esquemática da árvore, das folhas e dos frutos (Costa 1995)

As suas folhas são aciculares em grupos de dois, flexíveis, agudas, verdes, suaves ao tacto, com canais de resina submarginais, rijas e ligeiramente torcidas, mas menos rijas e menores que as folhas do pinheiro bravo (Costa 1995).

O pinheiro manso apresenta maiores exigências em relação ao solo que o pinheiro bravo. Prefere terrenos graníticos e siliciosos, são e profundos com subsolo fresco e alguma percentagem de argila.

É uma árvore que se desenvolve melhor em solos não alcalinos, evitando solos muito compactos e excessivamente húmidos, delgados e os areais muito soltos da orla marítima.

A árvore resiste ao vento, mercê da sua raiz profundante. Sendo a sua área de implantação geográfica no Sul, desde o litoral até aos 1000m de altitude e, no Norte, a altitudes inferiores, devido à sua sensibilidade ao frio e pouca resistência à neve. No Norte encontram-se bons povoamentos até 200m de altitude (Costa 1995).

É menos litoral que o pinheiro bravo, mas, todavia, suporta melhor o calor, a secura atmosférica e é mais resistente ao fogo.

Prefere zonas de precipitação anual de 500-800mm mas, contudo, pode vegetar quando a precipitação for de 300 a 400mm.

Frutifica abundantemente depois dos 15 a 20 anos, atingindo maiores produções aos 40-50 anos. A partir dos 100 anos a exploração do fruto não é rentável.

O crescimento faz-se com relativa rapidez, em especial, no que se refere ao desenvolvimento da copa e engrossamento do tronco.

Tem uma longevidade superior à do pinheiro bravo, sendo o seu termo de explorabilidade, para o fruto, aos 100 anos. Forma povoamentos puros e vegeta isoladamente. (Costa 1995)

Como se pode verificar no mapa seguinte quase todo o território continental português apresenta apetência ecológica para esta espécie. As excepções, são o Sul interior por ser muito seco e as zonas de maior altitude devido à sensibilidade da espécie ao frio.

Na região do Sul interior, embora ecologicamente a espécie não tenha desenvolvimento natural por não frutificar, existem povoamentos com o intuito da produção de madeira. Esta produção é possível porque a árvore se desenvolve em locais de precipitações baixas.

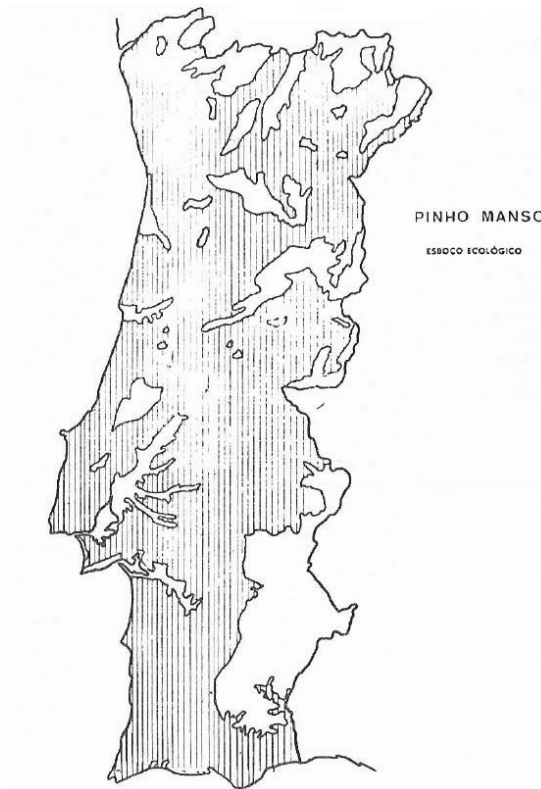


Figura 2 – Esboço ecológico do Pinheiro Manso – sombreada zona de desenvolvimento natural (Costa 1995)

Como se verifica na figura 3, embora a espécie se possa desenvolver em quase todo o território nacional, esta ocupa apenas uma pequena parcela do território. Tendo, por isso, um potencial de instalação muito grande.

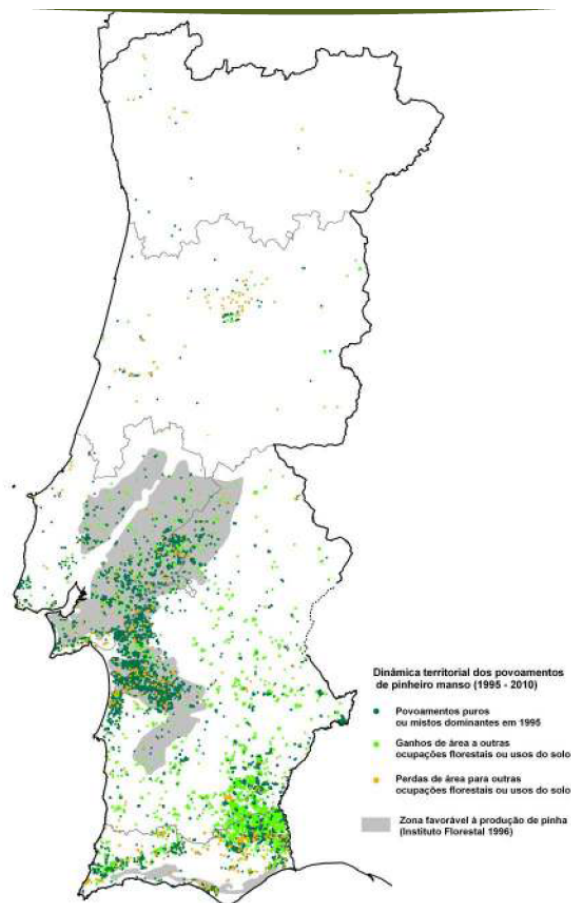


Figura 3 - Presença do Pinheiro manso em Território Nacional 2010 (Santos 2015)

O pinheiro manso aparece espontaneamente ou cultivado de Norte a Sul do país com especial preponderância ao Sul do rio Tejo, no vale do Sado e bacia do Guadiana.

A região envolvente à foz do Sado, nos concelhos de Alcácer do Sal e Grândola é a região onde se encontra maior predominância do pinheiro manso, essencialmente em matas estremes (pinhais mansos) ou em consociação com o pinhal bravo.

O pinheiro manso embora partilhe a apetência por boa parte dos locais onde o pinheiro manso se desenvolve tem ainda a capacidade de vegetar em regiões quentes e secas, como sejam as charnecas áridas ao Sul do Tejo, onde o pinheiro bravo não se desenvolve (Costa 1995).

Os povoamentos de pinheiro manso representam 20% do total de povoamentos de pinheiros em Portugal. Sendo o rendimento económico dos povoamentos de pinhal bravo essencialmente da madeira e os povoamentos do pinhal manso do pinhão. Como se verá neste estudo, a madeira de pinho manso também tem apetência para construção, podendo a sua madeira ser valorizada por esse facto.

Havendo a valorização da madeira do pinheiro manso, se juntarmos ao rendimento do fruto o rendimento da madeira, do ponto de vista económico, o pinheiro manso poderá ser mais competitivo que o pinheiro bravo.

Podemos, pois, assistir em algumas décadas ao aumento da área cultivada de pinheiro manso em comparação com a área cultivada de pinheiro bravo. Tendência que já se verifica, como pode se pode comprovar na figura seguinte.

Na figura 4 apresenta-se a evolução da área ocupada pelas principais espécies de arvores em Portugal desde 1995.

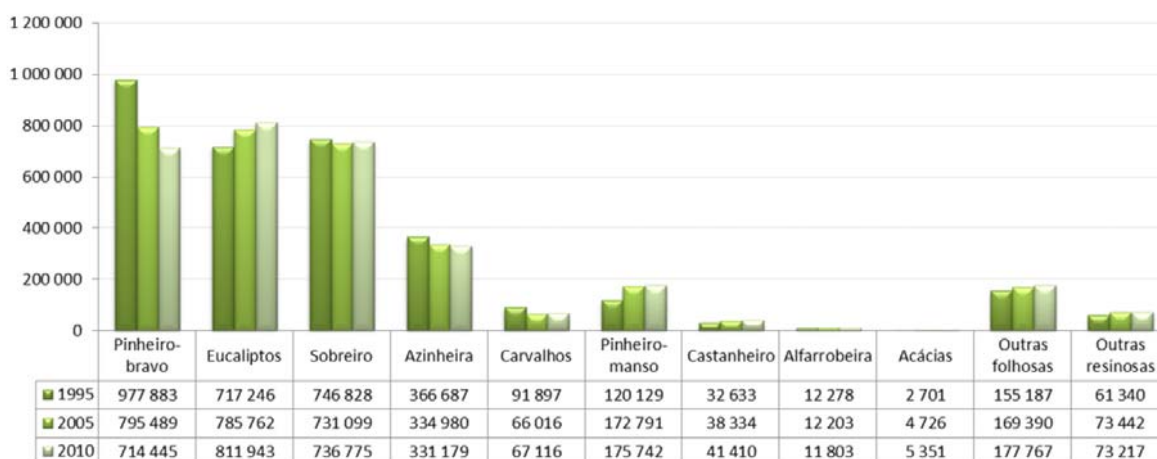


Figura 4 – Evolução das áreas ocupadas por espécie [área em hectares] (Uva 2013)

No território nacional há ainda a constatação pelas estatísticas oficiais que existe uma grande percentagem de solos que são utilizados como pastagens ou apenas ocupados com matos. Estes solos, salvo as limitações à implantação de pinheiros mansos em altitude já abordadas, podem ser reconvertidos em pinhais mansos. Esta tendência já se verifica no Sul do país em especial na zona do vale do Guadiana (Santos 2015).

Na figura 5 reproduz-se a distribuição do solo português pelos diferentes tipos de usos.

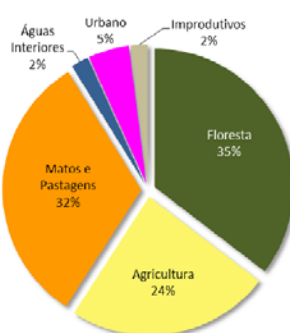


Figura 5 – Distribuição dos usos do solo em Portugal no ano de 2010 (Uva 2013)

A valorização da madeira do pinheiro manso através da sua aplicação em usos com maior valor acrescentado, pode ser uma forma de incentivar a ocupação de terrenos que neste momento estão subaproveitados.

Relativamente ao pinheiro manso importa ainda referir que apesar da cultura do pinheiro manso no nosso país ser dirigida na maioria dos casos para a produção de pinhas. A produção de pinhas obriga a desbastes constantes dos povoamentos, já que, quando as copas das árvores se entrelaçam a produção de pinhas reduz-se de forma acentuada. Assim, é constante ao longo do tempo de vida de um povoamento a necessidade de abate de árvores. Fazendo com que mesmo nos povoamentos homogêneos destinados à produção de pinhas haja uma constante disponibilidade de madeira. Esta, devido à idade avançada de uma percentagem de árvores abatidas permite também que existam sempre toros de elevado comprimento e diâmetro, reforçando uma oferta de matéria prima para a fileira da madeira para construção.

2.2. A madeira

A madeira do pinheiro manso apresenta um cerne distinto, castanho-avermelhado ou vermelho intenso, de contorno regular, definido e abundante representando 54% da secção transversal.

Apresenta um borne branco-rosado ou dourado. A medula é medianamente volumosa e estrelada. As camadas de crescimento são muito distintas, observando-se a marcação da zona de outono mais escura, de contorno e desenvolvimento regulares e de espessura variável com as condições de crescimento, finas a medianamente finas (2-3mm). O grão da madeira é grosseiro e a textura é desigual, trata-se, portanto, de uma madeira heterogênea. O fio é, em geral, recto e o veio conferido pelas camadas de crescimento (veio listado). (Carvalho 1997)



Figura 6 – Madeira de pinho manso (Carvalho 1997)

As camadas de crescimento são muito distintas. A zona de outono distinta, em geral com mais de 10 fiadas tangenciais de células e com uma espessura normalmente inferior a 1/3 da largura do anel. Apresenta uma transição mais ou menos brusca do lenho inicial para o final, sendo o parênquima indistinto. Os raios são indistintos à vista desarmada, e fusiformes contendo um canal de resina, distinguíveis com a ampliação nos planos transversal e radial, aqui com malhas brilhantes cruzando o fio. Os canais de resina presentes longitudinalmente e transversalmente, sendo longitudinalmente muito grandes, dispostos na zona de outono, frequentemente junto ao seu limite externo, solitários na maior parte das vezes ou, em menos vezes, em grupos de 2. São numerosos, cerca de 30/cm², distintos a olho nu quer na superfície transversal quer na tangencial quer na radial, onde se assemelham a traços mais escuros paralelos ao fio. Os canais de resina transversais são bastante mais pequenos, são distintos com ampliação e por vezes mesmo à vista desarmada (Carvalho 1997).

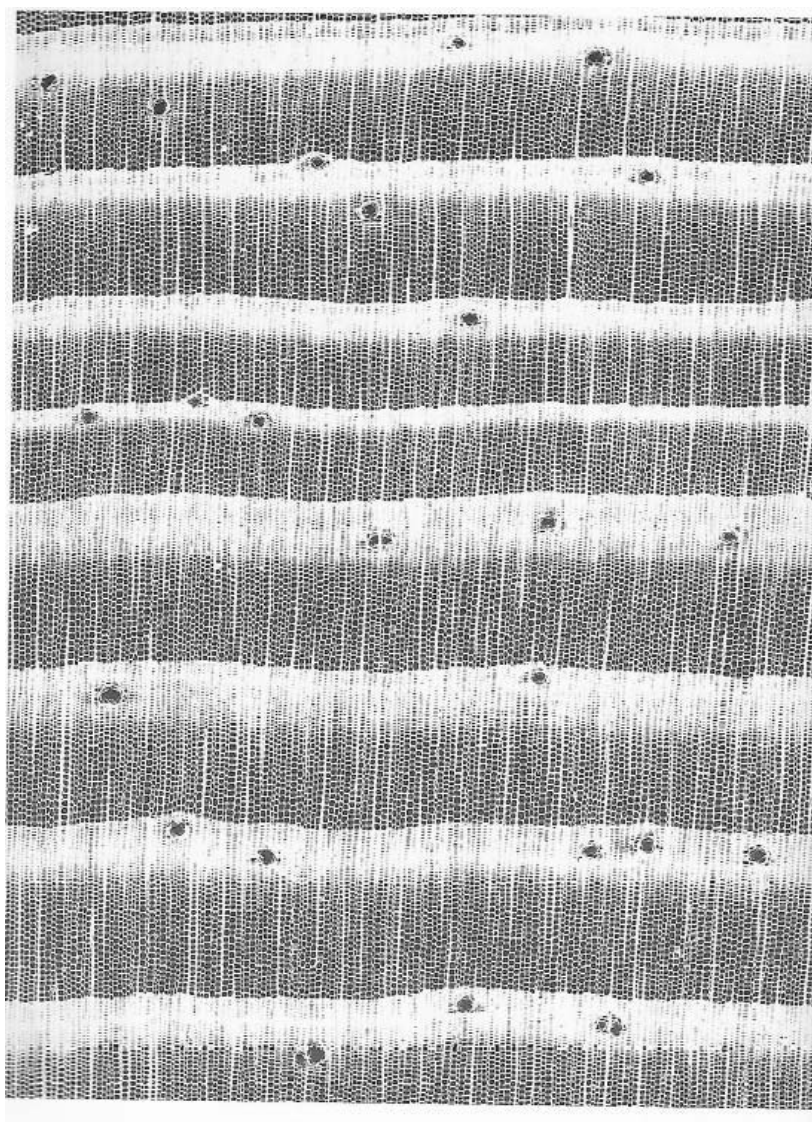


Figura 7 – Madeira de pinho manso ampliada (Carvalho 1997)

Do ponto de vista das suas propriedades físicas e mecânicas a madeira de pinho manso apresenta algumas semelhanças com a madeira de pinho bravo, sendo estas propriedades comparadas nas tabelas 1 e 2. A madeira de pinho manso é uma madeira moderadamente pesada, sendo, por norma, ligeiramente mais leve que a de pinho bravo; é retráctil mas menos que a do bravo, o que a torna mais estável e mais adequada para aplicação na construção civil; é moderadamente dura, sendo neste aspecto igual ao pinho bravo.

No que se refere às propriedades mecânicas, o pinho manso apresenta tensões de rotura sempre inferiores aos valores do pinho bravo, no entanto a rigidez de flexão, que é uma característica muito condicionante para aplicação da madeira em estrutura, é igual. Fazendo com que na maioria das aplicações da madeira em estruturas, estas duas espécies de pinheiros possam ser aplicadas com poucas diferenças no dimensionamento das peças.

Tabela 1 – Propriedades físicas da Madeira de Pinho Manso e Pinho Bravo (Carvalho 1997)

	Pinho Manso		Pinho Bravo (Leiria)	
Densidade (H=12%) (kg/m ³)	550	Moderadamente Pesada	640	Pesada
Retracção (%)				
Volumétrica total	12.0	Retráctil	16.7	Muito retráctil
Tangencial total	6.8	Fraca	10.1	Média
Radial total	4.0	Média	6.0	Média
Coefficiente de retracção	0.42	Nervosa	0.57	Nervosa
Anisotropia (ϵ_l / ϵ_r)	1.7	Média	1.7	Média
Teor de saturação das fibras (%)	29	Normal	30	Normal
Dureza (CM/JANKA-kgf)	2.16/330	Moderadamente dura / Alta	2.2/330	Moderadamente dura / Alta

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas da Madeira de Pinho Manso (Carvalho 1997)

	Pinho Manso		Pinho Bravo	
Compressão axial				
Tensão de rotura (N/mm ²)	38.6	Média	69.9	Forte
Flexão Estática				
Tensão de rotura (N/mm ²)	99.0	Fraca	155.0	Média
Rigidez (índice l/f)	26	Elástica	26	Elástica
Fendimento				
Tensão de rotura (N/mm ²)	14	Fraca / Físsil	17	Média
Tracção Transversal				
Tensão de rotura (N/mm ²)	22	Fraca / Aderente	29	Média
Flexão dinâmica				
Coefficiente de resiliência (kgm/cm ²)	0.22	Pouco resistente ao choque	0.40	Pouco resistente ao choque

2.3. Ensaios não destrutivos

A madeira é um material proveniente de um ser vivo que é a árvore. As árvores são influenciadas ao longo do seu crescimento por fenómenos climatéricos como seja a precipitação e a temperatura, fenómenos genéticos e sofrem ainda alterações pela interação com o meio exterior, seja da acção de animais, outras árvores ou mesmo do ser humano. Todos estes factores externos e internos contribuem para uma variação das propriedades da madeira. Deste modo, a aplicação da madeira enquanto material de construção é condicionada pelo conhecimento que se possui das peças de madeira a utilizar.

Importa referir que para aplicação da madeira como material estrutural, as propriedades mecânicas do material devem ser conhecidas à partida, antes da sua aplicação em obra. Esta necessidade levou ao desenvolvimento de diferentes métodos que visam a selecção de peças que cumpram as características estruturais de projeto.

Estes métodos, como forma de não comprometerem a utilização futura das peças, baseiam-se em ensaios ou observações não destrutivas.

Em seguida apresentam-se alguns tipos de ensaios não destrutivos que permitem avaliar várias propriedades da madeira para aplicação na construção.

2.3.1. Classificação visual

Os primeiros ensaios desenvolvidos ao longo do tempo, foram os ensaios de classificação visual, de que é exemplo a classificação visual indicada pela norma NP 4305:1995 desenvolvida pelo LNEC, esta forma de avaliação das propriedades da madeira por ter sido aplicada à amostra estudada será explicada em detalhe mais à frente neste documento. (Cruz, et al. 2000)

2.3.2. Radiografia

Existem depois outros ensaios que requerem equipamentos mais sofisticados, sejam por exemplo os ensaios com recurso a radiografia de raios-X ou raios gama.

A radiografia é uma técnica que permite a construção de imagens bidimensionais dos elementos de madeira. As peças são submetidas a feixes de radiação que ao serem afetados pelas diferentes densidades da madeira constroem uma imagem do interior da peça. Inicialmente utilizavam-se raios-x, mas dada a perigosidade destes para a saúde dos operadores e dado o elevado preço, foram substituídos por raios gama, que além deste facto possibilitam ainda a construção de uma imagem em tempo real. Esta técnica é muito adequada para avaliar a existência de vazios ou discontinuidades no interior das peças (Botelho Júnior 2006).

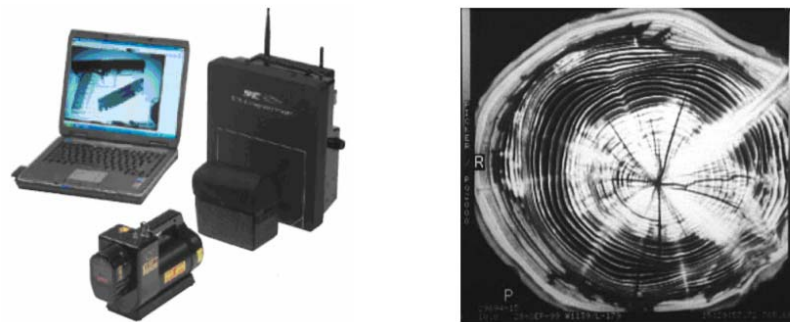


Figura 8 – À esquerda equipamento para efectuar ensaio de radiografia; à direita exemplo de uma radiografia (Botelho Júnior 2006)

2.3.3. Perfuração Controlada

Outro dos ensaios que permite a caracterização de propriedades da madeira é o ensaio por meio da perfuração controlada, também chamado de resistógrafo. Este equipamento perfura as peças de madeira medindo a sua resistência à perfuração. O equipamento possui uma agulha de 1.5mm de diâmetro com 3.0mm de diâmetro na extremidade e o equipamento vai medindo a resistência à penetração desta agulha. O equipamento não fornece valores para o módulo de elasticidade ou resistência à rotura, mas é correlacionável com a densidade, sendo possível a partir deste verificar a existência de zonas de menor resistência no interior de peças (Botelho Júnior 2006).



Figura 9 – À esquerda o corpo central do resistógrafo e à direita a impressora portátil (Botelho Júnior 2006)

2.3.4. Humidímetro

Outro dos ensaios que é necessário efectuar para a caracterização de uma peça de madeira é o ensaio para a determinação do teor de água. Este, ou é efectuado com o recurso a um provete retirado da peça que é pesado e depois colocado numa estufa, o que na maioria das vezes não é possível, ou é medido com recurso a um humidímetro.

Existem no mercado diferentes tipos de humidímetros, sendo os dois principais os indutivos ou de contacto e os resistivos ou de agulhas. Estes aproveitam as propriedades elétricas da água como forma de contabilizar o teor de água presente na madeira. Diferindo na forma de contabilização, os de contacto medem por indução e os humidímetros de agulhas medem pela

resistência elétrica. De uma forma geral os humidímetros de agulhas são mais precisos por efectuarem leituras em camadas mais interiores das peças.



Figura 10 – Humidímetro de contacto à esquerda e humidímetro de agulhas à direita

2.3.5. Ultrassons

O ensaio com recurso a ultrassons é um dos ensaios mais utilizados na caracterização das peças de madeira. Este permite correlacionar o módulo de elasticidade da peça com a velocidade de propagação de ondas sonoras. O ensaio consiste na exposição da peça a um conjunto de ondas sonoras na gama dos ultrassons e correspondente leitura na extremidade oposta. A velocidade com que a excitação sonora atravessa a peça e a forma da onda resultante permite detectar descontinuidades no material e inferir sobre a existência de defeitos.



Figura 11 – Aparelho de ensaio de ultrassons Sylvatest trio (fotografia do fabricante)

O módulo de elasticidade estático de uma peça pode ser calculado a partir do ensaio de ultrassons a partir da seguinte expressão. (Divós e Tanaka 2005)

$$E_{static} = E_{dyn} \cdot k = v^2 \cdot \rho \cdot k$$

Sendo:

E_{static} – Módulo de elasticidade estático

E_{dyn} – Módulo de elasticidade dinâmico

v – Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas

ρ – Massa volúmica da peça

k – Constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira

2.3.6. Vibração

Outros dos ensaios relevantes para a caracterização das propriedades mecânicas da madeira é o ensaio de vibração. Este consiste na leitura da frequência própria de vibração de uma peça longilínea submetida a uma excitação mecânica. O método permite a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico conforme a expressão que a seguir se apresenta, baseando a sua formulação na derivada da equação diferencial fundamental da teoria de Euler. (Divós e Tanaka 2005)

$$E_{static} = E_{dyn} \cdot k = 4 \cdot f^2 \cdot l^2 \cdot \rho$$

Sendo:

E_{static} – Módulo de elasticidade estático

E_{dyn} – Módulo de elasticidade dinâmico

f – Frequência própria de vibração da peça

l – Comprimento da peça

ρ – Massa volúmica da peça

O equipamento Timber Grader MTG permite a obtenção directa do módulo de elasticidade dinâmico da peça, bastando para isso introduzir um conjunto de dados como as dimensões da peça, o peso e o teor de água. Este equipamento detecta a frequência própria da peça, desde que esta se encontre simplesmente apoiada, e é ao mesmo tempo o excitador da própria peça.



Figura 12 – À esquerda equipamento MTG; À direita software de input e output do MTG

2.4. Normas aplicáveis

A aplicação de madeiras na construção civil está sujeita ao cumprimento de um conjunto de normas. As normas que guiam o dimensionamento de estruturas de madeira são a EN 1995-1-1:2004 que indica as regras gerais para estruturas de edifícios, tendo ainda a parte 1-2 que apresenta as regras para a verificação de segurança à acção do fogo. No que se refere à concepção existe ainda a EN 1995-2:2004 que apresenta as regras de concepção de pontes de madeira. As normas de projeto atrás referidas são complementadas com a norma EN 338:2003 que nos dá as classes de resistência da madeira estrutural. Esta norma apresenta, ainda, as expressões que permitem calcular outras propriedades mecânicas da madeira a partir da densidade, modulo de elasticidade à flexão e tensão de rotura em flexão.

Do ponto de vista da determinação das características de uma peça de madeira existe a norma EN408:2010+A1 que apresenta de forma exaustiva os detalhes a observar nos ensaios mecânicos para a obtenção dos módulos de rigidez e tensões de rotura. Esta norma é complementada pela EN 384:2004 que permite a determinação dos valores característicos das propriedades a partir dos ensaios efetuados.

Se a forma de determinação das características do provete for através da inspeção visual a norma que enquadra essa classificação será a pré-norma prEN 1310:1995. Esta define as regras para a avaliação dos defeitos de peças serradas e em toros. Mais concretamente para o Pinho Bravo nacional existe a NP4305 que define os parâmetros de contabilização de defeitos da madeira serrada classificado a madeira deste pinheiro nas classes de qualidade E e EE. As classes de qualidade obtidas pela classificação visual podem ser convertidas em classes de resistência utilizando a norma EN 1912:2004 que faz esta conversão.

Esta breve apresentação das normas relevantes para o estudo aqui apresentado é complementada com a norma EN13183-1:2002 que fornece o procedimento para a determinação do teor de água por secagem de provetes em estufa e a EN 14081-1:2005+A1:2011 Estruturas de madeira – Madeira com secção rectangular classificada segundo a resistência – Parte 1: Requisitos gerais que nos dá os requisitos gerais para a classificação de peças de madeira. Salienta-se a importância desta última norma, pois é seguindo as indicações desta norma que é possível efectuar a classificação e posterior marcação dos lotes para aplicação da madeira em obra.

Por fim, importa ainda referir a EN336 que nos indica os desvios admissíveis nas peças de madeira.

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Nos pontos seguintes será apresentada a amostra recolhida para os ensaios e serão apresentados os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos nesses ensaios.

Os ensaios realizados consistiram em: classificação visual da amostra segundo a NP 4305:1995, ensaios dinâmicos realizados com recurso ao equipamento MTG, ensaios mecânicos realizados com recurso a equipamento hidráulico, ensaios de caracterização da massa volúmica e teor de água realizados com recurso a equipamentos de medida e pesagem.

3.1. Caracterização da Amostra

A amostra utilizada no presente estudo é composta por 20 provetes de pinho manso com dimensões aproximadas de 50mm de largura, 70mm de altura e 1500mm de comprimento.

Esta amostra foi serrada para o estudo a partir de um conjunto de peças de pinheiro manso de maiores dimensões que já se encontravam na serração de Manuel Gonçalves em Grândola há aproximadamente 4 meses. Pretendeu-se garantir que a amostra apresentasse alguma variabilidade, de forma a ser mais representativa. Deste modo, preferiu-se que os provetes a ensaiar fossem retirados de diferentes elementos já serrados existentes na serração, garantido assim que estes seriam provenientes de diferentes árvores, e nestas, de diferentes partes da árvore.

A unidade onde os provetes foram serrados, é uma unidade de pequenas dimensões onde os equipamentos são tradicionais e a forma de controlo de dimensões é ainda manual. Isto explica alguma variação dimensional que se pode observar na amostra.

Na tabela 3 são apresentadas as dimensões dos diferentes provetes antes do início dos ensaios. É também apresentado o valor da massa de cada um dos provetes e a massa volúmica calculada nesse momento.

Tabela 3 – Dimensões da Amostra

Provete	Comprimento [mm]	largura				altura				Volume [mm ³]	Massa [kg]	Massa Volumica inicial [kg/m ³]
		b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	b _{medio} [mm]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h _{medio} [mm]			
1	1560	47.0	47.0	50.0	48	74.0	74.0	74.0	74	5541120	3.20	577.5
2	1428	48.5	49.0	50.0	49	71.5	70.0	73.0	72	5020015	3.18	633.5
3	1581	52.0	53.0	52.5	53	66.0	72.0	70.0	69	5754840	4.56	792.4
4	1580	52.0	52.5	51.5	52	65.0	71.0	70.0	69	5641653	4.78	847.3
5	1534	54.0	53.5	52.5	53	69.0	69.5	68.5	69	5645120	4.64	821.9
6	1557	47.5	49.0	49.0	49	73.5	73.5	72.0	73	5512559	3.42	620.4
7	1554	51.0	51.0	52.0	51	64.5	63.5	62.0	63	5052227	3.07	607.7
8	1523	47.0	52.0	50.0	50	65.0	54.5	66.5	62	4689825	3.30	703.7
9	1590	52.0	52.0	50.0	51	63.0	63.0	62.0	63	5114853	3.13	611.9
10	1587	49.0	50.0	50.0	50	70.5	70.0	68.5	70	5491196	3.54	644.7
11	1574	47.0	49.0	50.0	49	69.0	71.0	71.0	70	5387627	3.21	595.8
12	1535	51.0	52.0	49.5	51	70.5	71.5	70.0	71	5514061	3.45	625.7
13	1400	53.0	53.0	53.5	53	65.0	64.0	66.0	65	4838167	3.39	700.7
14	1376	53.0	53.5	53.0	53	70.0	70.5	70.0	70	5133206	3.87	753.9
15	1535	51.0	49.5	52.5	51	71.5	71.0	71.5	71	5584330	3.75	671.5
16	1455	45.0	40.5	40.0	42	72.0	70.0	74.0	72	4382460	3.93	896.8
17	1610	49.0	51.0	48.5	50	74.0	72.0	72.5	73	5804453	3.38	582.3
18	1550	55.0	55.0	54.5	55	74.0	73.0	73.0	73	6232722	3.43	550.3
19	1544	55.0	55.0	56.0	55	73.0	73.0	75.0	74	6293687	3.61	573.6
20	1536	46.0	43.0	48.0	46	71.0	71.5	70.5	71	4980224	4.02	807.2

As peças que deram origem aos provetes do ensaio são originárias de árvores do concelho de Grândola.



Figura 13 – Mapa com a proveniência da amostra a encarnado (Fundação Wikimedia 2017)

Do ponto de vista climático as árvores provêm de uma região de clima temperado húmido com Verão seco e quente, classificado como Csa pela classificação climática de Köppen-Geiger (Couto 2010). Como se poderá ver nas figuras seguintes o clima desta região é caracterizado por uma temperatura média do ar muito elevada para o país, cerca de 17°C e uma precipitação baixa da ordem dos 600mm/ano. (Couto 2010)

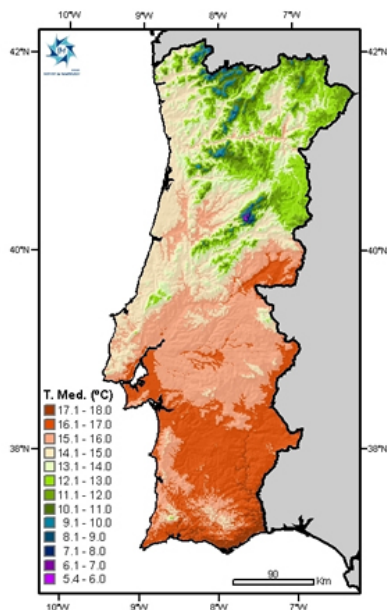


Figura 14 – Temperatura média anual (IPMA 2017)

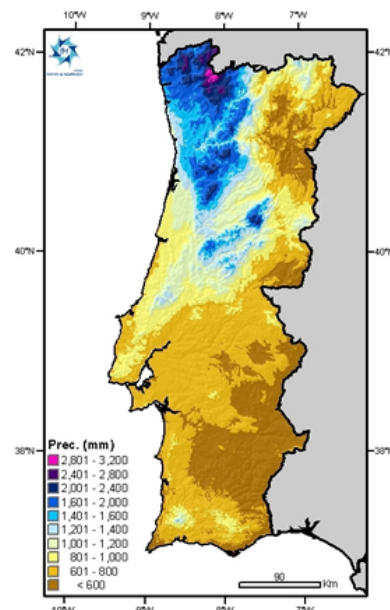


Figura 15 – Precipitação media acumulada anual (IPMA 2017)

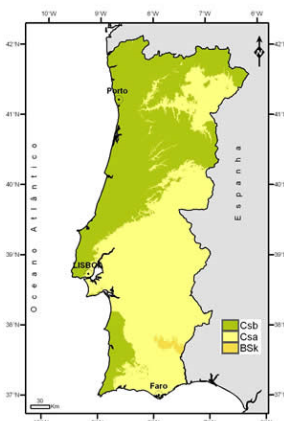


Figura 16 – Classificação Köppen-Geiger (IPMA 2017)

Do ponto de vista dos solos, os provetes são originários de árvores que cresceram em solos pobres, arenosos com pouca matéria orgânica, na zona da bacia hidrográfica do rio Sado. (CMG 2017)

3.2. Classificação Visual

Tendo em vista uma comparação das metodologias conhecidas de classificação com os resultados experimentais iniciou-se o procedimento de ensaio com a classificação visual das peças.

Dadas as semelhanças entre o pinheiro manso e o pinheiro bravo foi seguida a norma NP 4305:1995 Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para estruturas – Classificação Visual.

Esta classificação consiste na avaliação visual de 8 parâmetros que são conjugados de modo a obter uma classificação qualitativa das peças. Estes parâmetros avaliados são:

- os nós
- o fio da madeira
- a taxa de crescimento
- as fendas
- o descaio
- os empenos
- as bolsas de resina e casca inclusa
- a medula

Esta classificação produz o agrupamento das peças em 3 grupos, as peças de classe EE, as de classe E e as peças rejeitadas.

Nos pontos seguintes são apresentados e explicados cada um dos parâmetros que compõem a classificação visual.

3.2.1. Nós

Os nós influenciam negativamente a resistência das peças porque o material que os constitui apresenta uma orientação perpendicular ao desenvolvimento do fio da peça. Isto faz com a contribuição dos nós para a resistência, em especial para esforços de tração, seja praticamente nula.

O efeito dos nós é medido tendo em conta a área da secção transversal que estes ocupam. Os nós, que visualmente só podem ser observados nas faces das peças, são admitidos como cones que interseam a peça e que tem o seu vértice na medula.

Esta avaliação é feita por meio do índice de nós na secção total (KAR_{total}) e na secção marginal ($KAR_{marginal}$). Estes índices resultam do quociente da área ocupada pela projecção dos nós pela área da secção. A zona marginal trata-se do $\frac{1}{4}$ de área correspondente às fibras mais solicitadas (Cruz, et al. 2000).

Como se pode ver na figura seguinte as áreas da projecção dos nós na secção total e na secção marginal são divididas, daí resultando o coeficiente deste índice.

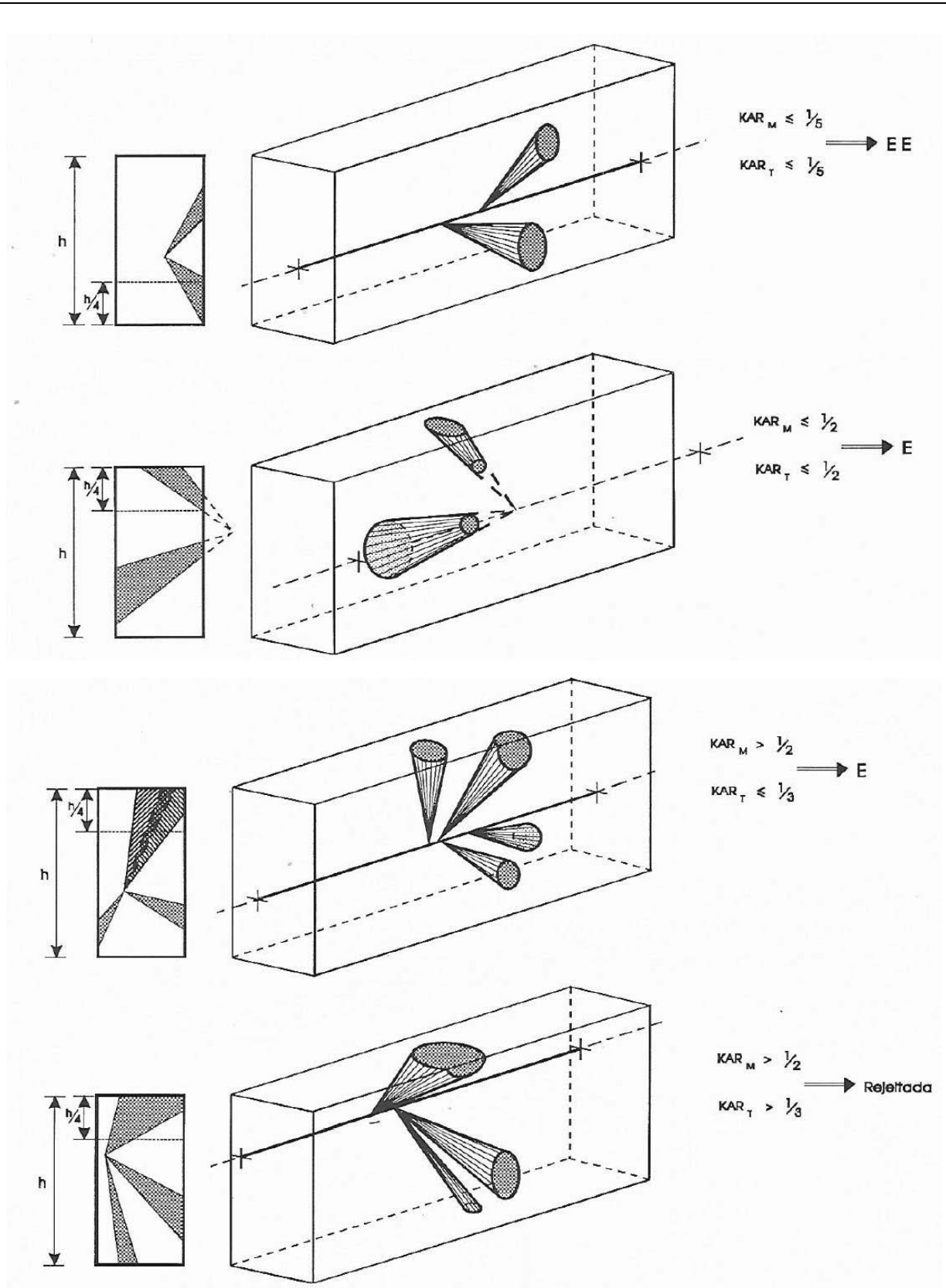


Figura 17 – Representação da projecção dos nós na secção transversal (Cruz, et al. 2000)

Há ainda que referir que se dois nós se encontrarem próximos a projeção de ambos deverá ser considerada para o cálculo do índice KAR. Caso estes se encontrem afastados este índice é definido pelo nó de KAR mais elevado.

A definição de proximidade ou afastamento é realizada pela norma segundo o critério de que em nós próximos o fio da madeira não recupera considerando-se por isso nós agrupados, enquanto que para nós afastados existe uma recuperação total do fio da madeira, considerando-se neste caso nós isolados.

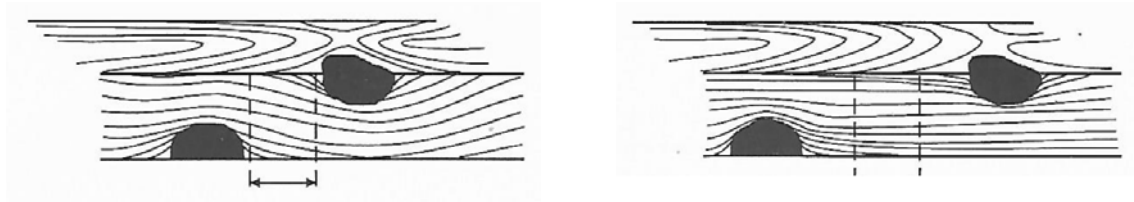
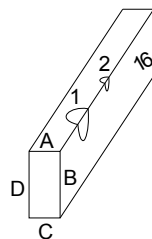


Figura 18 - Nós agrupados (esquerda) e nós isolados (direita) (Cruz, et al. 2000)

Tendo em vista esta classificação procedeu-se ao levantamento dos nós nas diferentes peças. Estes foram numerados de forma a identificar a peça a que diziam respeito, a face onde ocorriam e a distância ao eixo da peça e foi medida a sua dimensão em relação à dimensão da face onde ocorriam. A título de exemplo, é apresentada a figura 19, onde é sistematizada a medição das características dos nós de uma peça.



Nós:

16.1.A.25/51 a 0.22m do Eixo Do Ensaio

16.1.B.35/72

16.2.A.15/52 a 0.02m do Eixo Do Ensaio

16.2.B.19/73

Figura 19 – Esquema de classificação dos nós nas peças

Efetuada a numeração e o levantamento das características dos nós estes foram fotografados e só depois foram efetuados os ensaios de carregamento estático. O perfil fotográfico dos provetes é apresentado em anexo.

Recolhidos os dados dos diferentes nós, estes foram tratados efetuando-se o desenho das respetivas projeções nas secções. Na figura 20 são apresentados os desenhos esquemáticos realizados para o cálculo das áreas de nós.

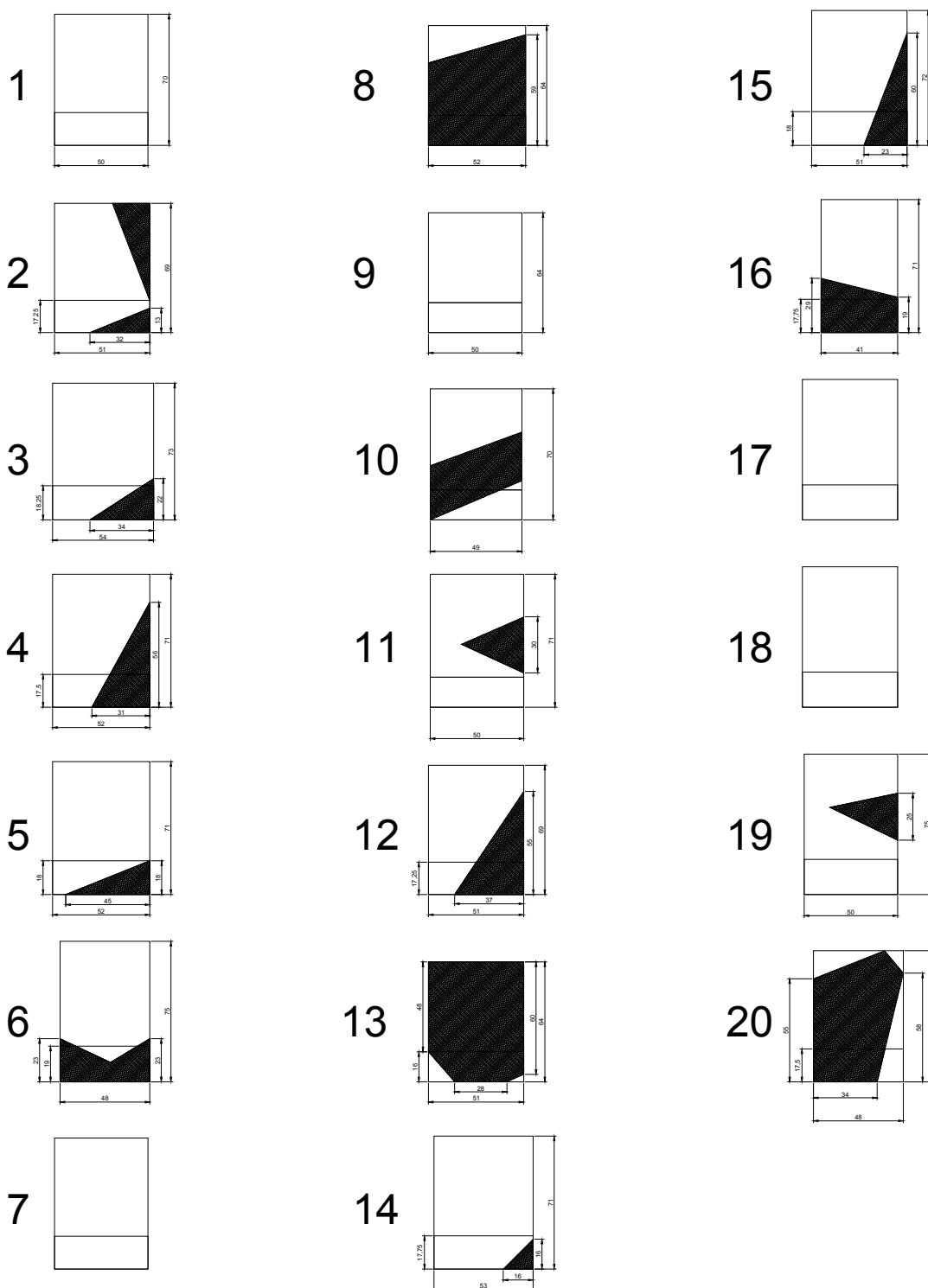


Figura 20 – Representação dos nós na projeção da área da secção transversal

Na tabela 4 são resumidos os valores dos índices KAR, apresentando-se os resultados que estes índices produziram na classificação qualitativa.

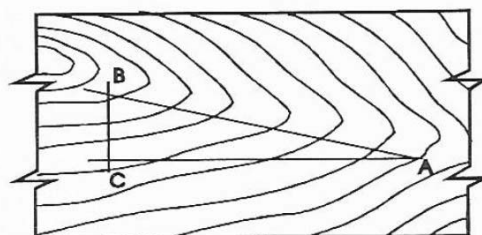
Tabela 4– Cálculo dos índices KAR

Provete	KAR				KARt	KARm	Classificação
	Nó total [mm ²]	Secção total [mm ²]	Nó marginal [mm ²]	Secção marginal [mm ²]			
1	0	3500	0	875	0.00	0.00	EE
2	728	3519	208	880	0.21	0.24	E
3	374	3942	363	986	0.09	0.37	E
4	868	3692	458	910	0.24	0.50	E
5	405	3692	405	963	0.11	0.42	E
6	799	3600	769	912	0.22	0.84	E
7	0	3500	0	875	0.00	0.00	EE
8	2678	3328	832	832	0.80	1.00	Rejeitada
9	0	3500	0	875	0.00	0.00	EE
10	1348	3430	300	784	0.39	0.38	E
11	498	3550	0	800	0.14	0.00	EE
12	1018	3519	538	880	0.29	0.61	E
13	3134	3264	816	816	0.96	1.00	Rejeitada
14	128	3763	128	941	0.03	0.14	EE
15	690	3672	352	918	0.19	0.38	E
16	984	2911	728	728	0.34	1.00	Rejeitada
17	0	3500	0	875	0.00	0.00	EE
18	0	3500	0	875	0.00	0.00	EE
19	453	3750	0	938	0.12	0.00	EE
20	2609	3360	632	840	0.78	0.75	Rejeitada

Como resultado desta avaliação obteve-se que 6 provetes seriam rejeitados, 7 seriam de classe EE e outros 7 da classe E.

3.2.2. Fio

A análise do fio é elaborada com recurso a um instrumento designado riscador. Este serve para tração uma linha segundo a orientação do desenvolvimento das fibras. O quociente entre a altura do triângulo inscrito na linha traçada pelo riscador e a base desse triângulo resulta no valor do fio.



$$\text{Fio} = BC/AC$$

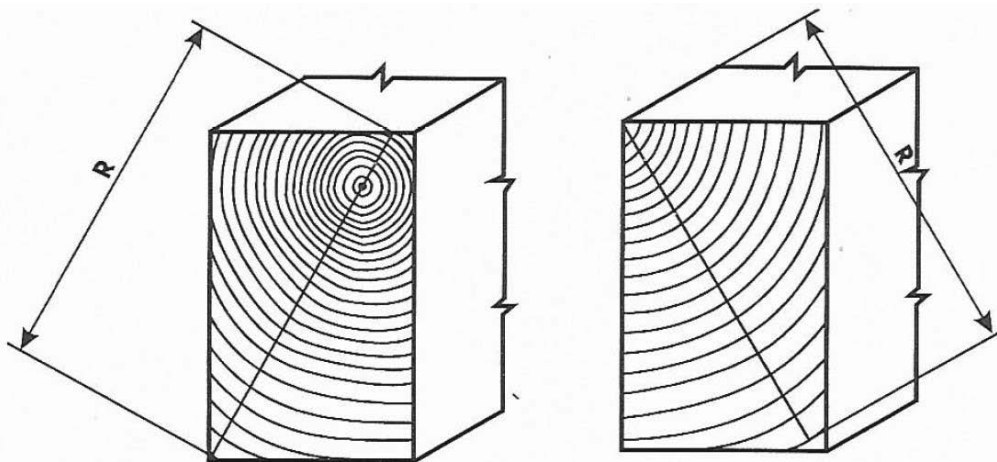
Figura 21 – Medição do fio da peça (Cruz, et al. 2000)

Dadas as características heterogêneas dos diversos provetes, nomeadamente pela existência abundante de nós nas peças de pior qualidade e a existência de fio praticamente igual a zero nas peças de melhor qualidade, optou-se por não se efetuar a classificação do fio.

3.2.3. Taxa de crescimento

Outros dos parâmetros importantes para a classificação visual das peças é a sua taxa de crescimento. Este resulta da medição da distância entre anéis de crescimento em milímetros.

O procedimento, neste caso, consistiu na medição de uma distância perpendicular aos anéis de crescimento em cada um dos topos dos provetes ensaiados, valor que é dividido pelo número de anéis de crescimento intersectados resultando na distância média entre anéis.



$$\text{Taxa de crescimento} = R \text{ (mm)}/n.^{\circ} \text{ de anéis de crescimento anual na linha de comprimento } R$$

Figura 22 – Medição da taxa de crescimento (Cruz, et al. 2000)

Na tabela 5 apresentam-se os resultados das medições efetuadas. Como se pode ver apenas dois provetes se classificam na classe E, sendo os demais classificados na classe EE.

Tabela 5 – Cálculo da taxa de crescimento

Peça	Topo	R [mm]	nº aneis	taxa de crescimento	Classificação
1	T1	73	25	2.92	EE
1	T2	70	34	2.06	EE
2	T1	44	14	3.14	EE
2	T2	40	10	4.00	EE
3	T1	70	28	2.50	EE
3	T2	46	12	3.83	EE
4	T1	70	10	7.00	E
4	T2	60	20	3.00	EE
5	T1	57	13	4.38	EE
5	T2	65	9	7.22	E
6	T1	80	27	2.96	EE
6	T2	70	29	2.41	EE
7	T1	74	27	2.74	EE
7	T2	63	40	1.58	EE
8	T1	60	24	2.50	EE
8	T2	72	39	1.85	EE
9	T1	77	35	2.20	EE
9	T2	62	42	1.48	EE
10	T1	58	17	3.41	EE
10	T2	48	16	3.00	EE
11	T1	52	18	2.89	EE
11	T2	44	19	2.32	EE
12	T1	52	16	3.25	EE
12	T2	52	15	3.47	EE
13	T1	70	34	2.06	EE
13	T2	64	28	2.29	EE
14	T1	40	11	3.64	EE
14	T2	55	15	3.67	EE
15	T1	46	15	3.07	EE
15	T2	47	20	2.35	EE
16	T1	39	11	3.55	EE
16	T2	40	9	4.44	EE
17	T1	45	15	3.00	EE
17	T2	46	17	2.71	EE
18	T1	44	21	2.10	EE
18	T2	73	40	1.83	EE
19	T1	76	33	2.30	EE
19	T2	45	26	1.73	EE
20	T1	59	15	3.93	EE
20	T2	43	9	4.78	EE

3.2.4. Fendas

A análise das fendas segundo a norma NP 4305:1995 consiste na medição do seu comprimento que corresponde à distância entre as duas linhas que a delimitam, conforme a figura seguinte. É ainda necessário avaliar se estas fendas repassam a secção de um lado ao outro ou se existem apenas numa das faces.

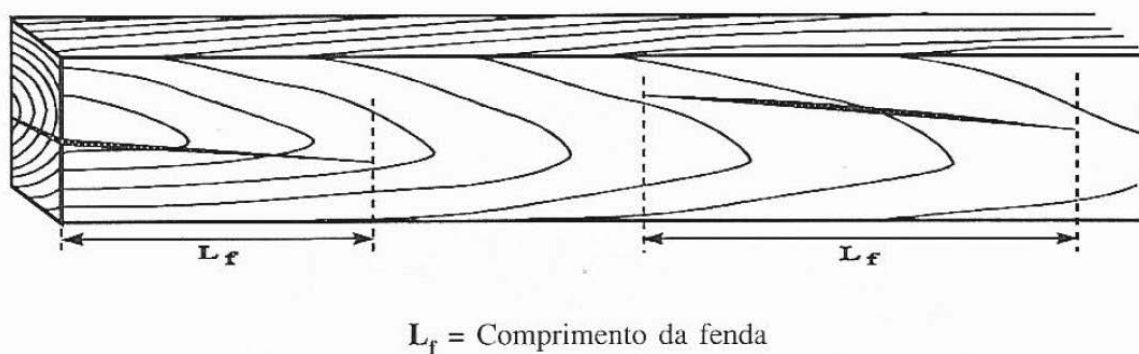
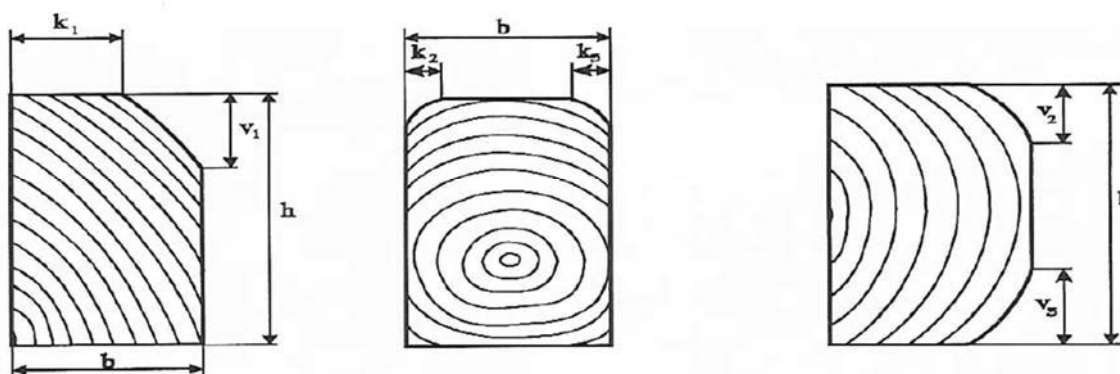


Figura 23 – Comprimento de fendas (Cruz, et al. 2000)

Na amostra testada nenhum dos provetes apresentava fendas.

3.2.5. Descaio

O descaio trata-se de uma anomalia resultante de um remanescente do toro que deu origem à peça. Este é visível por um arredondamento dos cantos da secção transversal sendo responsável por uma diminuição desta secção. O descaio é medido em fração do comprimento da aresta, tal como se mostra na figura seguinte.



Importância do descaio na face da peça
 exprime-se pela relação:

$$V_1/h \text{ ou } (V_2+V_3)/h$$

Importância do descaio no canto da peça
 exprime-se pela relação:

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

Figura 24 – Medição do descaio (Cruz, et al. 2000)

Na amostra estudada apenas dois provetes apresentam descaio. A medição efetuada e o resultado obtido para a classificação visual é reproduzida na tabela seguinte.

Tabela 6 – Medição do descaio na amostra

Peça	v1	h	k1	b	v/h	k/b	Classificação
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18	19	79	18	57	0.24	0.32	EE
19	33	78	22	59	0.42	0.37	E
20							

3.2.6. Empenos

Outro dos parâmetros tido em conta na classificação visual é a existência de empenos. Os empenos não afetam diretamente as propriedades do material, no entanto afetam a aplicação das peças em obra.

Na figura seguinte esquematiza-se as medições efetuadas para controlo dos empenos.

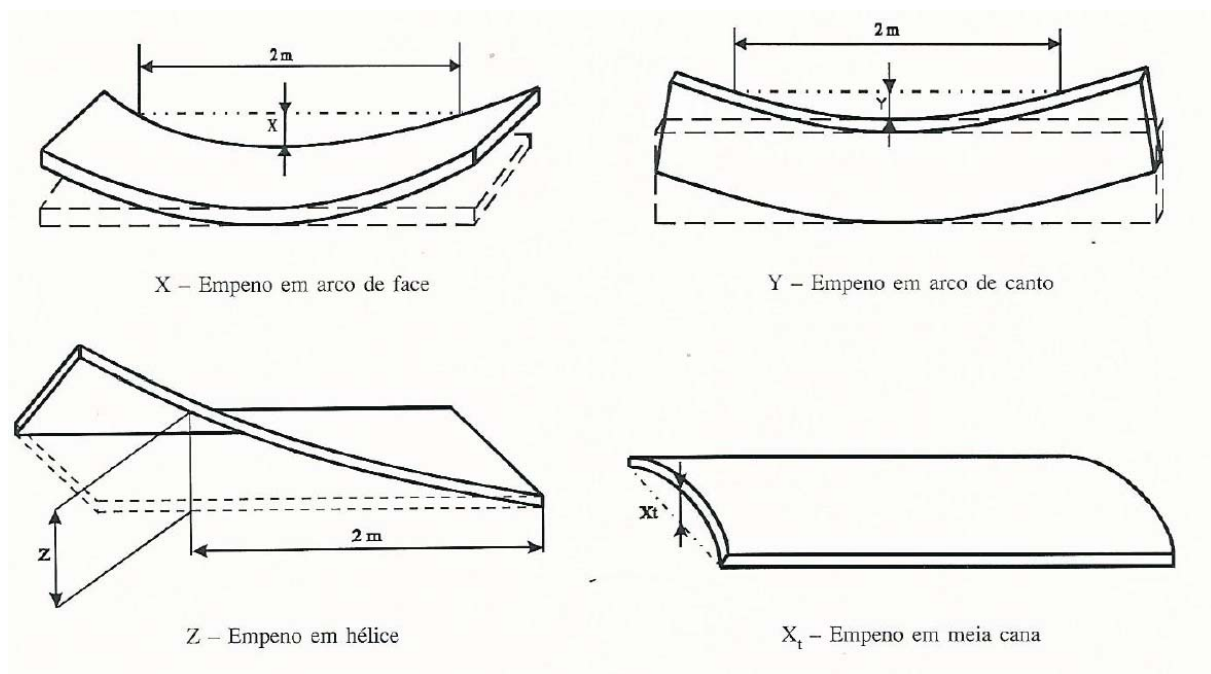


Figura 25 – Medição de empenos (Cruz, et al. 2000)

No caso concreto da amostra selecionada não foram detetados quaisquer empenos.

3.2.7. Bolsas de Resina e casca inclusa

As bolsas de resina e porções de casca inclusa, por interromperem a continuidade das fibras e corresponderem a zonas onde existe uma ausência de material resistente, são tratadas pela norma de forma análoga às fendas. Impondo a norma limites ao seu comprimento.

Na Amostra não se encontraram bolsas de resina ou porções de casca inclusa nas secções.

3.2.8. Medula

A medula é o núcleo central do tronco da árvore, o material desta apresenta menor resistência. Deste modo, a norma NP4305 exclui da classe EE quaisquer peças que apresentem medula.

Nos provetes estudados não existe qualquer presença de medula.

3.2.9. Lenho Juvenil

Dez dos provetes estudados apresentam a coloração que indica a presença de lenho juvenil. Embora a bibliografia consultada indique que esta propriedade afecta as propriedades de rigidez e resistência das peças, tal não foi observado nos ensaios.

Esta característica não faz parte da classificação visual pela norma NP 4305:1995, pelo que o resumo da presença de lenho juvenil nos provetes que é indicado na tabela seguinte não foi utilizado para a obtenção da classe de qualidade.

Tabela 7 – presença de lenho juvenil

Lenho Juvenil	
Presente	Peça
Não	1
Não	2
Sim	3
Sim	4
Sim	5
Não	6
Não	7
Não	8
Não	9
Sim	10
Não	11
Sim	12
Sim	13
Sim	14
Sim	15
Sim	16
Não	17
Não	18
Não	19
Sim	20

3.2.10. Resultados da Classificação Visual

A classificação visual obtida para os provetes corresponde à mais baixa classificação qualitativa obtida em cada um dos parâmetros atrás apresentados.

Como se pode verificar pela observação da tabela seguinte, da amostra estudada, 4 provetes deverão ser rejeitados, 9 são classificados como classe E e 7 como classe EE.

Este facto é revelador da heterogeneidade visual da amostra.

Tabela 8 – Resultados da classificação visual

Provete	KAR	Descaio	Taxa de crescimento	Classificação Final
1	EE		EE	EE
2	E		EE	E
3	E		EE	E
4	E		E	E
5	E		E	E
6	E		EE	E
7	EE		EE	EE
8	Rejeitada		EE	Rejeitada
9	EE		EE	EE
10	E		EE	E
11	EE		EE	EE
12	E		EE	E
13	Rejeitada		EE	Rejeitada
14	EE		EE	EE
15	E		EE	E
16	Rejeitada		EE	Rejeitada
17	EE		EE	EE
18	EE	EE	EE	EE
19	EE	E	EE	E
20	Rejeitada		EE	Rejeitada

Na figura seguinte apresenta-se o resultado da classificação visual num gráfico de frequências.

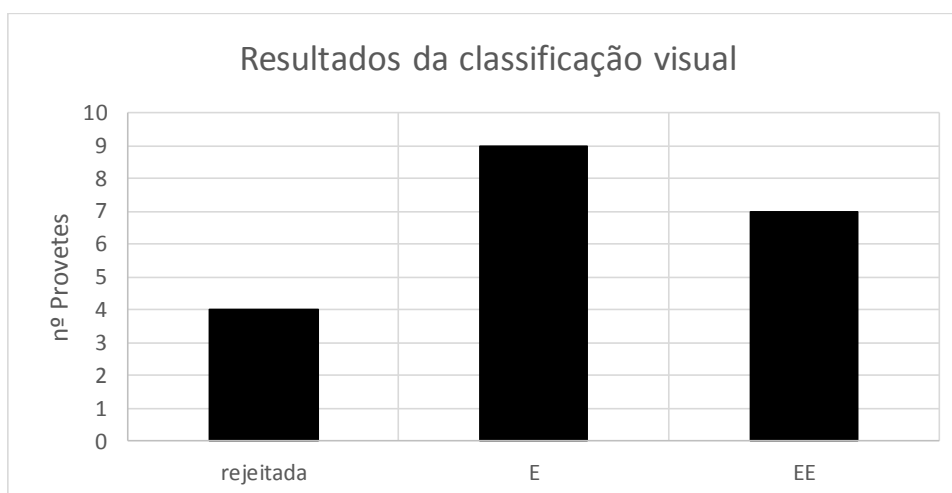


Figura 26 – Resultados da classificação visual por classe de qualidade

3.3. Ensaio Dinâmico

Os ensaios de carácter dinâmico foram efetuados com recurso ao equipamento timber grader MTG. Com este equipamento é possível medir a frequência longitudinal de vibração e o módulo de elasticidade do material após a indicação dos seguintes parâmetros:

- Teor de água
- Peso
- Dimensões
- Espécie

3.3.1. Procedimento do ensaio

A realização do ensaio MTG seguiu o seguinte procedimento:

1. Numeração dos provetes;
2. Verificação da regularidade das faces dos provetes e corte das faces irregulares;
3. Medição do comprimento dos provetes;
4. Medição da largura e altura dos provetes em 3 secções diferentes (ao centro e próximo das pontas);
5. Pesagem dos provetes com recurso a uma balança digital;
6. Leitura do teor de água com recurso a humidímetro de contacto;
7. Leitura do teor de água com recurso a humidímetro de agulhas;
8. Introdução dos valores dimensionais e do teor de água no software;
9. Realização do ensaio MTG.

Nas figuras seguintes reproduz-se fotograficamente as etapas mais importantes deste procedimento.

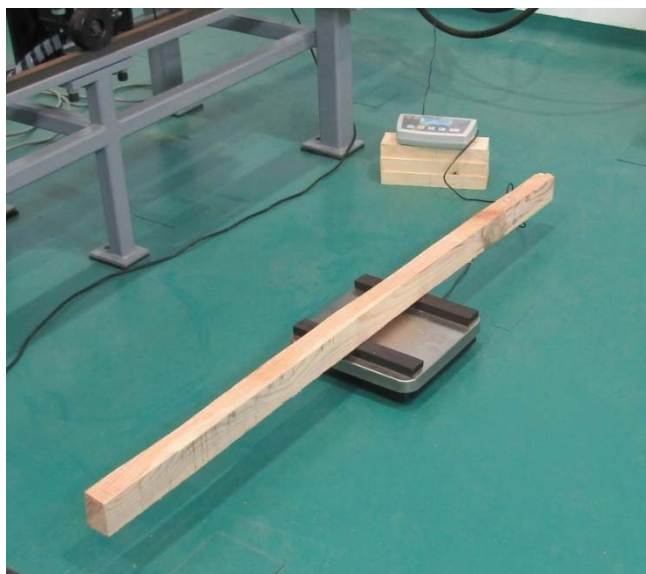


Figura 27 – Pesagem do provete



Figura 28 – Medição do teor de água com um humidímetro de contacto

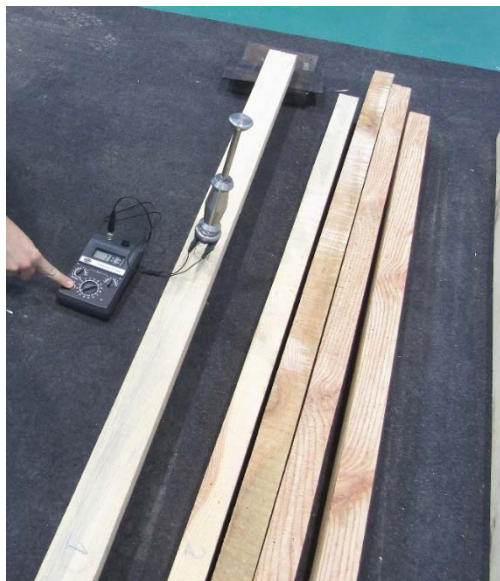


Figura 29 – Medição do teor de água com um humidímetro de agulhas



Figura 30 – Inserção dos valores dimensionais e do teor de água no software



Figura 31 – Realização do ensaio MTG

3.3.1. Resultados obtidos no ensaio

Na tabela 9 reproduzem-se os resultados obtidos durante os ensaios MTG. Na mesma tabela compilam-se os valores de dimensões, peso e teor de água medidos durante este processo.

Como é possível verificar na tabela, o provete nº13 não pode de ser aferido pelo processo MTG dada a grande descontinuidade que apresentava.

Tabela 9 – Resultados do Ensaio MTG

Provete	Massa m (kg)	Dimensões			Teor de Água - humidímetro de agulhas	Teor de Água - humidímetro de contacto	MTG	
		L (mm)	b (mm)	h (mm)	W (%)	W (%)	f (Hz)	E (N/mm ²)
1	3.20	1560	48.0	74.0	20.3	17.9	1459	11760
2	3.18	1428	49.2	71.5	21.7	23.1	1352	9754
3	4.56	1581	52.5	69.3	18.6	17.7	1181	10844
4	4.78	1580	52.0	68.7	17.7	18.5	869	6310
5	4.64	1534	53.3	69.0	17.9	18.4	874	5843
6	3.42	1557	48.5	73.0	22.9	21.2	1396	11888
7	3.07	1554	51.3	63.3	20.5	19.7	1464	12587
8	3.30	1523	49.7	62.0	24.7	25.9	1035	7326
9	3.13	1590	51.3	62.7	24.4	22.0	1386	12151
10	3.54	1587	49.7	69.7	20.7	21.1	1337	11747
11	3.21	1574	48.7	70.3	21.1	21.3	1454	12666
12	3.45	1535	50.8	70.7	21.4	23.3	1322	10675
13	3.39	1400	53.2	65.0	20.5	20.7	996	
14	3.87	1376	53.2	70.2	17.6	18.1	1362	10416
15	3.75	1535	51.0	71.3	20.3	22.9	1210	9562
16	3.93	1455	41.8	72.0	20.2	18.5	991	7375
17	3.38	1610	49.5	72.8	20.9	22.1	1435	12725
18	3.43	1550	54.8	73.3	20.8	20.1	1359	11306
19	3.61	1544	55.3	73.7	22.3	21.3	1420	11195
20	4.02	1536	45.7	71.0	18.6	21.8	1049	8544
média	3.64	1530	50.5	69.7	20.7	20.8	1248	10228

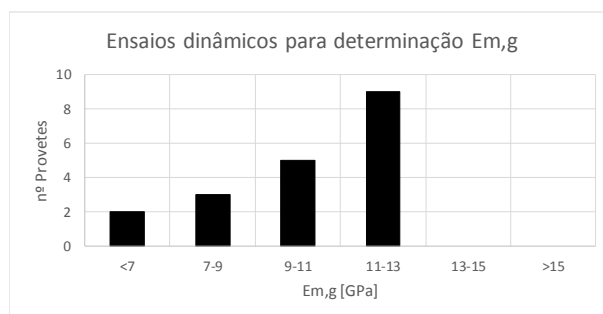


Figura 32 – Distribuição da frequência do valor do módulo de elasticidade por flexão global no ensaio dinâmico

3.4. Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram efetuados com recurso a um atuador hidráulico que exerce uma força de compressão sobre o sistema ao mesmo tempo que um conjunto de defletómetros vão registando a deformação do provete em função do carregamento.

Na campanha de ensaios foram realizados dois tipos de ensaios a cada provete: um em que é determinado o módulo de elasticidade do provete à flexão e outro em que é determinada a tensão de rotura do provete.

Os ensaios seguiram a norma EN 408:2010+A1, tendo-se realizado no ensaio do módulo de elasticidade dois tipos diferentes de registos. Um primeiro que visava a determinação do módulo de elasticidade global e outro tendo em vista a determinação do módulo de elasticidade local à flexão.

Em complemento, após os ensaios destrutivos aos provetes, um dos topos foi serrado e a amostra foi medida e colocada em estufa de forma a se obter o teor de água e a densidade do provete de uma forma rigorosa. O valor do teor de água obtido desta forma foi comparado com os valores obtidos das leituras dos humidímetros.

3.4.1. Procedimento do ensaio

A realização do ensaio para a caracterização dos módulos de elasticidades locais e globais à flexão e tensão de rotura à flexão segue o seguinte procedimento:

1. Marcação no provete dos locais onde este deve apoiar, onde o atuador deve ser montado e onde os defletómetros deverão ser fixados;
2. Montagem do provete no equipamento de ensaio, respeitando os locais das marcações prévias;
3. Colocação dos defletómetros;
4. Atuação progressiva de uma força com valor inferior a $0.4F_{\max,est}$ (força máxima estimada) e a uma velocidade inferior a $0.003h$, com simultâneo registo das variações de deslocamento nos defletómetros.
5. Desmontagem dos defletómetros;
6. Atuação progressiva de uma força até provocar a rotura.

Nas figuras seguintes são apresentadas algumas imagens que ilustram o procedimento descrito.



Figura 33 – Marcação prévia do provete com os locais de apoio e de fixação dos defletómetros

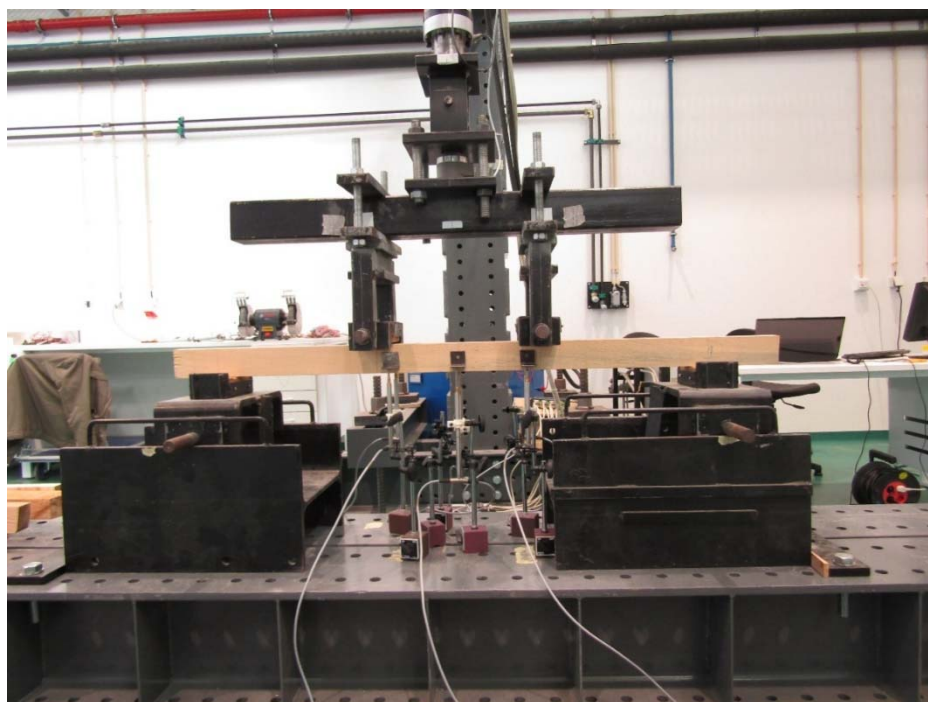


Figura 34 – Provete no local de ensaio com todo o equipamento montado para ensaio do módulo de elasticidade

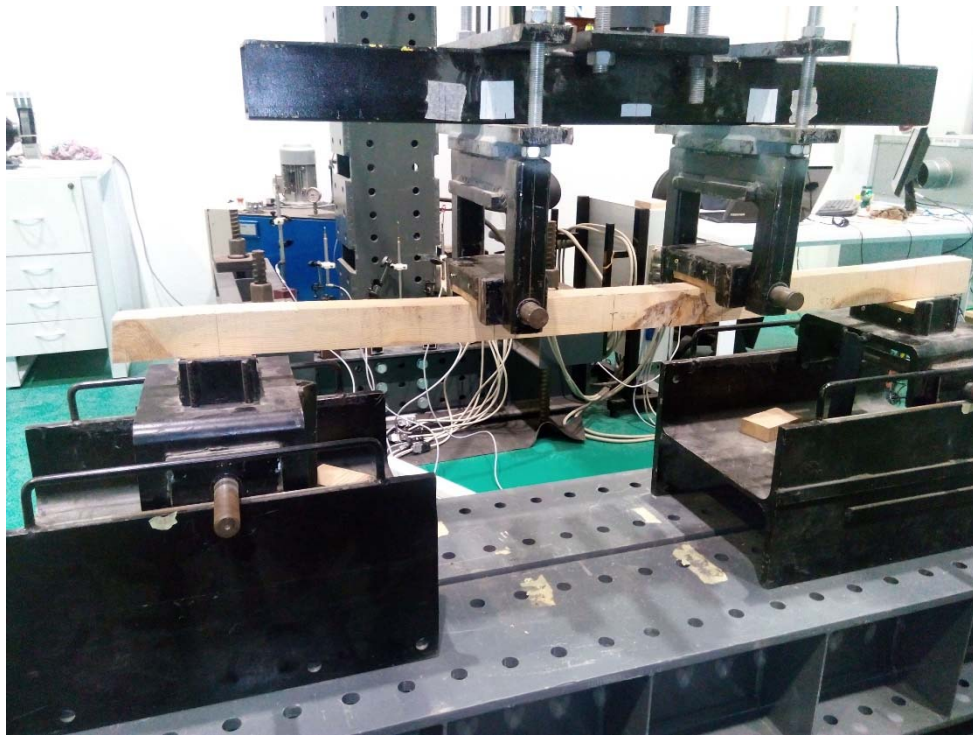


Figura 35 – Provette no local de ensaio para ensaio de rotura por flexão

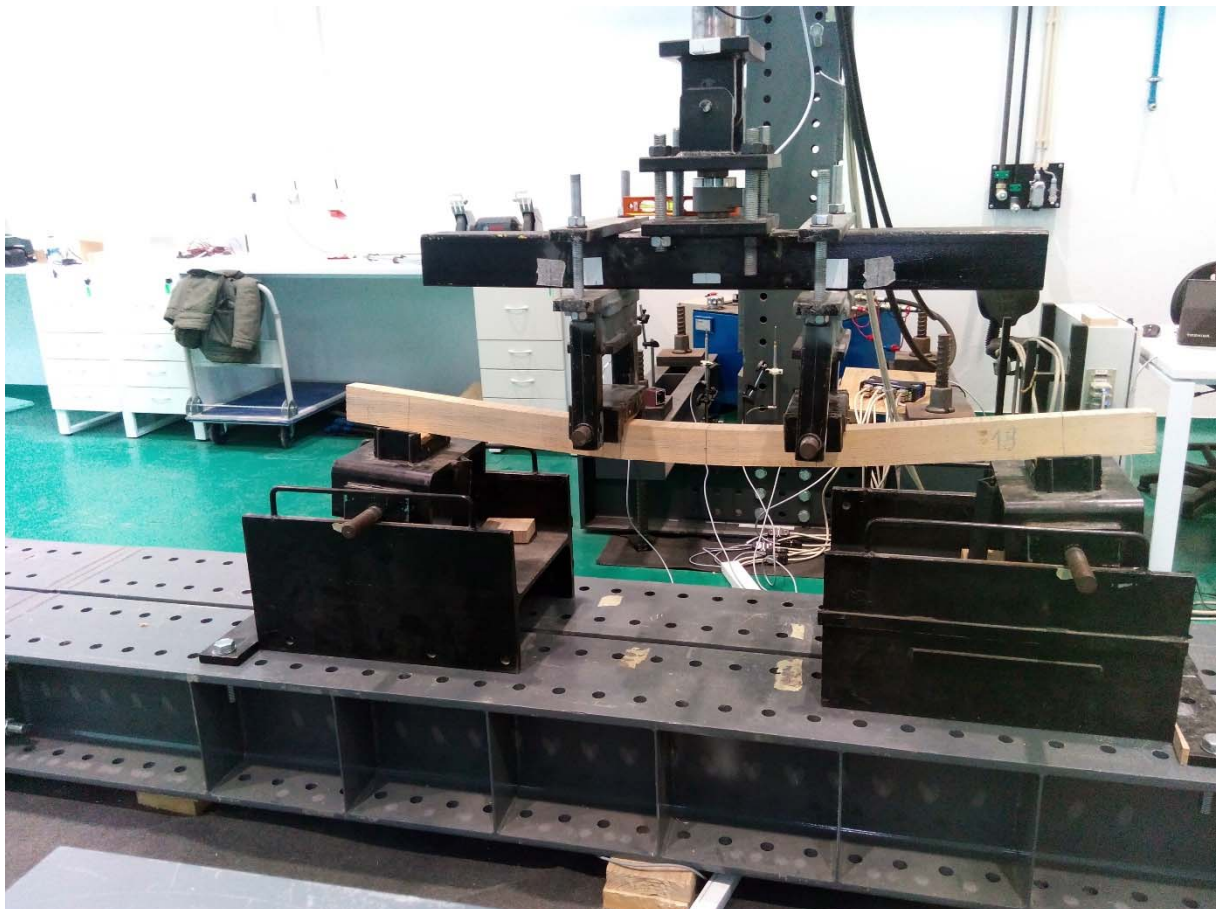


Figura 36 – Provette durante ensaio de rotura por flexão

3.4.2. Aquisição de resultados

Os ensaios com vista à obtenção do módulo de elasticidade global e local e rotura por flexão foram efetuados respeitando a norma EN 408:2010. Esta norma especifica um esquema de montagem do provete que deve respeitar uma proporção para com a altura do elemento a ensaiar.

Segundo a norma, o provete deve ter um comprimento total de $18h \pm 1.5h$, sendo h a altura do provete. E , o atuador deve atuar com uma força $F/2$ a $6h$ e a $12h$.

Na presente campanha utilizaram-se provetes com 7cm de altura e 5cm de largura, pelo que o comprimento destas peças teria de ser sempre superior a 133cm.

A norma prevê dois procedimentos de ensaios diferentes para se obter o módulo de flexão local e o módulo de flexão global. No entanto, estes apenas diferem no local onde são colocados os defletómetros. Como se pode verificar nas figuras seguintes, para a determinação do módulo de flexão local são necessários 6 defletómetros, 3 de cada lado, enquanto que para o módulo de flexão global basta um defletómetro no meio vão da peça.

A diferença entre os módulos de deformação local e global permite determinar a influência da deformação por corte. Sendo espectável que o módulo de flexão local apresente valores superiores por incluir uma componente de rigidez por corte.

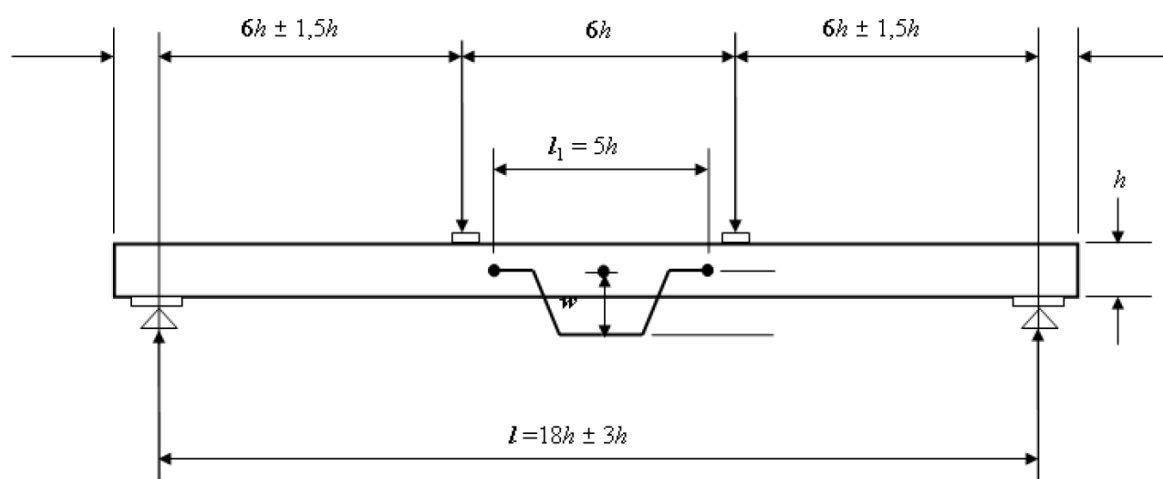


Figura 37 – Esquema para a determinação do módulo de elasticidade local de flexão (EN 408+A1 2010)

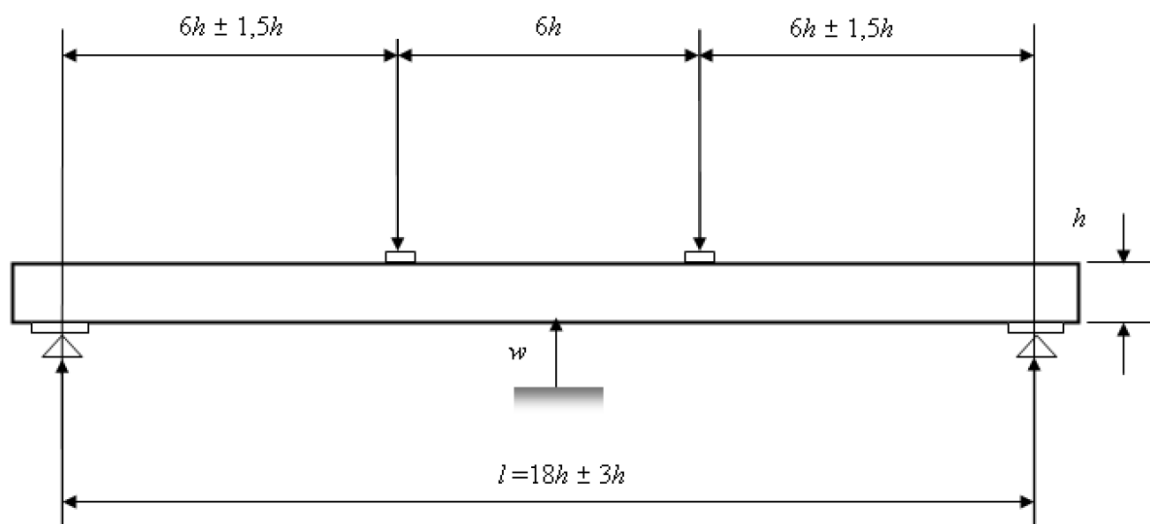


Figura 38 – Esquema para a determinação do módulo de elasticidade global de flexão (EN 408+A1 2010)

Após a realização dos ensaios os resultados foram compilados de forma a produzir um gráfico força deslocamento.

A norma indica que se deve tomar o intervalo do gráfico entre 10% da Força máxima estimada e 40% desta força para criar uma regressão linear sobre os resultados que tenha uma correlação com estes resultados de pelo menos 0.99. A serie de correlação deve ser a mais longa possível dentro deste intervalo, originando sempre uma correlação igual ou superior a 0.99.

A correlação deve abranger sempre, pelo menos, o intervalo definido pelos valores de 20%-30% da força máxima estimada.

Na figura 39 ilustra-se o tipo de gráfico referido. Esta ilustração é a que se encontra presente na norma.

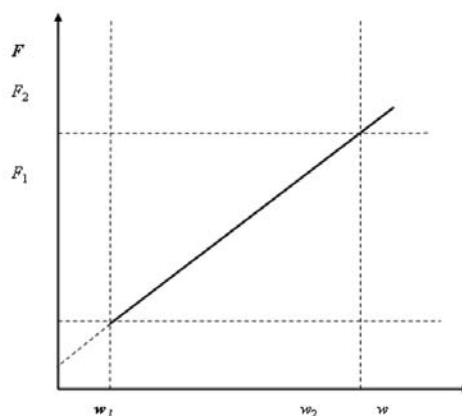


Figura 39 – Gráfico força-deslocamento apresentado na norma (EN 408+A1 2010)

No que se refere à obtenção do valor do módulo local de elasticidade à flexão, este é o resultado das deformações relativas entre os defletómetros centrais e os defletómetros situados a $2.5h$ do centro.

Assim, antes de se poder computar o gráfico força-deslocamento relativo, é necessário harmonizar os resultados obtidos a partir dos 6 aquiridores de deslocamento. Este processo começa com a realização da média entre os resultados dos defletómetros situados a $2.5h$ do eixo do ensaio em cada um dos lados do provete, seguindo-se a media entre os resultados obtidos em cada um dos lados.

Na figura seguinte apresenta-se um esquema que pretende elucidar este cálculo. Seguindo a ilustração, em primeiro lugar efetua-se a média entre os valores medidos no aquiridor 2_1 e no 2_2; em segundo lugar efetua-se a diferença entre esta média e os valores obtidos no ponto 2_c; o mesmo procedimento repete-se para o lado 1 e por fim, realiza-se a média entre o lado 1 e o lado 2.

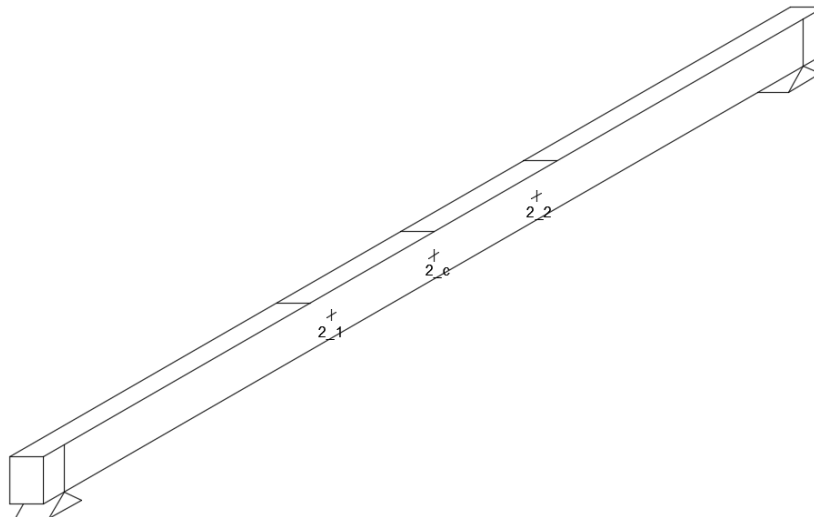


Figura 40 – Esquema de montagem dos defletómetros

Com o gráfico traçado, poderá obter-se a inclinação da reta que o define, m . E, obter o módulo de flexão local segundo a seguinte expressão:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2}{16I} \times m$$

Sendo:

$$a = 6h$$

$$l_1 = 5h$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$m = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1}$$

No caso do cálculo do módulo de elasticidade à flexão global considera-se o gráfico força-deslocamento onde o deslocamento é proveniente de um único defletómetro existente na face inferior do provete no eixo do ensaio.

O valor deste módulo é obtido utilizando a seguinte expressão:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \times \frac{1}{m} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Sendo:

$$a = 6h$$

$$l = 18h$$

$$G = \infty$$

$$m = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1}$$

O módulo G, distorção ao corte, foi tomado como infinito por indicação da norma. A norma EN408 manda desconsiderar este segundo termo sempre que o objetivo seja a quantificação da classe de resistência segundo a norma EN384.

Relativamente ao ensaio realizado para obtenção da tensão de rotura por flexão, este aproveita o mesmo provete, montado na mesma posição. O esquema de montagem obedece às mesmas regras dos ensaios dos módulos de elasticidade. Na figura seguinte ilustra-se o esquema presente na norma.

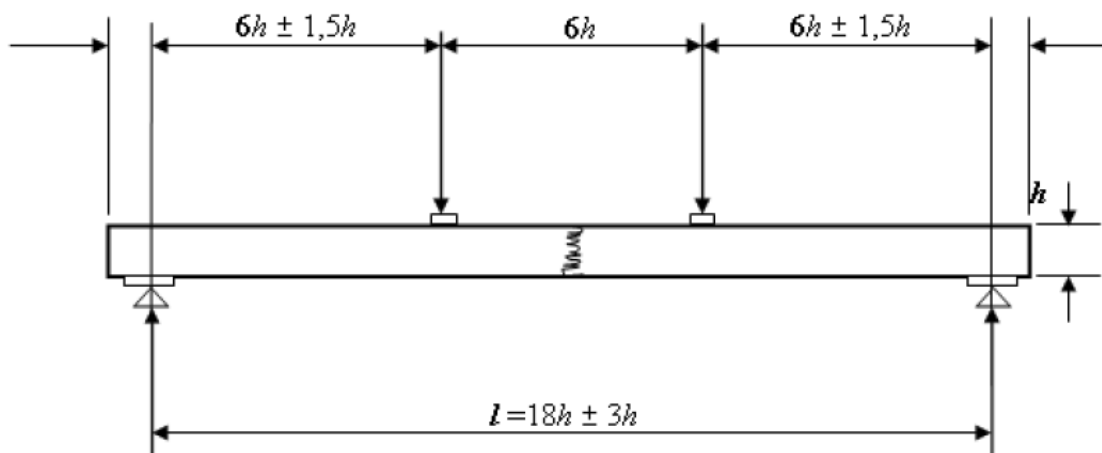


Figura 41 – Esquema de montagem do provete para a determinação da tensão de rotura por flexão (EN 408+A1 2010)

Neste ensaio, uma força provocada por um macaco hidráulico, F , é igualmente repartida por dois pontos de atuação que distam $3h$ do eixo do ensaio, resultando numa força $F/2$ em cada ponto de atuação.

O valor da força atuante, F , é medido diretamente no equipamento atuador.

O cálculo da tensão de rotura à flexão resulta da seguinte expressão:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Sendo:

$$a = 6h$$

3.4.1. Resultados

Em anexo são apresentados os gráficos das curvas força-deslocamento dos ensaios relativos ao módulo de elasticidade de flexão local e global. São também apresentados em anexo os gráficos relativos aos ensaios de rotura por flexão.

Na tabela seguinte são apresentados de forma resumido os resultados obtidos.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios

Peça	m Local	m Global	Fmáx (N)	b (mm)	h (mm)	b nom (mm)	h nom (mm)	a (mm)	l1 (mm)	L (mm)	I (mm ⁴)	Eml (N/mm ²)	Emg (N/mm ²)	fm (MPa)
1	10080	693	14380	48	74	50	70	420	350	1260	1620896	19997	15188	68.9
2	5643	396	7408	49	72	50	70	420	350	1260	1497640.7	12117	9383	37.1
3	7421	438	14377	53	69	50	70	420	350	1260	1458157	16366	10666	71.8
4	3521	264	5422	52	69	50	70	420	350	1260	1403007.5	8071	6673	27.9
5	2570	212	7791	53	69	50	70	420	350	1260	1460040	5659	5164	38.7
6	6441	476	7764	49	73	50	70	420	350	1260	1572277	13174	10738	37.9
7	4976	421	9273	51	63	50	70	420	350	1260	1086714	14724	13762	56.7
8	2801	249	2510	50	62	50	70	420	350	1260	986413.11	9131	8976	16.6
9	4532	478	10330	51	63	50	70	420	350	1260	1052756.7	13842	16118	64.6
10	6447	554	10509	50	70	50	70	420	350	1260	1399454.8	14814	14048	54.9
11	6883	485	12419	49	70	50	70	420	350	1260	1411022.6	15687	12199	65.0
12	6898	431	6350	51	71	50	70	420	350	1260	1494896.6	14838	10242	31.5
13			2562	53	65	50	70	420	350	1260	1216741.3			14.4
14	5071	448	11490	53	70	50	70	420	350	1260	1530561.3	10653	10381	55.3
15	6954	451	6749	51	71	50	70	420	350	1260	1542646.7	14496	10382	32.8
16	3724	304	3484	42	72	50	70	420	350	1260	1301184	9202	8306	20.2
17	6901	545	12300	50	73	50	70	420	350	1260	1593729.1	13925	12141	59.0
18	7057	603	14709	55	73	50	70	420	350	1260	1802053.5	12592	11876	62.9
19	8523	668	14212	55	74	50	70	420	350	1260	1843396	14868	12863	59.6
20	5656	330	2137	46	71	50	70	420	350	1260	1362050.2	13354	8602	11.7

Como é possível observar o provete nº 13 não foi ensaiado ao modulo de elasticidade à flexão. Dada a sua fragilidade resultante de um nó de grandes dimensões existente perto do meio vão da peça. No entanto, o ensaio de rotura por flexão foi efetuado.

Na figura seguinte é apresentada a distribuição por frequência do módulo de elasticidade de flexão global, considerando todos os provetes, mesmo os que não têm manifestamente capacidade estrutural.

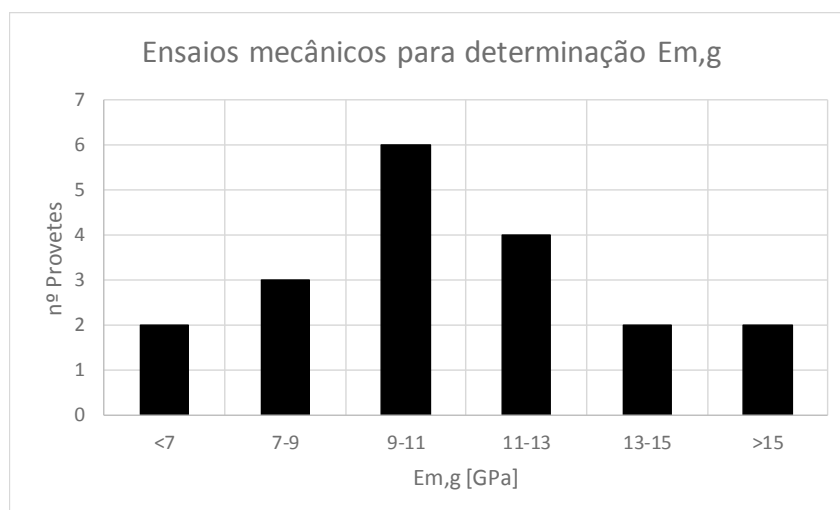


Figura 42 – Ensaio para a determinação do modulo de elasticidade de flexão global

Na figura 43 apresenta-se a distribuição dos resultados do modulo de elasticidade à flexão local.

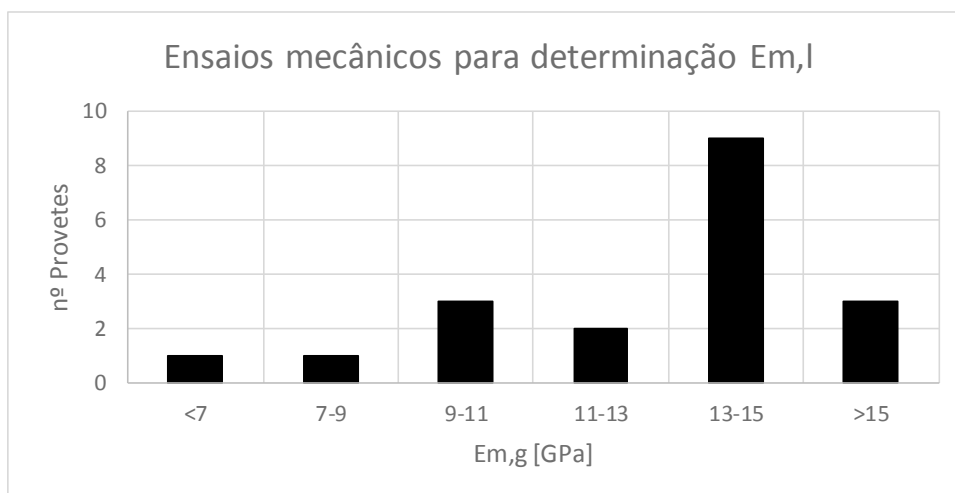


Figura 43 - Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade de flexão local

Em seguida apresentam-se sob a forma gráfica os resultados dos ensaios de rotura à flexão. Neste gráfico são considerados os 20 provetes. No entanto, é de referir que os provetes 8, 13, 16 e 20 não apresentam visualmente condições mínimas para ser considerados elementos estruturais devido ao facto de apresentarem nós de grandes dimensões na zona do meio vão.

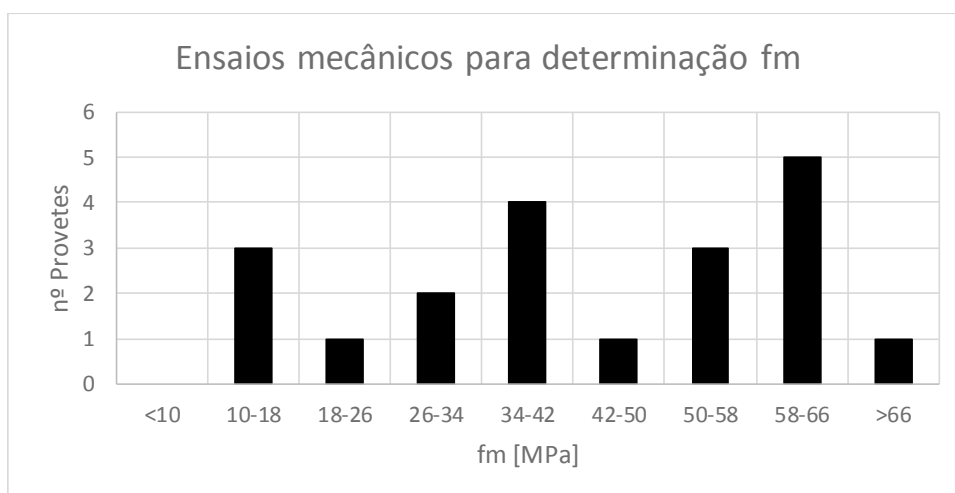


Figura 44 – Ensaio para a determinação da tensão de rotura à flexão

3.5. Massa volúmica e teor de água

A massa volúmica e o teor de água são duas outras propriedades da amostra importantes para a caracterização do material e para verificação dos ensaios dinâmicos e mecânicos.

O teor de água é uma propriedade da amostra que pode variar com as condições ambientais. Esta propriedade afeta o desempenho mecânico dos provetes, deste modo a sua rigorosa observação dá-nos pistas sobre o estado dos provetes. Como foi referido, o teor de água foi uma das propriedades de “input” nos ensaios dinâmicos MTG, na altura esta propriedade foi inserida no software com base na leitura do teor de água por parte do humidímetro de agulhas. No entanto, esta leitura instantânea não é tão rigorosa quanto a observação do teor efetivo de água

mediante a secagem em estufa. Assim, neste ponto, far-se-á um pequeno estudo sobre a fiabilidade dos equipamentos de medição instantânea do teor de água. Uma vez que é sempre necessário saber o teor de água no exato momento em que se realizam os ensaios MTG.

A massa volúmica por seu lado é uma característica do material e, embora possa ser ligeiramente afetada pelo teor de água, a sua contribuição para as propriedades mecânicas das peças é muito mais intrínseca do que exterior. Existindo diversos estudos que correlacionam as propriedades mecânicas com a densidade da madeira.

3.5.1. Procedimento do ensaio

A medição do teor de água e massa volúmica dos diversos provetes seguiu o seguinte procedimento:

1. Corte de um dos topos do provete, com uma espessura mínima de 20mm;
2. Numeração da amostra com o número do provete;
3. Medição do comprimento, altura e espessura de cada amostra em dois locais distintos;
4. Pesagem da amostra com recurso a uma balança digital;
5. Colocação da amostra em tabuleiros no interior de uma estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$;
6. Pesagem da amostra a cada duas horas até haver uma variação de peso inferior a 0.1%.

Nas figuras seguintes reproduz-se fotograficamente as etapas mais importantes deste procedimento.

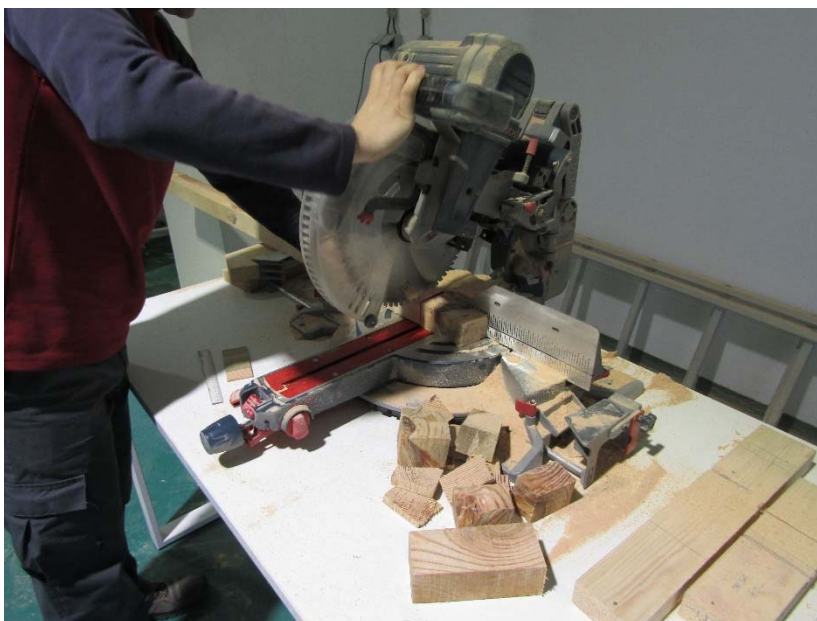


Figura 45 – Corte de uma amostra do provete com uma espessura superior a 20mm



Figura 46 – Medição volumétrica da amostra e pesagem



Figura 47 – Colocação da amostra na estufa

3.5.1. Aquisição de resultados

O ensaio foi produzido de acordo com a norma EN13183-1:2002 sendo a amostra serrada de acordo com o princípio mostrado na seguinte figura.

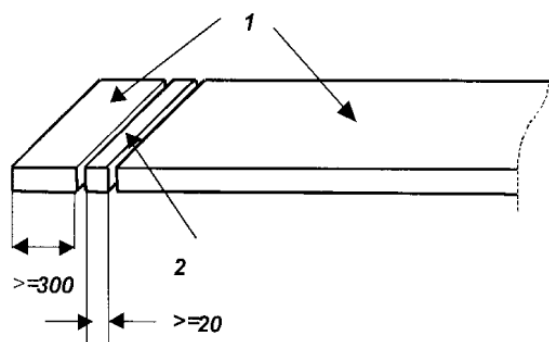


Figura 48 – Amostra para a avaliação do teor de água (EN 13183-1 2002)

Sendo:

- 1 – o provete ensaiado mecanicamente;
- 2 – a amostra retirada ao provete.

A contabilização do teor de água na altura do ensaio mecânico e MTG é calculada como a percentagem de perda de massa ocorrida pela colocação da amostra na estufa. Este cálculo é ilustrado pela seguinte expressão.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100$$

Onde:

- w - Teor de água em percentagem;
- m_w - Massa antes da colocação na estufa em gramas;
- m_0 - Massa depois da colocação na estufa em gramas.

O cálculo da massa volúmica é o quociente da massa pelo volume, expresso em quilogramas por metro cúbico.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

- ρ_w - Massa volúmica inicial em kg/m^3 ;
- m_w - Massa antes da colocação na estufa em kg;
- V_w - Volume antes da colocação na estufa em m^3 ;

3.5.1. Resultados

Na tabela seguinte apresenta-se os resultados obtidos.

Tabela 11 – Medições de teor de água e massa volúmica

Peça	W (%)	ρ_w (kg/m³)
1	21.4%	558
2	20.1%	598
3	21.1%	747
4	19.9%	720
5	22.1%	753
6	22.6%	582
7	21.8%	585
8	25.1%	608
9	21.5%	607
10	17.9%	657
11	19.6%	567
12	22.3%	598
13	18.0%	644
14	17.7%	762
15	18.6%	641
16	19.4%	767
17	22.4%	585
18	18.9%	575
19	21.8%	597
20	19.3%	749
Média	20.6%	645
Desvio padrão	1.9%	75.0

Como se pode observar os valores de massa volúmica são um pouco acima do que seria espectável atendendo aos valores existentes na bibliografia consultada que dariam a densidade máxima desta madeira na ordem dos 600kg/m³ (Cachim 2014).

Já os valores do teor de água encontram-se na média dos valores típicos para as aplicações estruturais de madeira.

Os valores de teor de água resultantes deste ensaio e os medidos pelos humidímetros apresentam valores muito próximos, tal como se ilustra na tabela 12.

Em conclusão, também se verifica que o humidímetro de agulhas é mais preciso que o humidímetro de contacto. Este facto já seria espectável à partida visto este humidímetro conseguir medir a humidade em camadas mais profundas. No entanto, há que salientar o baixo nível de correlação entre os equipamentos de leitura e instantânea e o valor do ensaio, não devendo esta variação afetar os ensaios dinâmicos, visto que, existe uma baixa variação entre os provetes.

Tabela 12 – Comparação dos valores de teor de água medidos no ensaio e nos humidímetros

Provete	Teor de Água - medição em estufa	Teor de Água - humidímetro de agulhas	Teor de Água - humidímetro de contacto
	W (%)	W (%)	W (%)
1	21.4	20.3	17.9
2	20.1	21.7	23.1
3	21.1	18.6	17.7
4	19.9	17.7	18.5
5	22.1	17.9	18.4
6	22.6	22.9	21.2
7	21.8	20.5	19.7
8	25.1	24.7	25.9
9	21.5	24.4	22.0
10	17.9	20.7	21.1
11	19.6	21.1	21.3
12	22.3	21.4	23.3
13	18.0	20.5	20.7
14	17.7	17.6	18.1
15	18.6	20.3	22.9
16	19.4	20.2	18.5
17	22.4	20.9	22.1
18	18.9	20.8	20.1
19	21.8	22.3	21.3
20	19.3	18.6	21.8
média	20.6	20.7	20.8
desvio padrão	1.9	2.0	2.2
Coefficiente de variação	0.094	0.096	0.105
Coefficiente de correlação		0.52	0.36

3.6. Discussão dos Resultados

3.6.1. Comparação entre Ensaio Dinâmicos e Mecânicos

Na tabela seguinte apresenta-se uma compilação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios mecânicos, dinâmicos e classificação qualitativa

Peça	E _m (N/mm ²)	E _g (N/mm ²)	MTG (N/mm ²)	Classificação visual
1	19997	15188	11760	EE
2	12117	9383	9754	E
3	16366	10666	10844	E
4	8071	6673	6310	E
5	5659	5164	5843	E
6	13174	10738	11888	E
7	14724	13762	12587	EE
8	9131	8976	7326	Rejeitada
9	13842	16118	12151	EE
10	14814	14048	11747	EE
11	15687	12199	12666	EE
12	14838	10242	10675	E
13				Rejeitada
14	10653	10381	10416	EE
15	14496	10382	9562	E
16	9202	8306	7375	Rejeitada
17	13925	12141	12725	EE
18	12592	11876	11306	EE
19	14868	12863	11195	E
20	13354	8602	8544	Rejeitada

Relativamente à tabela anterior importa referir que os provetes 8, 13, 16 e 20 apresentavam nós de grandes dimensões, repassados, na zona do meio vão e por esse facto não apresentavam capacidade estrutural.

Excluindo os provetes sem capacidade estrutural, apresenta-se em seguida uma figura com a distribuição de frequência do módulo de elasticidade de flexão segundo cada um dos ensaios e a classificação qualitativa. Para a classificação visual considerou-se os valores do módulo de elasticidade à flexão de cada classe.

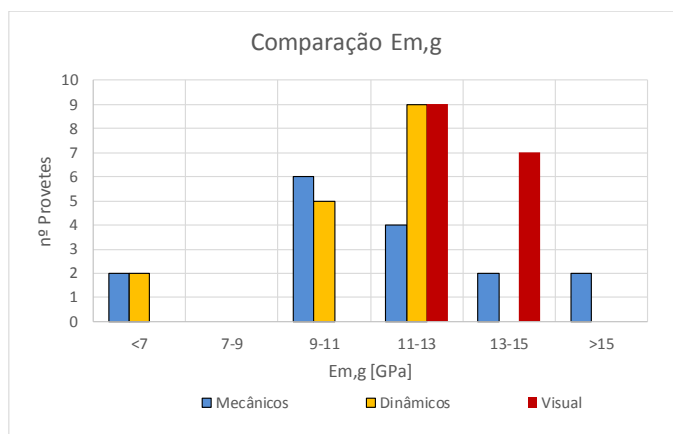


Figura 49 – Comparação entre os diferentes ensaios, módulo de elasticidade à flexão

Analogamente ao módulo elasticidade de flexão também foram compilados os resultados resultantes dos ensaios de rotura mecânicos e os valores correspondentes de tensão de rotura da classificação qualitativa.

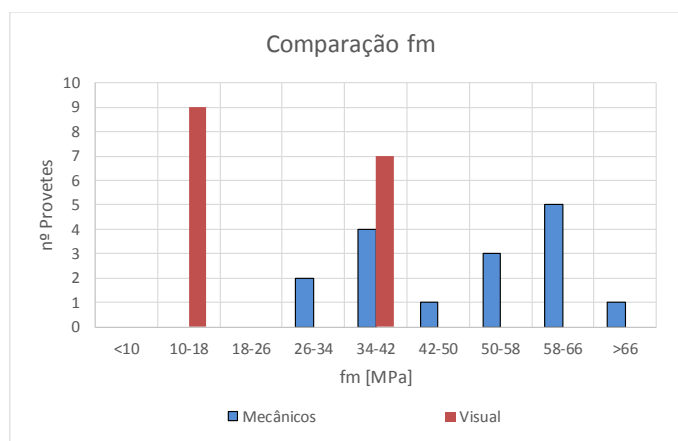


Figura 50 - Comparação entre os diferentes ensaios, tensão de rotura à flexão

Na tabela seguinte resumem-se as propriedades obtidas para os módulos de elasticidade à flexão e tensão de rotura dos diferentes ensaios.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios

	Eml (N/mm ²)	Emg (N/mm ²)	Emg MTG (N/mm ²)	fm (N/mm ²)
média	13489	11364	10714	50.2
desvio padrão	3319	2857	2050	13.3
máximo	19997	16118	12725	68.9
mínimo	5659	5164	5843	27.9

Tendo como objetivo a criação de regressões que permitissem a previsão das diferentes propriedades da madeira foram impressos os gráficos das figuras seguintes.

Como visível na figura 51 é possível criar uma recta de regressão linear com uma correlação linear forte entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e mecânico, uma correlação linear moderada entre a tensão de rotura à flexão obtida no ensaio mecânico e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio do MTG ou no mecânico, ainda assim, com uma correlação superior entre os valores obtidos nos ensaios mecânicos.

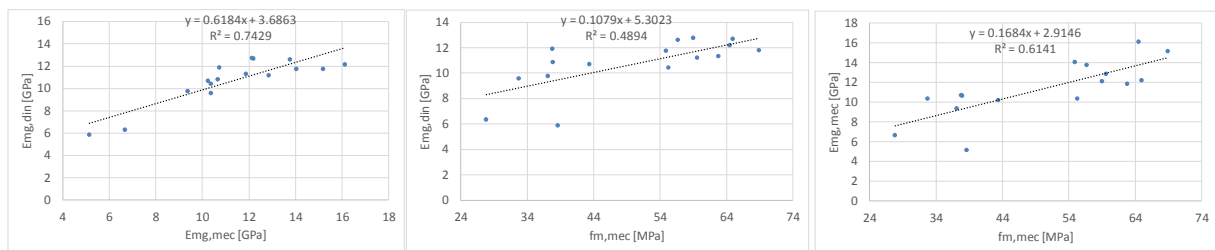


Figura 51 – Correlações entre módulo de elasticidade e tensão de rotura

Se em vez de se analisar as rectas produzidas nos gráficos da figura anterior, se se analisarem os valores diretamente entre as propriedades, teremos uma correlação forte entre todos estes dados. Seja ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e mecânico de $R^2=0.86$, seja tensão de rotura dos ensaios mecânico e módulo de elasticidade dinâmico de $R^2=0.70$ e seja módulo de elasticidade dos ensaios mecânicos e tensão de rotura dos ensaios mecânicos de $R^2=0.78$. Estes valores serão apresentados sob a forma de tabela numa figura mais à frente no presente estudo.

Na figura 52 apresenta-se um gráfico que correlaciona a densidade do provete com os valores do ensaio mecânico da tensão de rotura. É visível que existe uma correlação fraca entre os valores da tensão de rotura e a massa volúmica.

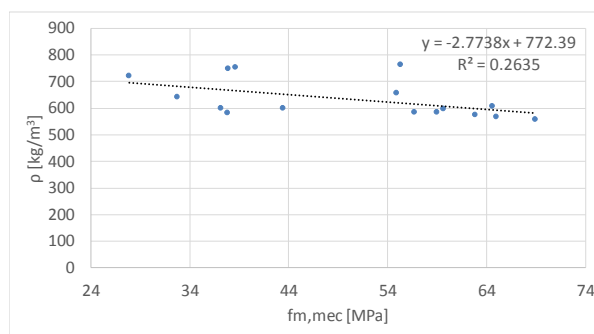


Figura 52 – Correlação entre a densidade e a tensão de rotura

Na próxima figura, apresenta-se um gráfico que correlaciona o teor de água com tensão de rotura, é possível observar que não existe correlação simples entre os valores do teor de água e tensão de rotura.

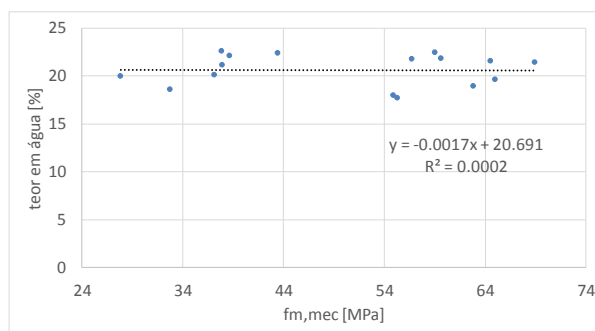


Figura 53 - Correlação entre o teor de água e a tensão de rotura

Efetuada esta primeira análise da correlação entre a tensão de rotura e os ensaios dinâmicos, efetuou-se de seguida a análise da correlação de variáveis múltiplas.

Na tabela seguinte apresenta-se o cálculo da regressão linear entre as diferentes variáveis.

A regressão resultante conduz a uma expressão do tipo da equação seguinte.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3$$

Onde:

y – é o valor estimado;

b_0 – é valor que intersecta o eixo das ordenadas;

x_1 – é o valor da primeira variável, por exemplo o $E_{mg,din}$;

x_2 – é o valor da segunda variável, por exemplo a massa volúmica;

x_3 – é o valor da terceira variável, por exemplo o teor de água;

b_1, b_2 e b_3 - são os valores de ajustamento da recta.

Tabela 15 – Correlações lineares múltiplas

Correlação	Variáveis envolvidas	Correlação
1	Emg,mec; Massa volúmica; tensão de rotura em flexão no ensaio mecânico	R ² =0.7020
2	Emg,din; Massa volúmica; tensão de rotura em flexão no ensaio mecânico	R ² =0.7020
3	Emg,din; Massa volúmica; tensão de rotura em flexão no ensaio mecânico; teor de água	R ² =0.7089

Em seguida apresenta-se os valores das tensões resistentes estimadas a partir das regressões 1, 2 e 3 apresentadas anteriormente. É visível que a correlação 3 tem uma correlação ligeiramente superior e que todas são correlações fortes.

Tabela 16 – Valores estimados para tensão de rotura por flexão

	fm,mec [MPa]	Emg,din [GPa]	teor em água [%]	massa volúmica [kg/m ³]	Emg,mec [GPa]	1-fm, est, mec [MPa]	2-fm, est, din [MPa]	3-fm, est, din [MPa]
1	68.93	12	21	558	15	52	56	55
2	37.14	10	20	598	9	45	47	48
3	37.93	11	21	747	11	47	49	48
4	27.86	6	20	720	7	32	30	31
5	38.66	6	22	753	5	30	28	26
6	37.85	12	23	582	11	53	56	54
7	56.74	13	22	585	14	55	59	58
9	64.57	12	22	607	16	53	57	56
10	54.93	12	18	657	14	51	54	56
11	65.00	13	20	567	12	55	59	60
12	43.43	11	22	598	10	48	51	49
14	55.31	10	18	762	10	45	47	48
15	32.77	10	19	641	10	44	45	47
17	59.02	13	22	585	12	55	59	58
18	62.85	11	19	575	12	51	53	55
19	59.63	11	22	597	13	50	53	52
média	50	11	21	633	11	48	50	50
desvio padrão	13	2	2	72	3	8	9	9
máximo	69	13	23	762	16	55	59	60
mínimo	28	6	18	558	5	30	28	26
correlação fm,mec R ²		0.6996			0.7836	0.7020	0.7020	0.7089
correlação Emg,din R ²	0.6996				0.8619	0.9970	0.9966	0.9868

Reproduzindo sob a forma de equação a regressão apresentada com o número 3, teremos a seguinte equação.

$$f_m = 38.54 + 4.06 \cdot E_{mg,din} - 0.84 \cdot w - 0.02 \cdot \rho$$

Onde:

f_m – é o valor estimado da tensão de rotura em flexão;

$E_{mg,din}$ – é o valor do módulo de elasticidade à flexão dinâmico, em GPa;

w – é o valor do teor de água, em %x100;

ρ – é o valor da massa volúmica em kg/m³.

De seguida apresenta-se de forma gráfica os valores estimados da tensão de rotura segundo as diferentes regressões calculadas.

Verifica-se que de uma forma geral os valores estimados para a tensão são inferiores aos reais medidos nos ensaios mecânicos para módulos de elasticidade elevados e são superiores aos reais nos módulos de elasticidade mais baixos.

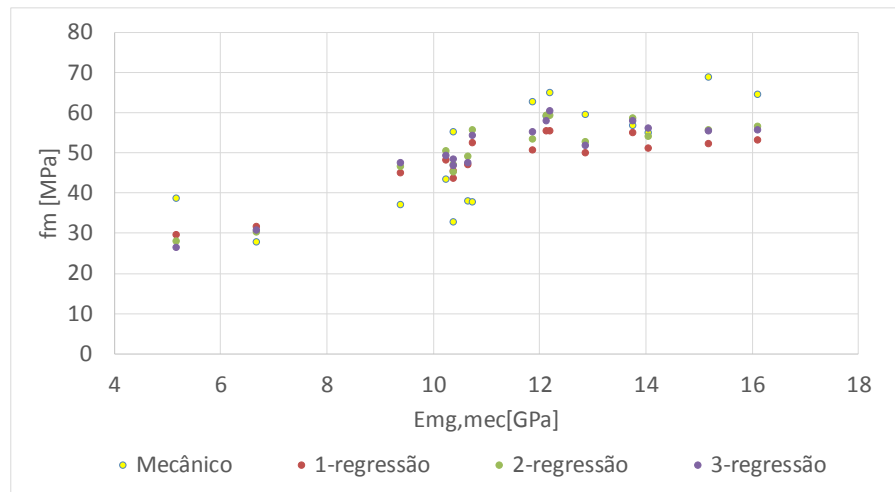


Figura 54 – Valores de tensão de rotura estimados

3.6.2. Propriedades mecânicas da madeira para estruturas

A caracterização das propriedades mecânicas da amostra segue a norma EN384:2004, no entanto importa referir que o número de provetes ensaiados foi de 20, valor inferior ao mínimo indicado pela norma que seria 40, e destes apenas 16 apresentam capacidade estrutural. Este facto fará com que os resultados apresentados de seguida não sejam totalmente significativos.

3.6.2.1. Tensão característica de rotura em flexão

A tensão característica de rotura corresponde ao valor de tensão registado no ensaio que soma 5% das frequências desse ensaio. Isto é, corresponde ao percentil inferior ou igual a 5% da amostra.

Assim, segundo a norma, para 40 provetes, o valor característico da tensão de rotura seria o valor da tensão registado no 3º ensaio de menor tensão de rotura, visto que 5% da amostra corresponderia a 2 ensaios. No presente caso, visto haver apenas 16 provetes válidos, 5% da amostra corresponderia a 0.8 provetes, resultando o valor característico igual ao valor mínimo da amostra.

Assim, dos valores observados nos ensaios de rotura tem-se:

$$f_{05} = f_{min} = 27.86MPa$$

A norma indica-nos ainda factores de ajustamento geométricos a utilizar sempre que os provetes utilizados não tenham uma altura de 150mm; factores de ajustamento para quando os ensaios não se realizam com o teor de água de referência e factores de ajustamento para utilizar quando o vão do próprio ensaio não cumpre o disposto na norma EN408:2003.

No presente caso, os provetes apresentam uma altura diferente do valor de referência de 150mm pelo que se calculou o factor de ajustamento que a seguir se apresenta.

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2} = \left(\frac{150}{70}\right)^{0.2} = 1.165$$

Relativamente ao facto de o teor de água do ensaio não ter sido o teor de água padrão, a norma, para o caso da tensão de rotura, não apresenta factor correctivo.

Daqui resulta uma tensão de rotura corrigida para o percentil de 5% de:

$$\overline{f_{05}} = f_{05} \cdot k_h = 32.46MPa$$

A norma indica-nos depois que o valor característico da tensão de rotura em flexão deve ser afectado pelo coeficiente que depende do tamanho da amostra. Este é retirado da seguinte figura.

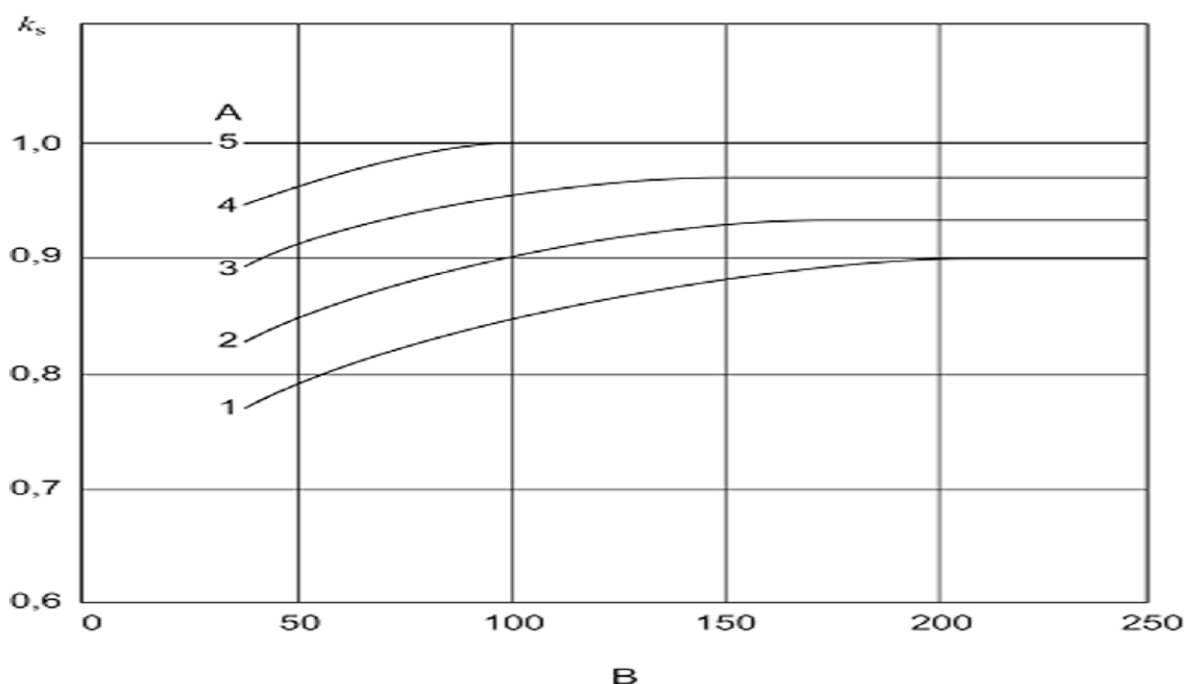


Figura 55 – Gráfico para obtenção do ks, onde A é o valor ks e B é o número de espécimes na amostra

Se for considerada uma amostra de 16 provetes, prologando a linha 1, da figura resulta o seguinte valor:

$$k_s = 0.725$$

A obtenção do valor k_s é ilustrada numa figura em anexo.

Assim, o valor característico da tensão de rotura em flexão será:

$$f_k = f_{05} \cdot k_s = 32.46 \times 0.725 = 23.53 \text{MPa}$$

3.6.2.2. Módulo de elasticidade global em flexão

O módulo de elasticidade ao contrário do que acontece para a tensão de rotura é calculado tendo por base a média dos valores dos ensaios e não o percentil 5%. No entanto, para ter em conta o efeito da flexão pura, a EN384:2004 indica uma expressão de correcção deste valor. Assim, o valor do módulo de elasticidade é obtido pela forma que a seguir se apresenta.

$$\bar{E} = \sum \frac{E_i}{n} \cdot 1.3 - 2690$$

Em que:

E_i – é o valor do módulo de elasticidade obtido em cada provete, em N/mm^2

n – é valor de provetes ensaiados na amostra

Porém, antes de se poder calcular o módulo de elasticidade da amostra é necessário corrigir os resultados dos ensaios para o teor de água de referência. Esta correcção respeita a seguinte expressão.

$$E_i = E_{wi}(1 + 0.02(w_i - 12))$$

Onde:

E_{wi} – é o módulo de elasticidade obtido no ensaio

w_i – é o teor de água do provete

Da operação apresentada por esta expressão resultam os valores corrigidos do módulo de elasticidade que se apresentam de seguida.

Tabela 17 – Cálculo do Módulo de elasticidade corrigido para o teor de água de referência

	E_w (N/mm^2)	teor em água [%]	E (N/mm^2)
1	15188	21.4	18032
2	9383	20.1	10897
3	10666	21.1	12612
4	6673	19.9	7733
5	5164	22.1	6205
6	10738	22.6	13008
7	13762	21.8	16451
9	16118	21.5	19188
10	14048	17.9	15710
11	12199	19.6	14047
12	10242	22.3	12362
14	10381	17.7	11555
15	10382	18.6	11752
17	12141	22.4	14666
18	11876	18.9	13524
19	12863	21.8	15387
média	11364	20.6	13321
desvio padrão	2857	1.7	3402
máximo	16118	22.6	19188
mínimo	5164	17.7	6205

Recorrendo agora à expressão correctiva para o efeito da flexão pura, já atrás apresentada resulta o seguinte valor de módulo de elasticidade em flexão característico.

$$\bar{E} = \sum \frac{E_i}{n} \cdot 1.3 - 2690 = 13321 \times 1.3 - 2690 = 14627.3 \text{ N/mm}^2$$

3.6.2.3. Massa volúmica característica

Previamente ao cálculo da densidade característica é necessário, à semelhança do que fora efectuado para o cálculo do módulo de elasticidade, corrigir as densidades do ensaio para o teor de água de referência. Esta correcção segue a expressão que se apresenta de seguida. (EN 384 2004)

$$\rho_i = \rho_{wi}(1 + 0.005(w_i - 12))$$

Onde:

ρ_{wi} – é a densidade obtida no ensaio

w_i – é o teor de água do provete

Na tabela seguinte apresentam-se os valores de densidade corrigidos para o teor de água de referência.

Tabela 18 – Densidade corrigida para o teor de água de referência

	ρ_w [kg/m ³]	teor em água [%]	ρ_0 [kg/m ³]
1	558	21.4	532
2	598	20.1	574
3	747	21.1	713
4	720	19.9	691
5	753	22.1	715
6	582	22.6	551
7	585	21.8	556
8	608	25.1	569
9	607	21.5	578
10	657	17.9	638
11	567	19.6	546
12	598	22.3	567
13	644	18.0	624
14	762	17.7	741
15	641	18.6	620
16	767	19.4	739
17	585	22.4	554
18	575	18.9	555
19	597	21.8	568
20	749	19.3	722
média	645	21	618
desvio padrão	75	2	74
máximo	767	25	741
mínimo	558	18	532

Importa referir que para o cálculo da densidade se utilizaram os 20 espécimes ensaiados, incluindo os 4 sem aptidão estrutural.

Para o cálculo do valor da massa volúmica característica a norma apresenta a seguinte expressão.

$$\rho_k = \rho_{05} = (\bar{\rho} - 1.65s) = 618 - 1.65 \times 74 = 496 \text{kg/m}^3$$

Sendo:

ρ_{05} – é a massa volúmica para o percentil 5% da amostra correspondente ao valor característico

$\bar{\rho}$ – é a massa volúmica média da amostra

s – é o desvio padrão da amostra

3.6.2.4. Outras propriedades obtidas indirectamente

Além das três propriedades obtidas dos ensaios, a EN381:2004 apresenta expressões para o cálculo de outras propriedades. Em seguida apresentam-se as expressões para o cálculo destas propriedades.

Da tensão característica de rotura à flexão ($f_{m,k}$) calculam-se pelas seguintes expressões a tensão característica de rotura à compressão na direcção das fibras ($f_{c,0,k}$), a tensão característica de rotura em tração na direcção das fibras ($f_{t,0,k}$) e a tensão característica de rotura por corte ($f_{v,k}$).

$$f_{t,0,k} = 0.6f_{m,k}$$

$$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0.45}$$

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3.8 \\ 0.2(f_{m,k})^{0.8} \end{array} \right.$$

Da densidade característica (ρ_k) podem-se obter as tensões características de rotura à tração e compressão na direcção perpendicular às fibras, respectivamente $f_{t,90,k}$ e $f_{c,90,k}$.

$$f_{t,90,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.6 \\ 0.0015\rho_k \end{array} \right.$$

$$f_{c,90,k} = 0.007\rho_k$$

Por fim, a partir do módulo de elasticidade global em flexão calculado no ensaio (\bar{E}), pode-se determinar o módulo de elasticidade característico para o percentil de 5% ($E_{0.05}$), o módulo de flexão na direcção perpendicular às fibras ($E_{90,mean}$) e o módulo de distorção (G_{mean}).

$$E_{0,05} = 0.67\bar{E}$$

$$E_{90,mean} = \bar{E}/30$$

$$G_{mean} = \bar{E}/16$$

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos.

$$\begin{aligned} f_{m,k} &= 23.5 \text{ N/mm}^2 \\ \rho_{mean} &= 618 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_k &= 496 \text{ kg/m}^3 \\ E &= 14627 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{t,0,k} &= 14.1 \text{ N/mm}^2 \\ f_{c,0,k} &= 20.7 \text{ N/mm}^2 \\ f_{v,k} &= 2.50 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{t,90,k} &= 0.60 \text{ N/mm}^2 \\ f_{c,90,k} &= 3.47 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{0,05} &= 9800 \text{ N/mm}^2 \\ E_{90,mean} &= 488 \text{ N/mm}^2 \\ G_{mean} &= 914 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

3.6.3. Comparação dos resultados com as classes da norma EN 338:2003

O enquadramento dentro das classes estruturais da norma EN 338:2003 é efectuado primeiro pela distinção entre as resinosas e folhosas, sendo o pinho manso do tipo resinosa. Ficando enquadrado nas classes C. De seguida utilizando o valor da tensão característica de rotura à flexão obtido nos ensaios determinou-se a classe que mais se aproxima da madeira de pinho manso, que seria a classe C24.

Na tabela seguinte comparam-se os resultados obtidos com os valores característicos da classe C24.

Tabela 19 – Comparação entre as propriedades mecânicas do pinho manso com as propriedades da classe C24

		Pinho	
		C24	Manso
Tensões de rotura características [N/mm²]			
Flexão paralela	$f_{m,k}$	24	23.5
Tracção paralela	$f_{t,0,k}$	14	14.1
Tracção perpendicular	$f_{t,90,k}$	0.5	0.6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	21	20.7
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2.5	3.47
Corte	$f_{v,k}$	2.5	2.50
Propriedades de Elasticidade [kN/mm²]			
Módulo de elasticidade paralelo	$E_{0,mean}$	11	14.6
5% módulo de elasticidade paralelo	$E_{0,05}$	7.4	9.8
Módulo de elasticidade perpendicular	$E_{90,mean}$	0.33	0.49
Módulo de distorsão	G_{mean}	0.69	0.91
Massa volumica [kg/m³]			
Característica	ρ_k	350	496
Média	ρ_{mean}	420	618

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. Conclusões

Do trabalho apresentado, apesar da reduzida quantidade de provetes analisada é constatável que a madeira de pinho manso analisada apresenta boas propriedades de resistência e rigidez. Esta, apresenta do ponto de vista da resistência propriedades muito semelhantes à classe C24 definida na norma EN338:2003, no entanto, do ponto de vista da rigidez esta madeira estaria próxima da classe C40 e do ponto de vista da massa volúmica da classe C50. Verificou-se que a amostra apresentava uma tensão de rotura característica à flexão de 23.5MPa, um módulo de elasticidade médio em flexão de 14.6GPa e uma massa volúmica de 618kg/m³.

Verificou-se ainda através de pesquisa bibliográfica, que do ponto de vista das propriedades físicas, a madeira de pinho manso embora seja uma madeira retrátil é uma madeira mais estável que a do pinheiro bravo, largamente utilizada em Portugal.

Pode-se concluir ainda que a classificação visual de acordo com a NP 4305:1995 se revela muito conservativa quando se compara os valores característicos da tensão de rotura à flexão das duas classes de qualidade do pinho bravo, E e EE e os resultados dos ensaios mecânicos.

O presente trabalho visava também correlacionar os ensaios dinâmicos para a obtenção do módulo de elasticidade com os valores obtidos nos ensaios mecânicos. Destes ensaios concluiu-se que existe uma elevada correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e mecânico sendo $R^2=0.86$. Dada esta correlação foi possível criar uma expressão de aproximação dos valores de tensão de rotura partindo dos valores do ensaio dinâmico do módulo de elasticidade em flexão.

4.2. Trabalho Futuro

Tendo em vista uma melhor caracterização desta madeira sugere-se que seja efetuado um estudo mais alargado com mais amostras e com maior numero de provetes, de forma a poder alargar o conhecimento das propriedades mecânicas deste tipo de madeira.

Como foi referido neste trabalho, existe a perspetiva que o pinheiro manso venha a alargar a sua importância em termos económicos. Um dos passos importantes para um melhor aproveitamento desta previsível maior implantação nacional da espécie, seria a realização de um estudo que permitisse uma caracterização abrangente da madeira e que levasse à criação de um sistema de classificação visual da madeira, à semelhança do que já existe para o pinho bravo, com as suas classes de qualidade E e EE.

Outro dos trabalhos que teria interesse académico e económico seria o desenvolvimento de uma campanha de ensaios que permitisse a homologação da classificação da madeira em classes estruturais da norma EN 338, utilizando ensaios não destrutivos, por exemplo MTG.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Botelho Júnior, Jerónimo Araújo. *AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- Cachim, Paulo Barreto. *Construção em Madeira*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2014.
- Carvalho, Albino de. *Madeiras Portuguesas Volume II*. Lisboa: Direcção-Geral das Florestas, 1997.
- CMG. *Plano Director Municipal de Grândola - Anexo VI - METODOLOGIA DE ANÁLISE ESPACIAL DA ESTRUTURA ECOLÓGICA MUNICIPAL*. Grândola: Câmara Municipal de GRândola, 2017.
- Costa, Mário A. Silveira da. *Pinheiro Bravo e Pinheiro Manso*. Lisboa: Litexa Editora Lda, 1995.
- Couto, Miguel Ángel García Couto. *Atlas Climático Ibérico*. Closas-Orcoyen S. L., 2010.
- Cruz, Helena, Saporiti Machado, Manuela Rodrigues, e Gilda Monteiro. *M2 - Madeira para Construção - Pinho bravo para estruturas*. Lisboa: LNEC, 2000.
- Divós, Ferenc, e Toshinari Tanaka. *Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood*. Sopron, Hungary: Institute of Wood and Paper Technology, University of West Hungary, 2005.
- EN 13183-1, CEN -. *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2002.
- EN 1912, CEN-. *Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species*. Bruxelas: European Comitee for Standardization, 2013.
- EN 1995-1-1, CEN-. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2004.
- EN 1995-1-2, CEN -. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2004.
- EN 1995-2, CEN-. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 2: Bridges*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2004.
- EN 338, CEN-. *Structural timber - Strength classes*. Bruxelas: European Committeee for Standardization, 1995.
- EN 384, CEN -. *Structural Timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. Bruxelas: European Committeee for Standardization, 2004.

- EN 408+A1, CEN -. *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. Bruxelas: European Comite for Standardization, 2010.
- Evaristo, Rita Costa e Isabel. *Condução de Povoamentos de Pinheiro Manso e Características Nutricionais do Pinhão*. Oeiras: Instituto Nacional dos Recursos Biológicos - INRB, IP, 2008.
- Fundação Wikimedia. *Grândola*. 30 de 06 de 2017. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%A2ndola>.
- IPMA. *Instituto Português do Mar e da Atmosfera*. 30 de 06 de 2017. <https://www.ipma.pt/pt/>.
- NP 4305, LNEC-. *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas - Classificação visual*. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade, 1995.
- prEN 1310, CEN -. *Round and sawn timber - Method of measurement and features*. Bruxelas: European Comite for Standardization, 1995.
- Santos, Cristina. *COLHEITA, TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO, TRANSFORMAÇÃO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE PINHAS DE PINUS PINEA*. Lisboa: ICNF, 2015.
- Uva, José Sousa. *6º Inventário Florestal Nacional*. Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas, 2013.

ANEXOS

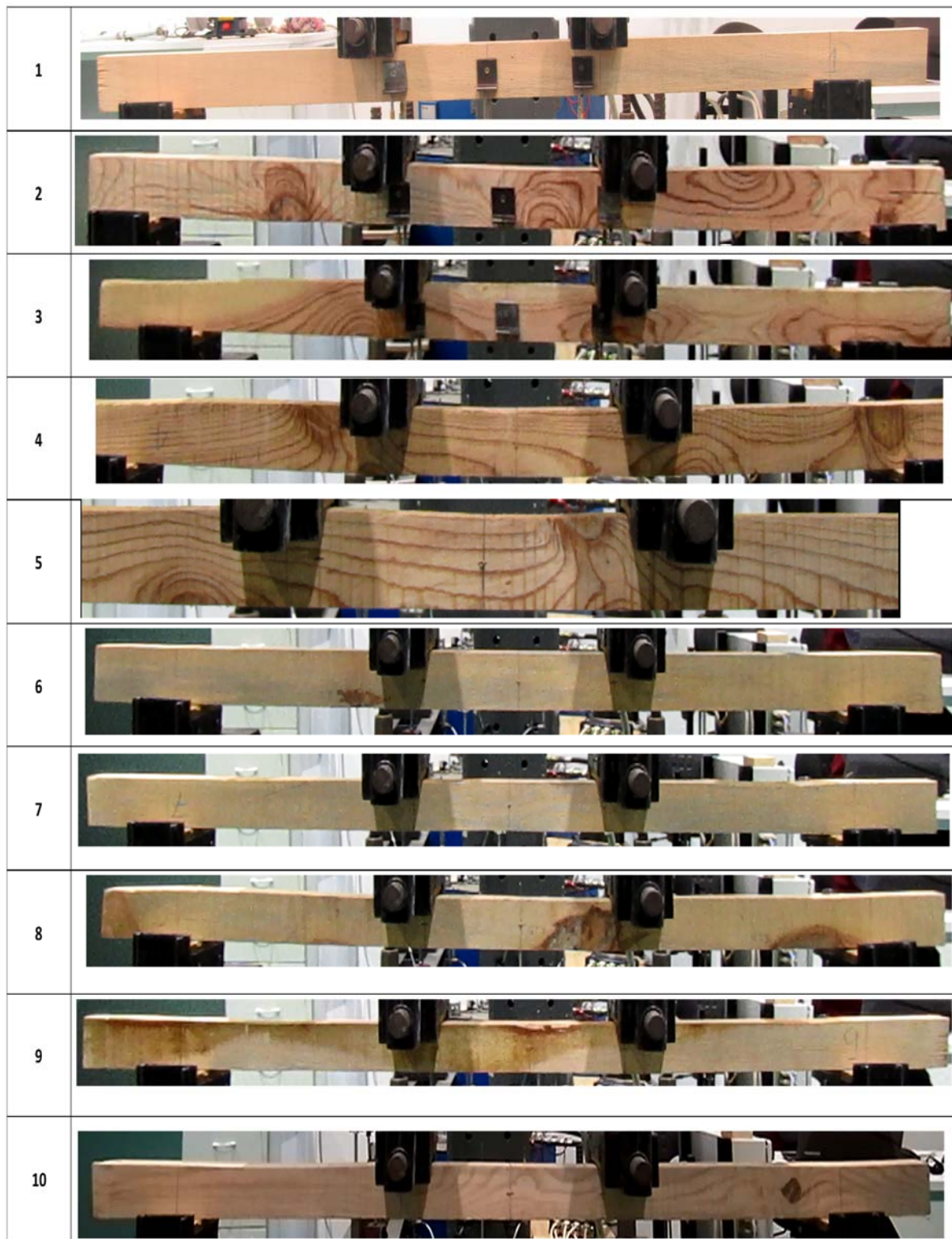


Figura 56 – Perfil fotográfico dos provetes 1-2

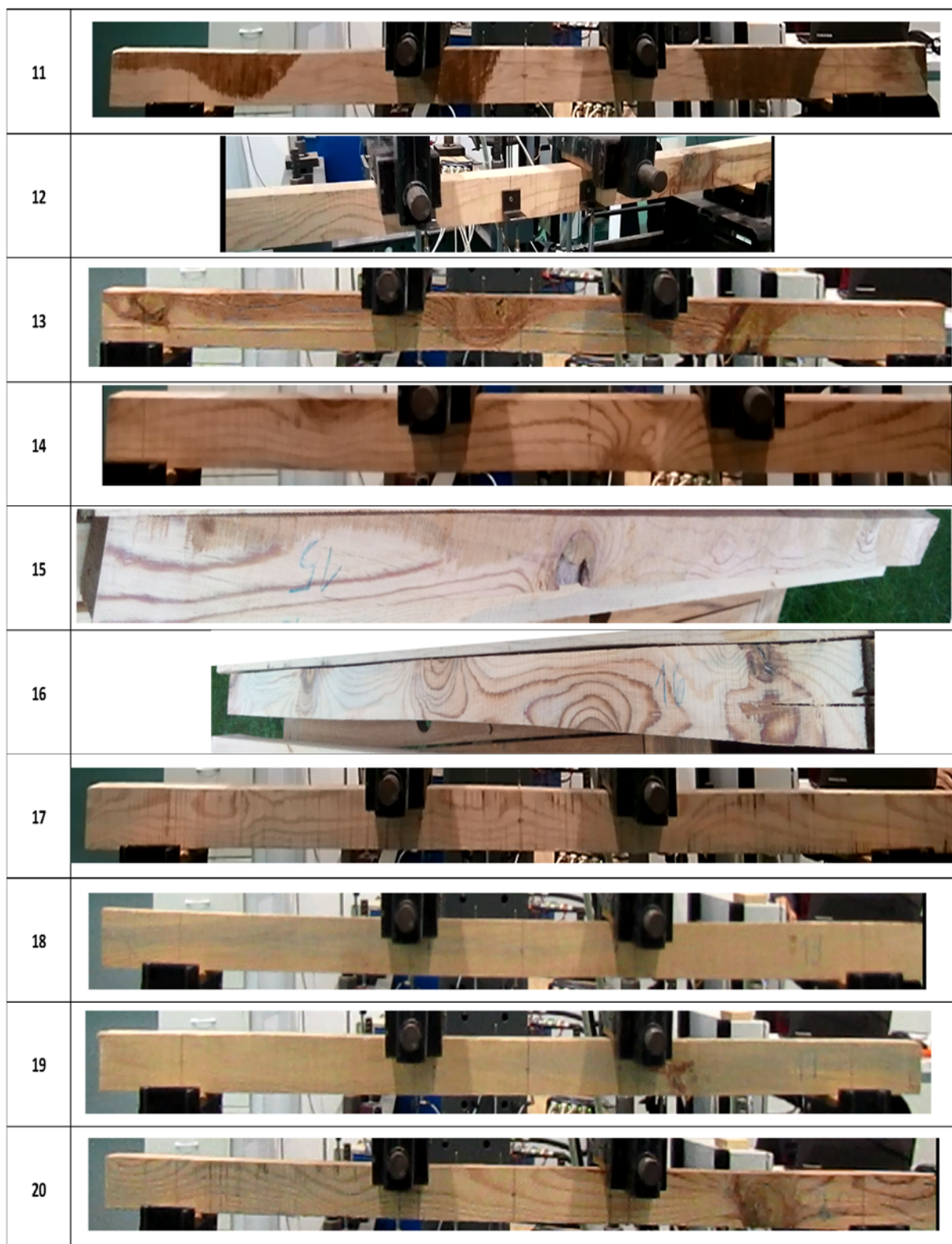
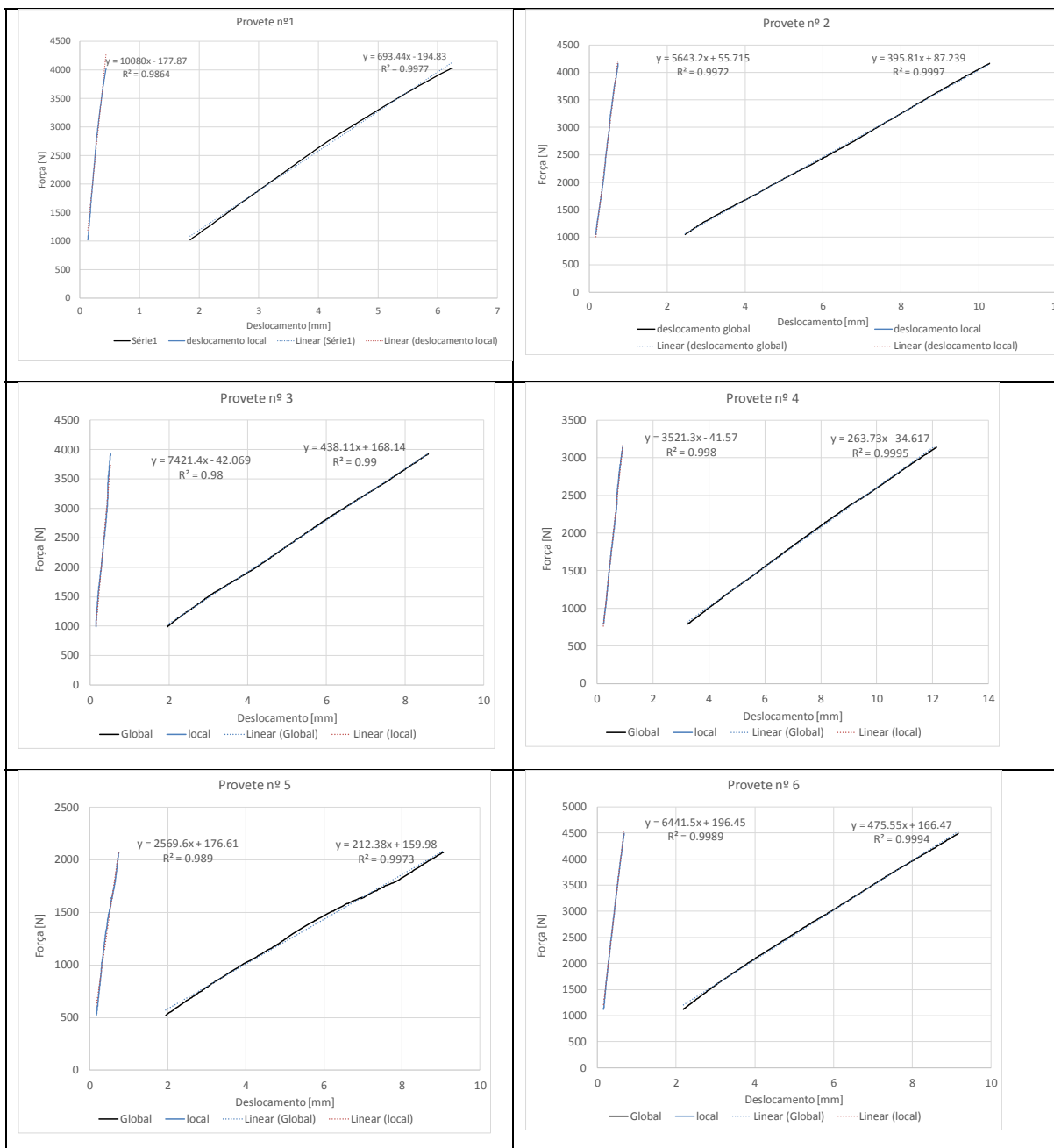
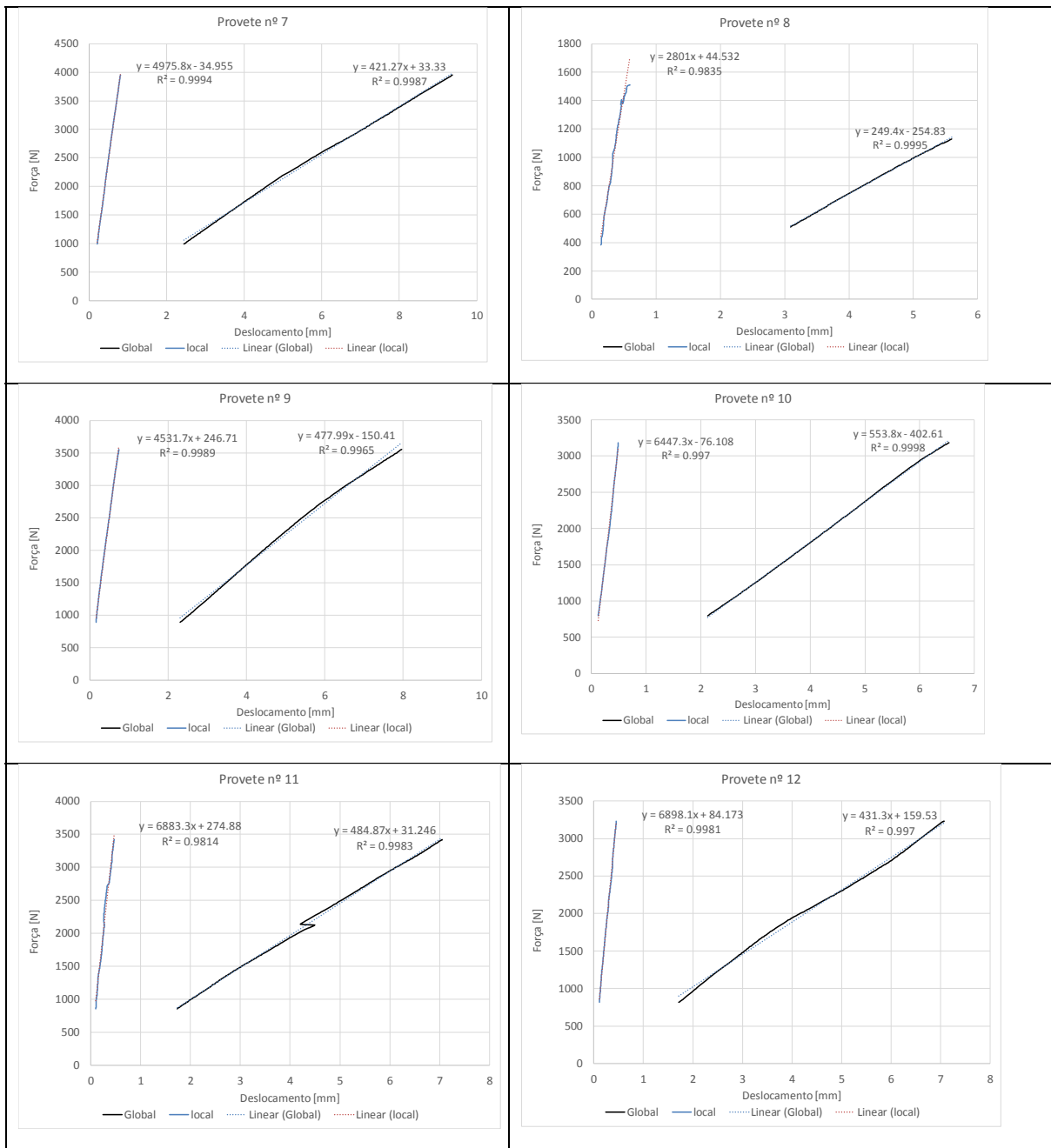
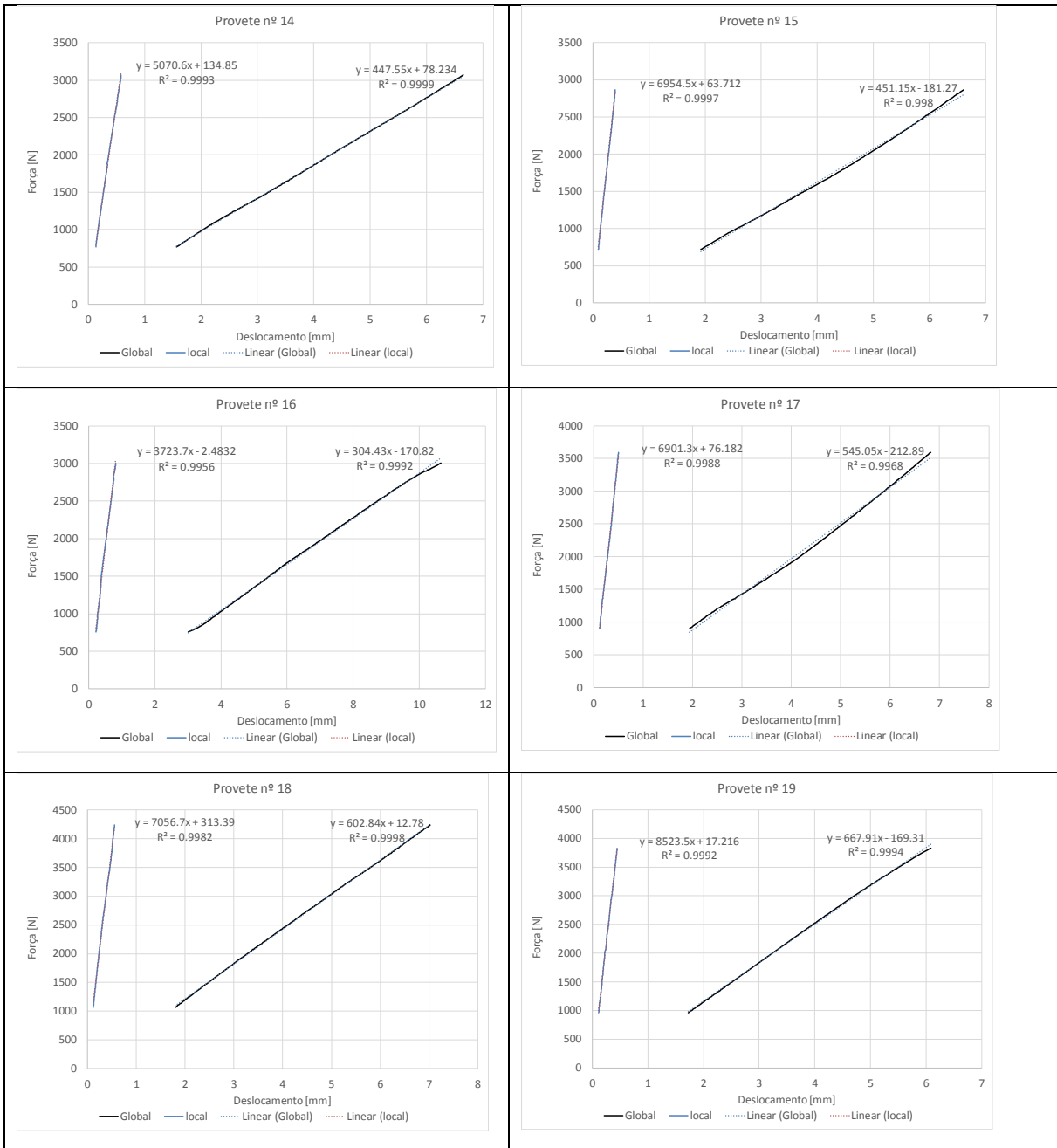


Figura 57 – Perfil fotográfico dos provetes 2-2

Figura 58 – Gráficos força-deslocamento dos ensaios dos módulos de elasticidade







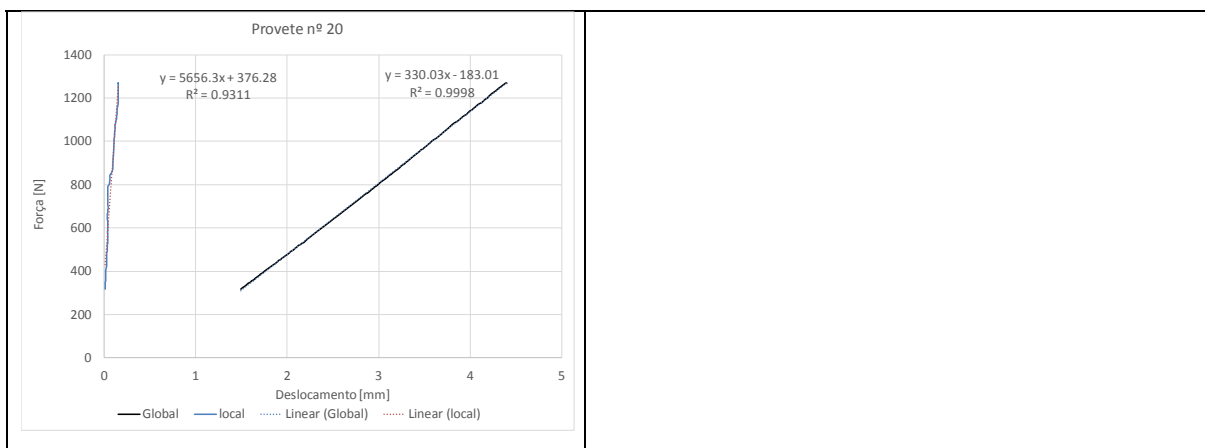
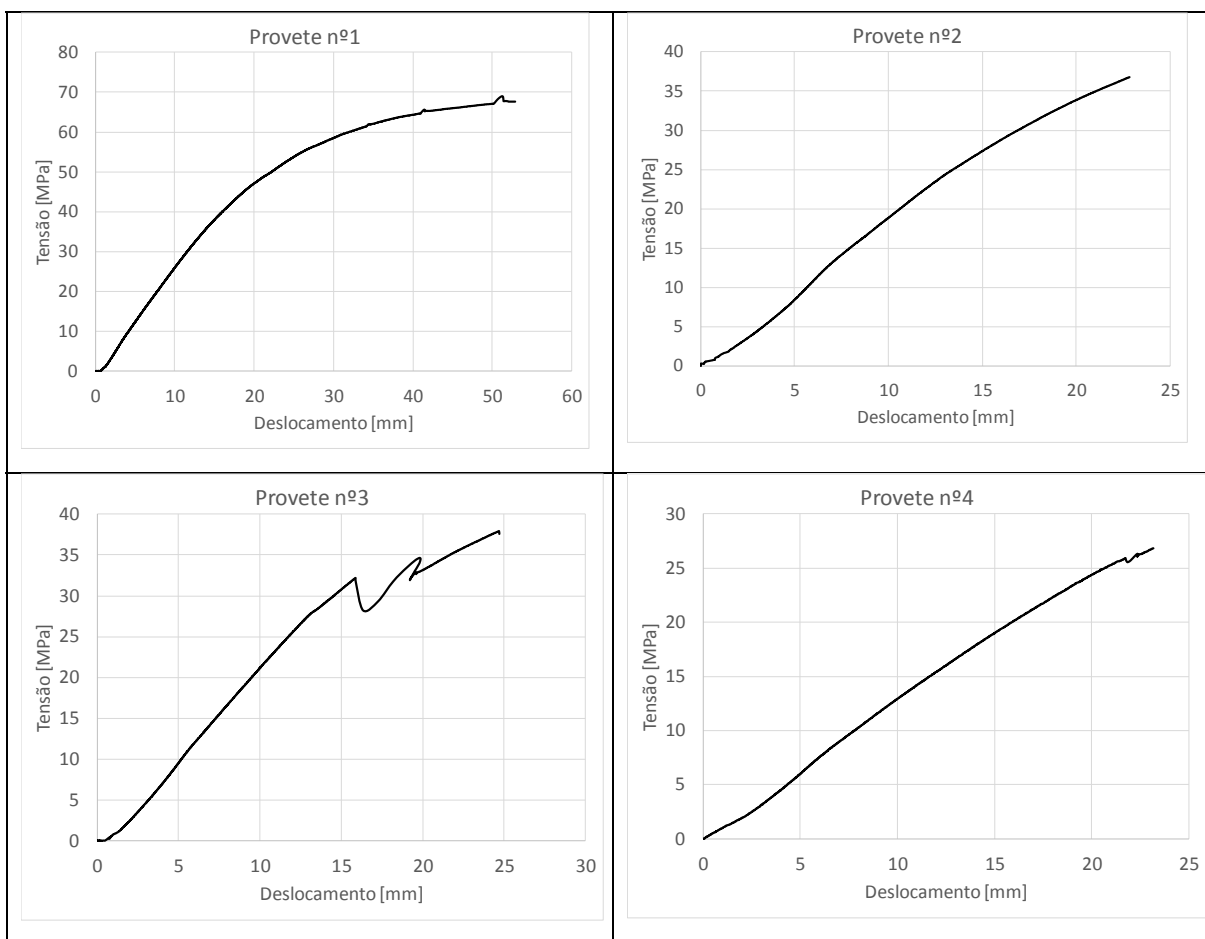
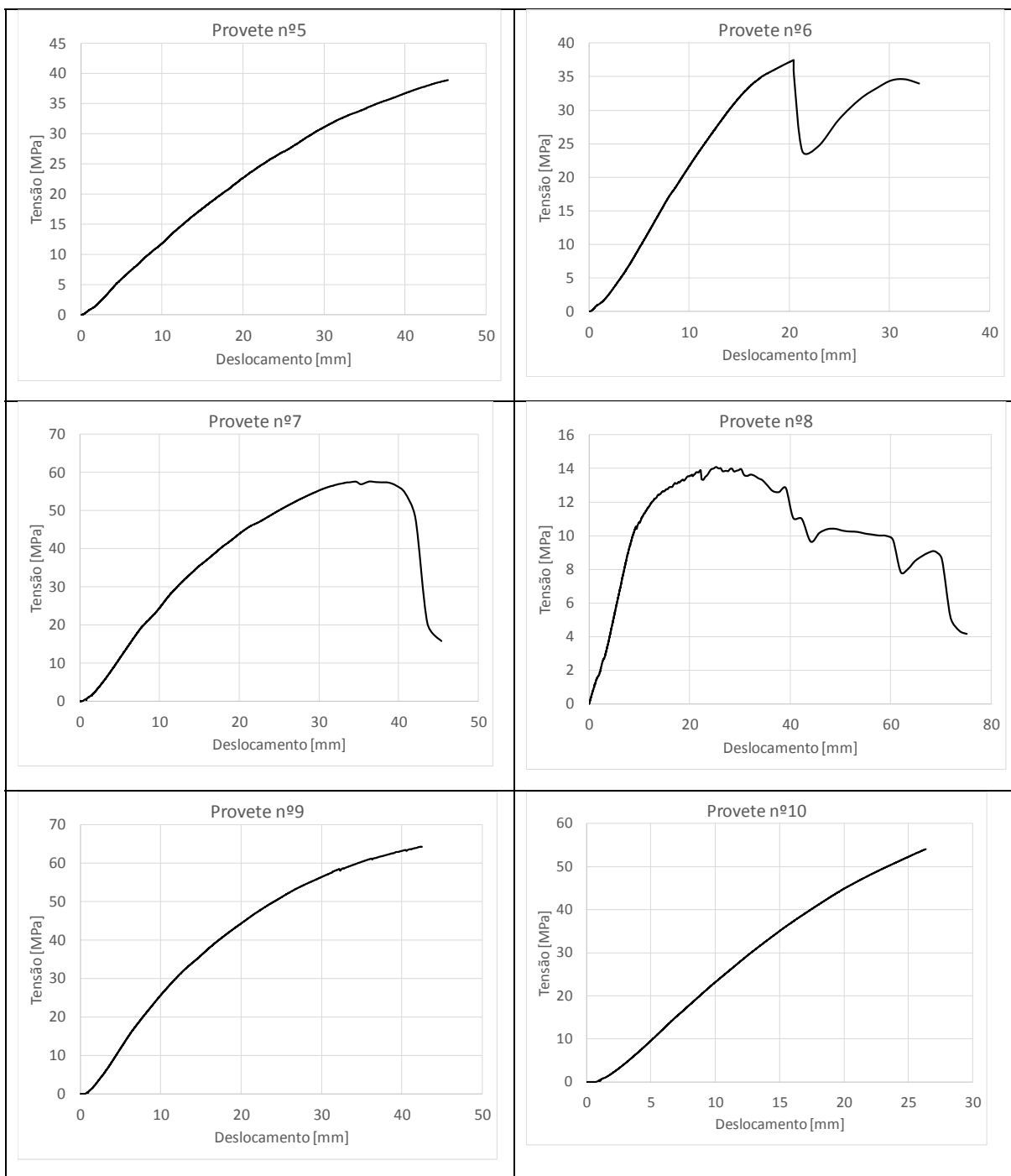
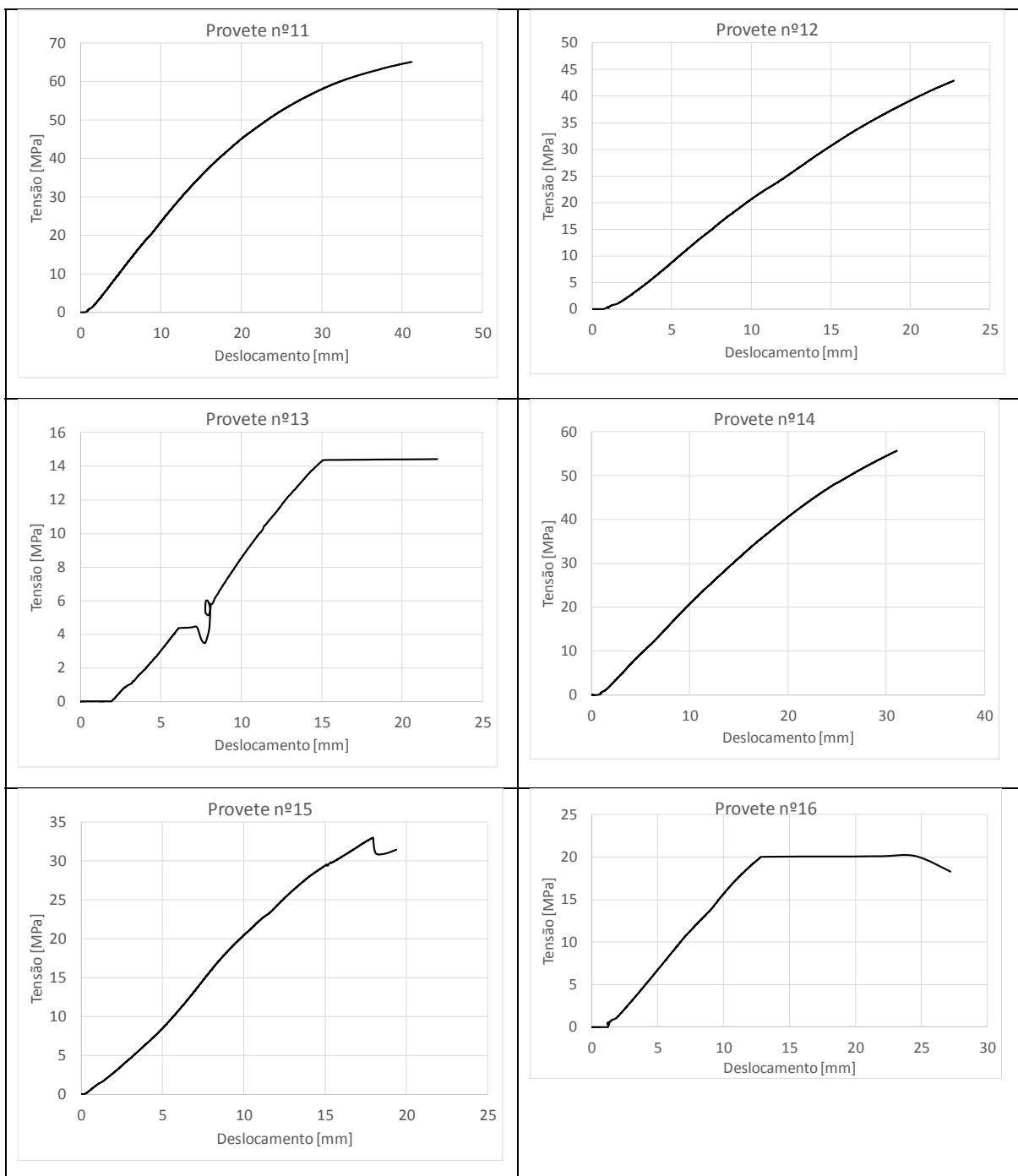
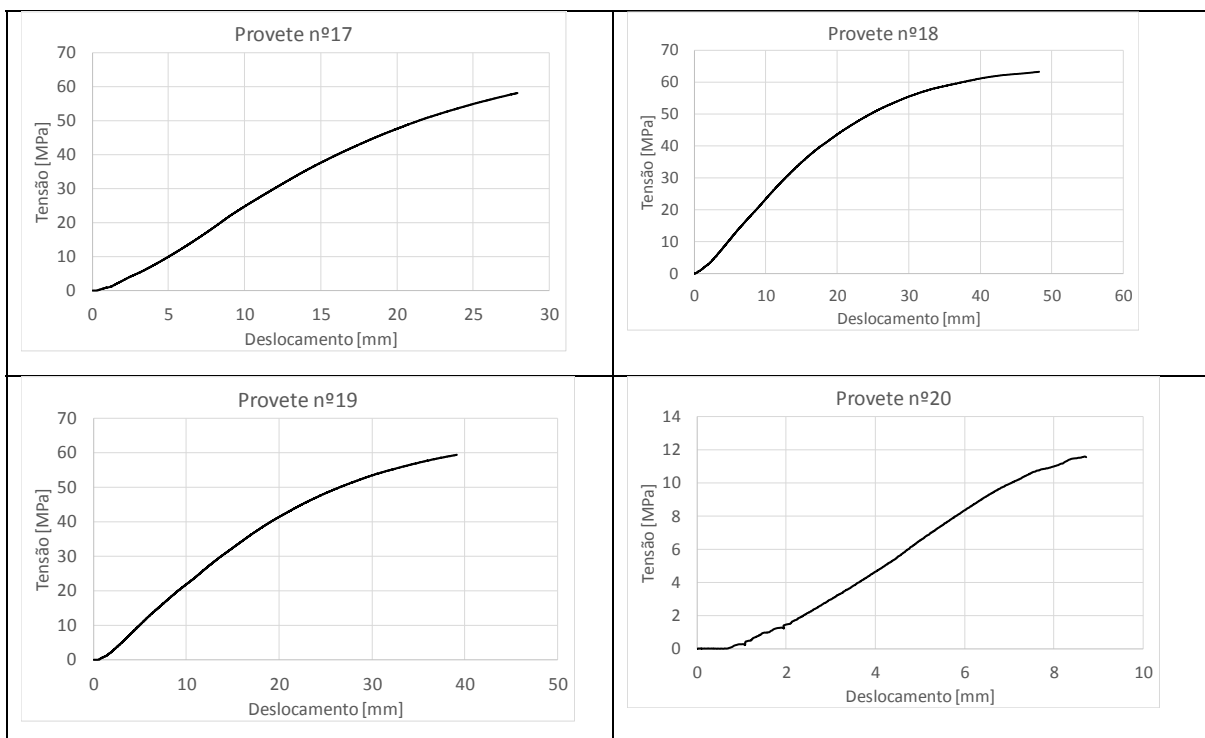


Figura 59 – Gráficos dos ensaios de rotura









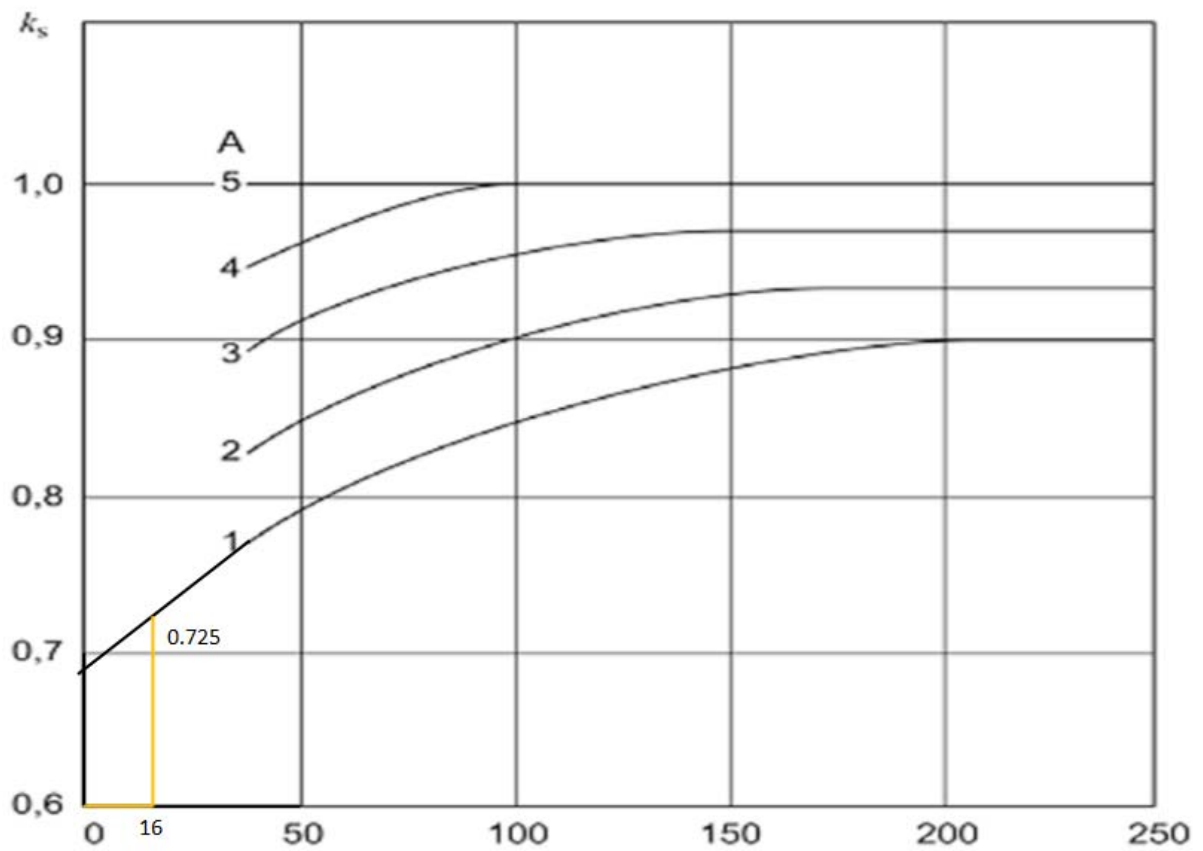


Figura 60 – cálculo do coeficiente k_s