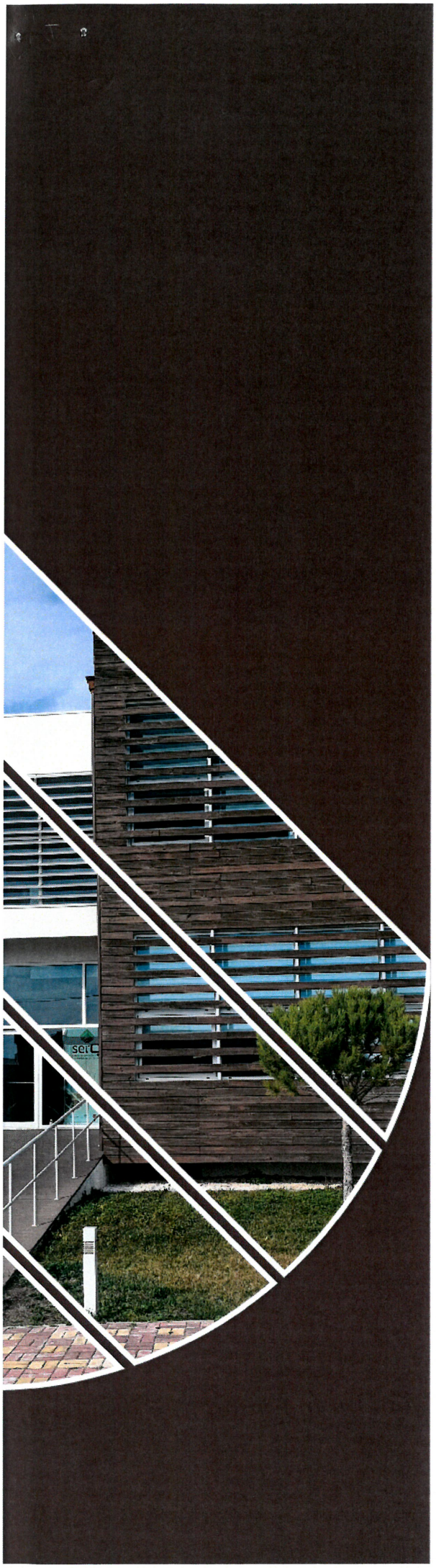

RELATÓRIO PRELIMINAR: RP/SERQ/190702

Caracterização mecânica da madeira de Acácia

Projeto: Promoção da madeira de Criptoméria – desenvolvimento de produtos inovadores para a construção

Julho 2019

serQ
centro de inovação e competências da floresta

Cofinanciado por:

AÇORES 2020 PROGRAMA OPERACIONAL FEDER FSE

GOVERNO DOS AÇORES

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

ENQUADRAMENTO

O presente relatório foi elaborado no âmbito do projeto "Promoção da madeira de Criptoméria na construção. Novos produtos, oportunidades e mercados", em que a execução dos trabalhos está a cargo do Centro de Inovação e Competências da Floresta (SerQ). Este relatório tem como principal objetivo apresentar o trabalho efetuado até ao momento.

Tendo como objetivo principal a investigação e desenvolvimento de produtos para a construção tendo por base a utilização da madeira de Criptoméria dos Açores, o presente projeto inclui as seguintes tarefas:

- Desenvolvimento de um sistema de Classificação Mecânica, de acordo com a EN 14081 [1, 2]:
    - Seleção de elementos para ensaio tendo por base a classificação visual de acordo com os procedimentos referidos na Norma NP 4544 [3];
    - Realização de ensaios dinâmicos não-destrutivos, com *MTG* e acelerómetro;
    - Ensaios estáticos de acordo com os procedimentos definidos na Norma EN 408 [4];
- Desenvolvimento de produtos.

Tendo em consideração o desenvolvimento de produtos, foi definido como objetivo o estudo da combinação das espécies Criptoméria dos Açores e de Acácia (*Acácia melanoxylon*). O conhecimento das propriedades mecânicas da matéria-prima é de elevada importância para o desenvolvimento de produtos, pelo que foi considerada a realização de ensaios experimentais para determinação das propriedades mecânicas à flexão (módulo de elasticidade e resistência à flexão).

No processo de caracterização mecânica foi considerada uma amostra reduzida (80 provetes) obtida de dois lotes entregues nas instalações do SerQ de madeira de *Acácia melanoxylon* com duas proveniências distintas (Açores e Continente). A seção transversal dos provetes foi igual, mas com comprimentos diferentes, tendo-se dividido, para efeitos de organização e planeamento, em dois lotes consoante a proveniência:

- Lote D (Açores): 50mm x 120mm x 2200mm
- Lote E (Continente): 50mm x 120mm x 2900mm

No âmbito do presente relatório são apresentados os resultados relativos aos ensaios de caracterização mecânica de madeira de Acácia (ambas as proveniências) para efeitos de posterior desenvolvimento de produtos no âmbito do projeto.

ÍNDICE

ENQUADRAMENTO 3
ÍNDICE 4
1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 5
2. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS 6
2.1. Caracterização Mecânica 6
2.1.1. Ensaios dinâmicos 6
2.1.2. Ensaios estáticos 7
2.1.3. Determinação de teor de água e massa volúmica 9
3. RESULTADOS 10
REFERÊNCIAS 14

1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra é constituída por madeira de Acácia dividida em 2 lotes de acordo com a proveniência e com as características indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos lotes de Acácia (proveniência, dimensões, e número de provetes).

Lote	Proveniência	Número de elementos	b - Largura [mm]	h - Altura [mm]	L - Comprimento [mm]
D	Açores	40	50	120	2200
E	Continente	40	50	120	2900

Aquando da receção da madeira, nas instalações do SerQ, verificou-se, através de humidímetro de agulhas que alguns elementos apresentavam teor de água ligeiramente acima dos 20%. Optou-se então pela abertura dos malotes e pela colocação de sarrafos de modo a permitir uma melhor circulação de ar entre os vários elementos e assim permitir uma redução natural do teor de água dos elementos.

Posteriormente, e tendo como objetivo a determinação das propriedades mecânicas à flexão mais relevantes para o dimensionamento de produtos/estruturas, considerou-se a seleção de duas amostras (uma de cada lote) com o número mínimo de 40 provetes por lote, de acordo com o mínimo definido na EN 384 [7].

Os provetes selecionados foram medidos nas várias dimensões, nomeadamente: i) comprimento, ii) espessura e iii) largura. No caso das dimensões relativas à seção transversal, estas foram medidas em três pontos (ambos os todos e a meio) para ter em consideração as variações que ocorrem devido ao processamento em serração.

Nesta fase, o teor de água dos elementos foi também medido recorrendo a um humidímetro de agulhas (Figura 1). Os valores médios obtidos para cada lote são apresentados na Tabela 2.

Figura 1. Medição do teor de água com o humídimetro de agulhas. Fonte: SerQ

Tabela 2. Dimensões dos provetes da amostra (valores médios)

Lote	Comprimento – L [mm]	Largura – b [mm]	Altura – h [mm]	Teor de água, W (%)
D	2201	49.3	118.3	14.0
E	2898	49.9	121.5	12.9

2. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS

Os trabalhos experimentais descritos de seguida compreenderam a realização de uma extensa campanha experimental que envolveu a realização de ensaios não destrutivos (ensaios dinâmicos) e destrutivos (ensaios estáticos) que serão descritos de seguida. Após os ensaios destrutivos foram recolhidas amostras de cada provete para determinação da massa volúmica e teor de água.

2.1. Caracterização Mecânica

Para a realização da caracterização mecânica da amostra foram realizados ensaios dinâmicos e estáticos. Com a realização da caracterização mecânica pretende-se obter o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}) e estático (local – MOE_{local} e global - MOE_{global}) bem como a tensão resistente à flexão (f_m). O MOE_{din} foi determinado através do recurso ao equipamento *Machine Timber Grader* (MTG).

2.1.1. Ensaios dinâmicos

O MTG é um equipamento portátil utilizado para a realização do ensaio não-destrutivo e determinação do módulo de elasticidade dinâmico, para a generalidade das espécies de madeira. Para determinadas espécies (mais utilizadas comercialmente para fins estruturais) este equipamento permite a classificação do elemento, de acordo com as Classes de Resistência da EN 338 [5] (Figura 2). O equipamento utiliza, como método não-destrutivo, o ensaio de vibração longitudinal, que consiste na introdução de uma vibração no elemento, através de um impacto num dos topos do elemento, e medição, no mesmo topo, da frequência de vibração resultante desse impacto. Esta frequência própria de vibração é relacionada com as propriedades geométricas e massa volúmica do elemento para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Esta é a propriedade indicadora para a atribuição de uma classe resistente, uma vez que apresenta boas correlações com o módulo de elasticidade estático que, por sua vez, combinado com a massa volúmica, geralmente é a propriedade que melhor correlação apresenta com a tensão de rotura.

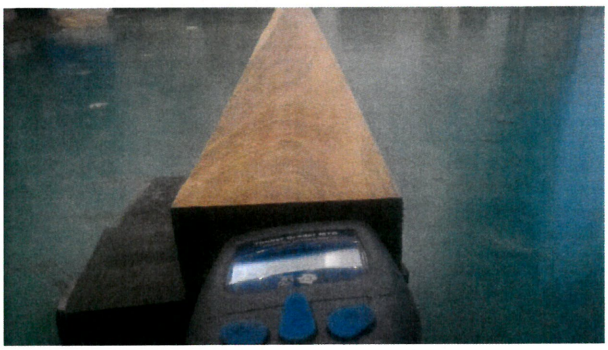

Figura 2. Machine Timber Grader. Fote: SerQ

Para tal, como *input* no *software* do equipamento, são consideradas as dimensões da secção transversal do elemento, o comprimento, o teor de água no momento do ensaio e a respetiva massa. O *output* gerado após o ensaio corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico, sendo também possível registar a frequência de vibração natural do elemento.

O teor de água de cada elemento, foi determinado com recurso ao humidímetro de agulhas (Figura 1). O humidímetro de agulhas é um aparelho que permite medir o teor de água da madeira na seção onde

as agulhas (elétrodos) são cravadas. A medição desta característica baseia-se na condutividade elétrica entre as duas agulhas no material de medição. A medição é realizada em três pontos (a aproximadamente 60cm dos topos e a meio vão) do elemento, sendo considerado o valor médio das três medições.

2.1.2. Ensaios estáticos

Para a determinação das propriedades mecânicas dos elementos da amostra foram realizados ensaios estáticos, seguindo as indicações da norma EN 408:2010+A1 [4]. Com a realização dos ensaios estáticos foi determinado o módulo de elasticidade estático (MOE) e a tensão resistente à flexão (f_m) dos elementos.

i) Ensaio para determinação de módulo de elasticidade estático (MOE)

O esquema de ensaio adotado é apresentado na Figura 3 e Figura 4. Neste ensaio, a carga aplicada não deve exceder 40% da força máxima estimada de rotura ($F_{max,est}$) e deve ser aplicada em controlo de deslocamento, com uma velocidade de 0,003h mm/s (h – altura nominal da secção transversal). Tal como indicado na Figura 3, os deslocamentos foram medidos através de transdutores de deslocamento lineares de capacidade máxima de 20 e 50 mm.

O vão de ensaio preconizado pela norma é de 18h (h – altura nominal da secção transversal). Contudo, para o Lote D, não foi possível utilizar essa relação por limitação no comprimento dos provetes, pelo que foi adotado o vão de 17h de acordo com as variações admissíveis para as distâncias entre ponto de carga e apoio mais próximo. Para o Lote E foi adotado o vão de 18h. Tendo este aspeto em consideração, e o comprimento dos elementos disponível a escolha da posição de ensaio foi tida por simplificação como parte central (distância entre pontos de carga) a meia distância do comprimento dos provetes, em particular no lote D.

O módulo de elasticidade estático local (MOE_{local}) foi determinado através da Equação 1, e o módulo de elasticidade global (MOE_{global}) foi determinado através da Equação 2:

$$MOE_{local} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (1)$$

$$MOE_{global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1}\right)} \quad (2)$$

onde,

a – distância entre um ponto de carga e o apoio mais próximo – 6h (mm);

l – vão de ensaio – 18h (mm);

l_1 – distância entre pontos de medição – 5h (mm);

b – largura da secção transversal do elemento (mm);

h – altura da secção transversal do elemento (mm);

I – Momento de inércia da seção (mm^4)

$F_2 - F_1$ – incremento de carga (em newtons) na curva de regressão com um coeficiente de correlação de 0,99 ou superior;

$w_2 - w_1$ – incremento de deformação/deslocamento vertical (em milímetros) correspondente a $F_2 - F_1$.

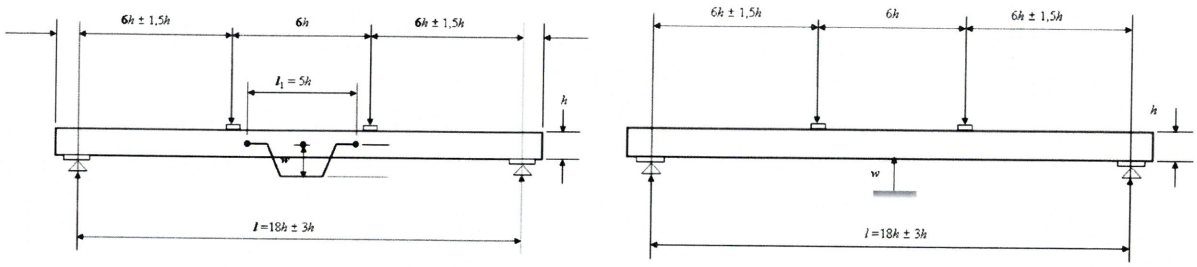

Figura 3. Esquema de ensaio adotado para MOE_{local} (esquerda) e MOE_{global} (direita), de acordo com a norma EN 408:2010+A1 [4]

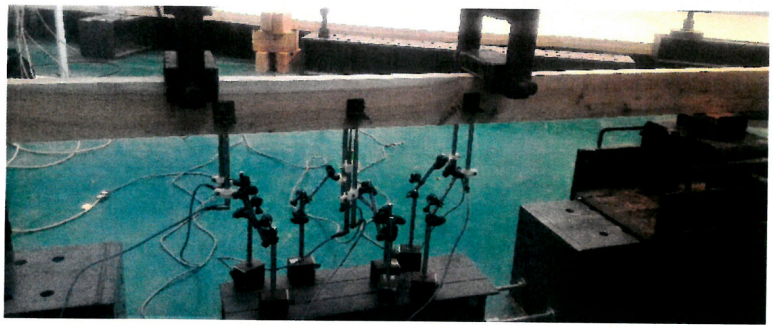

Figura 4. Esquema de ensaio e transdutores de deslocamento utilizados. Fonte: SerQ

ii) Ensaio estático para determinação da tensão resistente à flexão (f_m)

Para a determinação da tensão resistente à flexão (f_m) dos elementos, o esquema de ensaio utilizado foi o mesmo do ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático. De acordo com os requisitos da norma, neste ensaio apenas foi medida a força aplicada, para registo da força máxima na rotura do elemento (F_{max}).

Neste ensaio a aplicação de carga foi realizada em controlo de deslocamento (mm/s) de modo a que a carga máxima ocorresse ao fim de 300 ± 120s.

A posição de ensaio dos elementos, bem como o vão de ensaio foram as adotadas no ensaio estático para determinação do módulo de elasticidade.

A tensão resistente à flexão foi determinada através da Equação 3:

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

onde,

F – força máxima (N);

a – distância entre um ponto de carga e o apoio mais próximo – 6h (mm);

b – largura da secção transversal do elemento (mm);

h – altura da secção transversal do elemento (mm).

2.1.3. Determinação de teor de água e massa volúmica

Após a realização do ensaio de resistência à flexão, foi determinado o teor de água (W) e a massa volúmica (ρ) de todos os elementos ensaiados. Para esse efeito, foi obtida um provete de cada elemento, correspondente à totalidade da secção transversal, com aproximadamente 50 mm de comprimento. Cada provete foi recolhido o mais próximo possível da seção onde ocorreu a rotura, e isenta de defeitos relacionados com a rotura e/ou presença de outros defeitos, (e.g. nós, descaio, etc.).

Foram seguidas as indicações presentes na norma EN 13183-1 [6]. Foi medida a sua massa e respetivas dimensões (comprimento, largura e altura) e colocadas em estufa a 103±2ºC. Posteriormente, foram feitas pesagens sucessivas até registar uma variação de massa inferior a 0,1%. O teor de água (W) foi determinado através da Equação 3:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (4)$$

onde,

m_1 – massa antes da secagem (g);

m_0 – massa depois de seca em estufa (g).

3. RESULTADOS

Na presente secção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos e estáticos realizados.

Desta forma, na Tabela 33, e 4 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}), estático (MOE_{local} e MOE_{global}), resistência à flexão (f_m), massa volúmica (ρ) e teor de água (W), para os lotes D e E, respetivamente. Com base na EN 384 [7], são igualmente apresentados os valores corrigidos tendo em consideração o teor de água, nomeadamente a massa volúmica ($\rho_{12\%}$) e o módulo de elasticidade estático global ($MOE_{12\%}$). Também os valores de resistência à flexão foram ajustados para a altura de referência de 150 mm e para o vão de 18h (f_{m_adj}).

Tabela 3. Resultados dos ensaios dinâmicos e estáticos, massa volúmica e teor de água – Lote D

	MOE_{din} [MPa]	MOE_{local} [MPa]	MOE_{global} [MPa]	f_m [MPa]	ρ [kg/m³]	W [%]	$\rho_{12\%}$ [kg/m³]	$MOE_{12\%}$ [MPa]	f_{m_adj} [MPa]
Média	13451	15462	13648	65.0	590	11.0	593	13499	61.0
Mínimo	10726	10388	9954	27.7	492	9.1	493	9786	25.9
Máximo	20054	23017	20520	130.1	772	15.4	779	20036	121.9
COV (%)	16.4	20.8	17.6	28.1	11.0	15.1	11.0	17.3	28.0
Nº vigas	40								

Tabela 4. Resultados dos ensaios dinâmicos e estáticos, massa volúmica e teor de água – Lote E

	MOE_{din} [MPa]	MOE_{local} [MPa]	MOE_{global} [MPa]	f_m [MPa]	ρ [kg/m³]	W [%]	$\rho_{12\%}$ [kg/m³]	$MOE_{12\%}$ [MPa]	f_{m_adj} [MPa]
Média	14757	15328	14429	72.3	702	12.1	701	14447	69.3
Mínimo	9420	9129	8399	26.8	535	9.2	538	8508	25.7
Máximo	18137	19299	17660	129.1	803	16.8	808	17587	123.8
COV (%)	13.5	15.8	14.4	31.2	10.3	12.2	10.3	14.5	31.2
Nº vigas	40								

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios realizados nas tábuas dos lotes D e E, respetivamente.

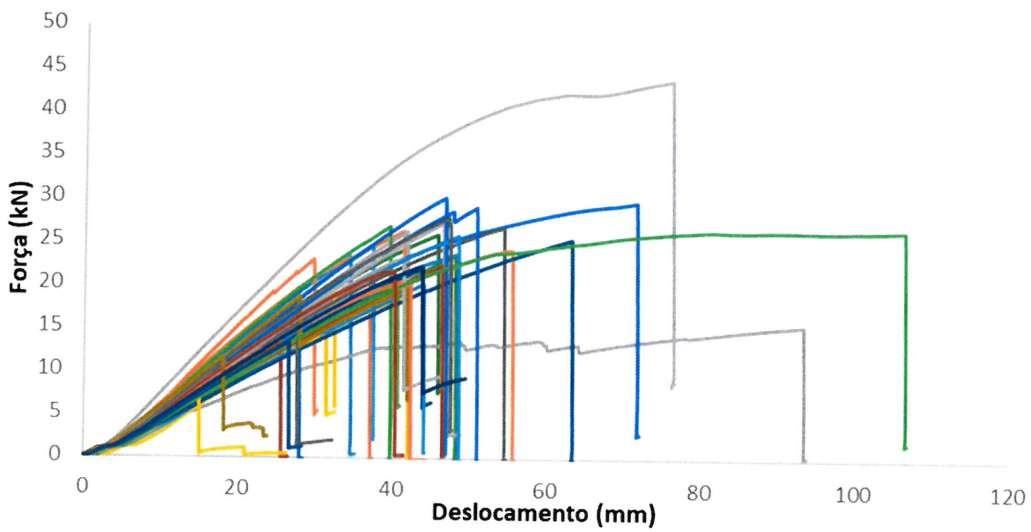

Figura 5. Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de resistência à flexão - Lote D

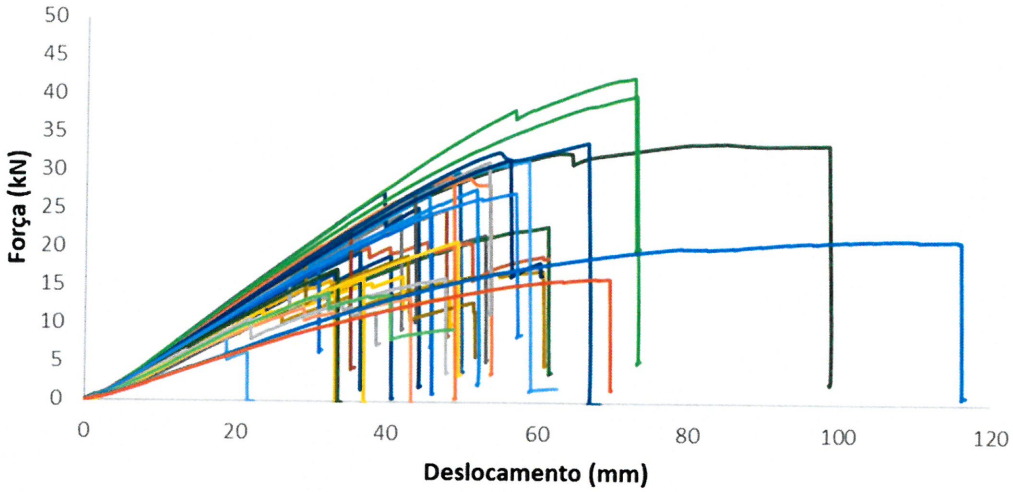

Figura 6. Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de resistência à flexão - Lote E

Verifica-se alguma dispersão de comportamento que reflete os valores de coeficiente de variação registados não só na determinação da resistência à flexão, como também nos valores de módulo de elasticidade.

As roturas dos provetes ocorreram regra geral por tração das fibras na seção central (entre pontos de de aplicação de carga), sem e com a presença de nós (Figura 7). Verificou-se igualmente em 12,5% da amostra a ocorrência de pregas de compressão localizadas na parte superior dos provetes (Figura 8).

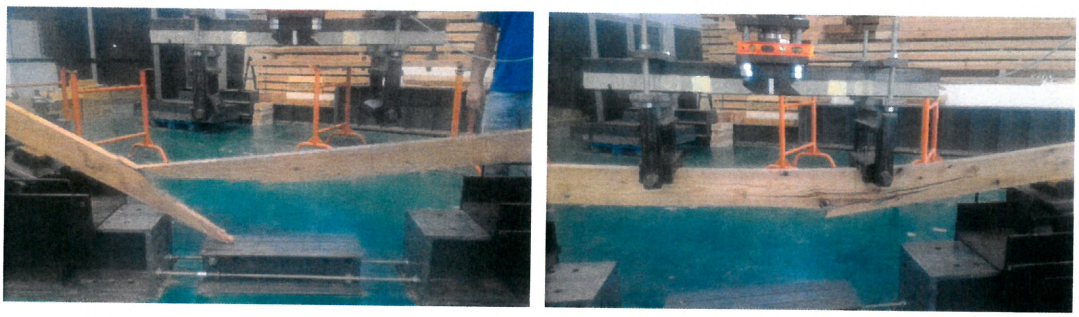

Figura 7. Tipologias de rotura registadas: rotura sem presença de nós, (esquerda); com presença de nós (direita)

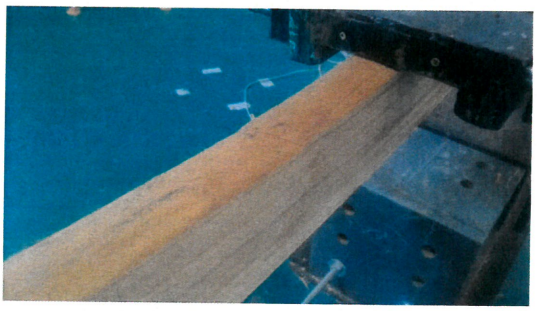

Figura 8. Tipologias de rotura registadas: rotura por compressão