



## **RELATÓRIO**

# **ESTUDO DE DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA DE CRIPTOMÉRIA POR MEIO DE PROCESSO TERMO-HIDRO-MECÂNICO**

**Maio 2020**

Co-financiado por:



GOVERNO  
DOS AÇORES



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu de  
Desenvolvimento Regional

## ESTUDO DE DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA DE CRIPTOMÉRIA POR MEIO DE PROCESSO TERMO-HIDRO-MECÂNICO

### Resumo

---

O presente relatório apresenta os resultados de um estudo relativo a um processo de densificação termo-hidro-mecânico de madeira de *Cryptomeria japonica*, como forma de aumentar a competitividade desta madeira no mercado da construção, atendendo a aplicações não estruturais. O estudo incluiu diversos parâmetros do processo (amolecimento, tempo de prensagem, temperatura e taxa de densificação), sendo que os resultados obtidos permitem admitir este processo como forma viável de suportar a aplicação de madeira de criptoméria (densificada) em aplicações de revestimento de pisos ou de paredes interiores.

O estudo apresenta um carácter meramente de triagem, encontrando-se num nível de TRL (Technology Readiness Level) 3 – Investigação suportada por experimentação. Irá competir às empresas a responsabilidade da plena validação em ambiente operacional através de testes e demonstrações (TRL 8), permitindo reunir as condições necessárias para a sua comercialização, atingindo deste modo o TRL 9 (sistema real finalizado e qualificado).

Palavras-chave: Criptoméria / Processo termo-hidro-mecânico / Dureza / Massa volúmica / Durabilidade

## DENSIFICATION OF SUGI TIMBER THROUGH THERMOHYDROMECHANICAL PROCESS

### Abstract

---

This report presents the results of a study related to a thermo-hydro-mechanical treatment process of *Cryptomeria japonica* wood, as a way to increase the competitiveness of this wood in the construction market, for non-structural applications. The study included several treatment parameters (softening, pressing time, treatment temperature and densification rate), and the results obtained allow to admit this process as a viable way to support the application of sugi wood (densified) for use in flooring and in panelling for internal walls.

The study has a purely screening purpose, being at a level of TRL (Technology Readiness Level) 3 - Research supported by experimentation. The responsibility of full validation in the operational environment through tests and demonstrations (TRL 8) relies on the interested companies. This step will allow to reach the conditions necessary for its commercialization, thus reaching TRL 9 (real system finalized and qualified).

Keywords: Sugi / Thermo-Hydro-Mechanical process / Hardness / Density / Durability

nm

Hydra

## Índice

1	Introdução.....	1
2	Processos de modificação da madeira.....	2
2.1	Generalidades.....	2
3	Densificação da madeira de criptoméria por processo Termo-hidro-mecânico .....	3
3.1	Objetivos.....	3
3.2	Processos de densificação realizados .....	3
3.2.1	Material e métodos .....	3
3.3	Análise e discussão dos resultados.....	11
3.3.1	Massa volúmica .....	12
3.3.2	Recuperação em espessura .....	12
3.3.3	Dureza.....	15
3.3.4	Resistência a térmitas de madeira seca .....	18
3.4	Custos associados à produção .....	18
4.	Conclusões.....	20

## Índice de figuras

Figura 1.1 – Níveis de desenvolvimento de tecnologia .....	1
Figura 2.1 – Processos de modificação em função do objetivo.....	2
Figura 3.1 – Processo THM A – tipo de provetes e identificação dos parâmetros do processo de densificação .....	4
Figura 3.2 – Processo THM B – tipo de provetes e identificação dos parâmetros do processo de densificação .....	5
Figura 3.3 – a) Peça introduzida no banho; b) Equipamento utilizado para o amolecimento dos provetes .....	5
Figura 3.4 – a) Equipamento de prensagem e controlo; b) Colocação dos termopares no provete; c) Colocação do provete na prensa; d) Prensagem para a espessura predefinida .....	6
Figura 3.5 – Localização dos termopares nos provetes sujeitos ao processo de densificação THM A.....	6
Figura 3.6 – Combinação de variáveis estudadas (THM A) .....	7
Figura 3.7 – Provede para ensaio de recuperação em espessura .....	8
Figura 3.8 – Ensaio de dureza: a) Introdução de esfera de diâmetro igual a 10mm na face do provete; b) Medição da massa por meio de lupa binocular .....	10
Figura 3.9 – Provede composto de uma lâmina de madeira densificada ( $\approx 3\text{mm}$ ) colada a um suporte em aglomerado de partículas – ensaio de dureza .....	10
Figura 3.10 – Fotografia duma parte dos provetes ao início do ensaio (© S. Wallon). .....	11
Figura 3.11 – Diagrama extremos-e-quartis – distribuição dos valores: 1º quartil – valor abaixo do qual se situam 25% dos valores observados; Mediana – valor abaixo e acima do qual se situam 50% dos valores observados; 3º Quartil – valor abaixo do qual se situam 75% dos valores observados; Outlier - valor anómalo .....	11
Figura 3.12 – Variação de massa volúmica para os diversos processos de densificação e comparação com a provetes sem densificação (referência) .....	12
Figura 3.13 – Variação de massa volúmica de acordo com a temperatura de densificação (T) e taxa de densificação (TD) para os dois tipos de provete (Anel deitado – T ou anel em esquadria – R) .....	12
Figura 3.14 – Recuperação observada entre o ambiente de 65% (ambiente normalizado) e o ambiente de 30% (interior seco) .....	13
Figura 3.15 – Recuperação observada entre o ambiente de 30% (interior seco) e o ambiente de 85% (interior húmido) .....	14
Figura 3.16 – Resultados do “set recovery” .....	14
Figura 3.17 – Processos conduzidos com diferentes temperaturas mantendo constantes as restantes constantes (TA=20, TD=40 e TE=10, figura 3.6).....	15
Figura 3.18 – Variação de dureza para as diversas variáveis do processo de densificação .....	16
Figura 3.19 – Dureza dos provetes T em função de processos conduzidos com diferentes temperaturas e ambientes de condicionamento e mantendo constantes as restantes variáveis (TA=20, TD=40 e TE=10) .....	16
Figura 3.20 – Variação de dureza de acordo com a taxa de densificação e tipo de provete (Anel deitado – T ou anel em esquadria – R) .....	16
Figura 3.21 – Dureza obtida em réguas multicamada .....	17
Figura 3.22 – Ensaio de dureza sobre provetes multicamada com lâmina de criptoméria densificada .....	17
Figura 3.23 – Registo da leitura de termopares: a) provete comprimido a 40% a uma temperatura de 160°C; b) provete comprimido a uma temperatura de 140°C (setas indicam a fase 2-3, ver figuras 3.1 e 3.2) .....	18

ryl  
Kryza

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Dimensões e número de provetes densificados ..... 4

Quadro 3.2 – Condições de exposição ..... 8

## 1 | Introdução

No âmbito do projeto “Promoção da madeira de Criptoméria na construção. Novos produtos, oportunidades e mercados”, a execução dos trabalhos de qualificação da madeira está a cargo do Centro de Inovação e Competências da Floresta (SerQ), através de um contrato estabelecido com a Sociedade de Gestão Ambiental e Conservação da Natureza, S.A. - Azorina, S.A.. No âmbito deste estudo incluiu-se o estudo da viabilidade de aumento do desempenho mecânico para fins não estruturais da madeira de criptoméria por meio de densificação, que constitui o objeto do presente relatório.

A densificação de madeira envolve em geral processos designados por termo-hidro-mecânicos (THM), ou termo-mecânicos (TM), apresentando estes processos a vantagem de não incorporarem a adição de substâncias à madeira, mas somente incorporarem energia e água ao processo. Num panorama cada vez mais focado na necessidade de caminhar para uma economia circular, este processo não implica a necessidade de preocupação quanto à reutilização do material para outras utilizações após o término do seu tempo em serviço.

O presente estudo tem, assim, por base uma tentativa de resolução dos problemas da madeira de criptoméria dos Açores, derivados da sua baixa massa volúmica e consequente baixa dureza, resistência ao impacto, assim como outras propriedades mecânicas. O estudo compreendeu o delinear de uma série de ensaios seguindo um processo THM, sendo feitas alterações das variáveis do processo nomeadamente tempo em prensa, temperatura da prensa ou taxa de densificação. O estudo e os resultados apresentados pretendem meramente indicar as possibilidades do processo THM como forma de aumentar a competitividade da madeira de criptoméria no mercado da construção, atendendo a aplicações não estruturais como sejam revestimento de piso multicamada ou em revestimentos de parede. O estudo encontra-se num nível de TRL (Technology Readiness Level) 3 – Investigação suportada por experimentação - sendo a responsabilidade da plena validação em ambiente operacional através de testes e demonstrações (TRL 8) das condições necessárias para a sua comercialização das empresas que as venham a adotar, atingindo deste modo o TRL 9 (sistema real finalizado e qualificado), figura 1.1.

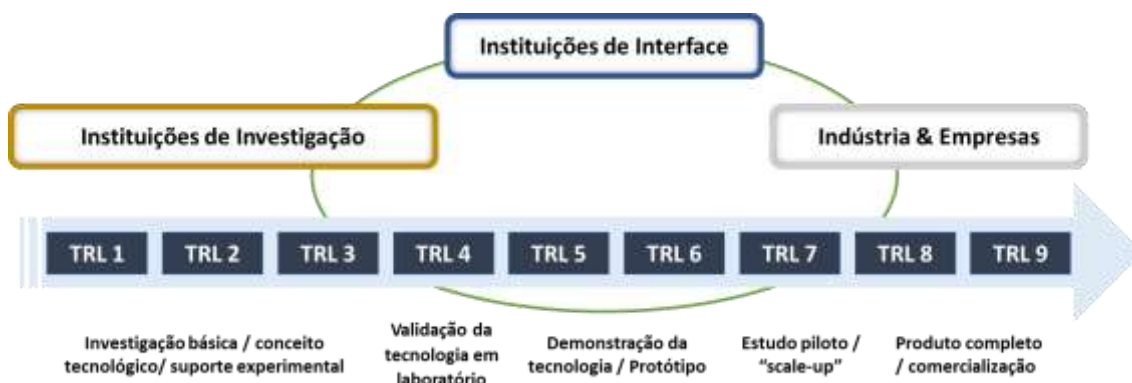


Figura 1.1 – Níveis de desenvolvimento de tecnologia

## 2 | Processos de modificação da madeira

### 2.1 Generalidades

Os processos de modificação podem ser divididos de acordo com o seu objetivo: aumento da durabilidade da madeira; aumento da sua estabilidade dimensional; ou aumento/alteração das propriedades físicas ou mecânicas, figura 2.1.

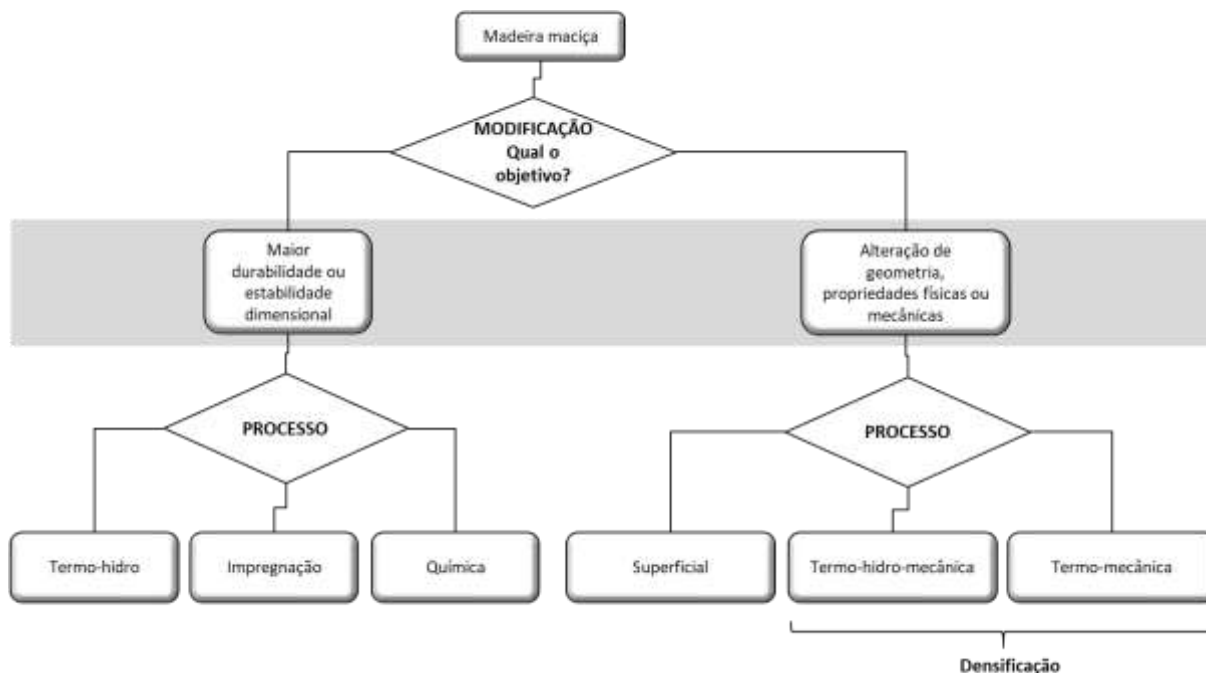


Figura 2.1 – Processos de modificação em função do objetivo

Os processos de densificação existentes podem ser divididos entre dois grupos, processos termo-hidro-mecânicos (THM) ou termo-mecânicos (TM), consoante exista ou não, respetivamente, uma fase de amolecimento. Uma descrição mais pormenorizada das vantagens e desvantagens de diversos processos de modificação da madeira podem ser encontrados em Esteves e Pereira (2014) e Sandberg *et al.* (2013). A densificação tem em geral o objetivo de possibilitar que madeiras de baixa a média massa volúmica possam melhorar as suas propriedades mecânicas, constituindo alternativas a madeiras mais densas, nomeadamente tropicais, para aplicações essencialmente não estruturais.

Os processos de densificação compreendem em geral quatro fases:

1. Amolecimento/plastificação.
2. Compressão.
3. Arrefecimento e secagem no estado deformado.
4. Fixação do estado deformado.

### 3 | Densificação da madeira de criptoméria por processo Termo-hidro-mecânico

#### 3.1 Objetivos

A madeira de criptoméria apresenta valores baixos de massa volúmica (valor médio à volta dos  $350\text{kg/m}^3$ ), que condicionam uma dureza baixa, inferior ao limite de especificação inferior recomendado de  $10\text{N/mm}^2$  para aplicação em revestimentos de piso, segundo a normalização europeia.

De forma a ultrapassar esta dificuldade foi definido um programa de ensaios compreendendo:

- Diferentes ciclos de densificação (processo termo-hidro-mecânico).
- Diferentes disposições dos anéis de crescimento face ao esforço de compressão (peça de anel deitado e de anel em esquadria).



O programa constitui um conjunto de ensaios de triagem, abrangendo diversas opções relativamente a parâmetros do processo, devendo ser complementado no futuro, por parte de empresas interessadas, por ensaio alargados de calibração de parâmetros e validação de resultados (ensaios de produto-tipo<sup>1</sup>).

#### 3.2 Processos de densificação realizados

##### 3.2.1 Material e métodos

##### 3.2.1.1 Densificação

Os processos realizados compreenderam a densificação com o objetivo de obtenção de elementos para uso em revestimentos de parede (TMH A) e a obtenção de lâminas (espessura  $\approx 3\text{mm}$ ), para aplicação em revestimentos de piso multicamada (TMH B).

No caso de elementos para aplicação em revestimentos de parede, os ensaios compreenderam um conjunto de provetes de dimensões  $300\text{mm} \times 100\text{mm} \times 40\text{mm}$ , apresentando metade com o anel deitado (compressão exercida na direção radial) e a outra metade com o anel em esquadria (compressão exercida na direção tangencial). Os provetes foram sujeitos a diversos processos, diferenciados nos parâmetros estabelecidos para a fase de amolecimento (tempo) e fase de

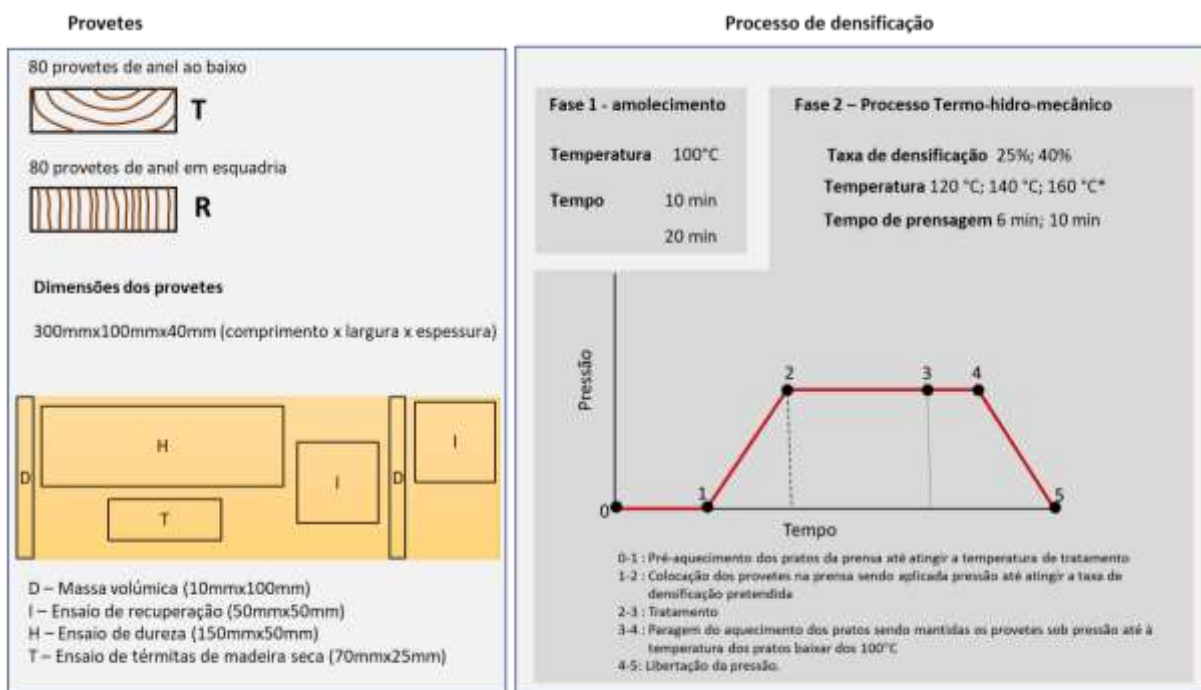
<sup>1</sup> Conjunto de níveis ou classes de desempenho representativos de um produto de construção, correspondente às suas características essenciais, obtido a partir de uma determinada combinação de matérias-primas ou de outros elementos segundo um processo específico de fabrico.

prensagem (taxa de densificação, temperatura e tempo de prensa), figura 3.1. O quadro 3.1 apresenta o tipo e número de provetes envolvidos nos ensaios.

Quadro 3.1 – Dimensões e número de provetes densificados

Processo de densificação	Dimensão dos provetes (mm)	Número de provetes
TMH A	300 x 100 x 40	160 <sup>1)</sup>
TMH B	200 x 100 x 6	20

1) Metade provetes de anel deitado e metade de anel em esquadria



\* O tratamento a 160 °C compreendeu somente 5 peças T com amolecimento de 20 min, Taxa de densificação de 40% e tempo sob pressão de 10 min

Figura 3.1 – Processo THM A – tipo de provetes e identificação dos parâmetros do processo de densificação

No caso de elementos para aplicação em revestimentos de piso os ensaios compreenderam um conjunto de provetes de dimensões 200mmx100mmx6mm, apresentando metade com o anel deitado e a outra metade com o anel em esquadria. Os provetes foram sujeitos a um processo de densificação cujos parâmetros são indicados na figura 3.2.

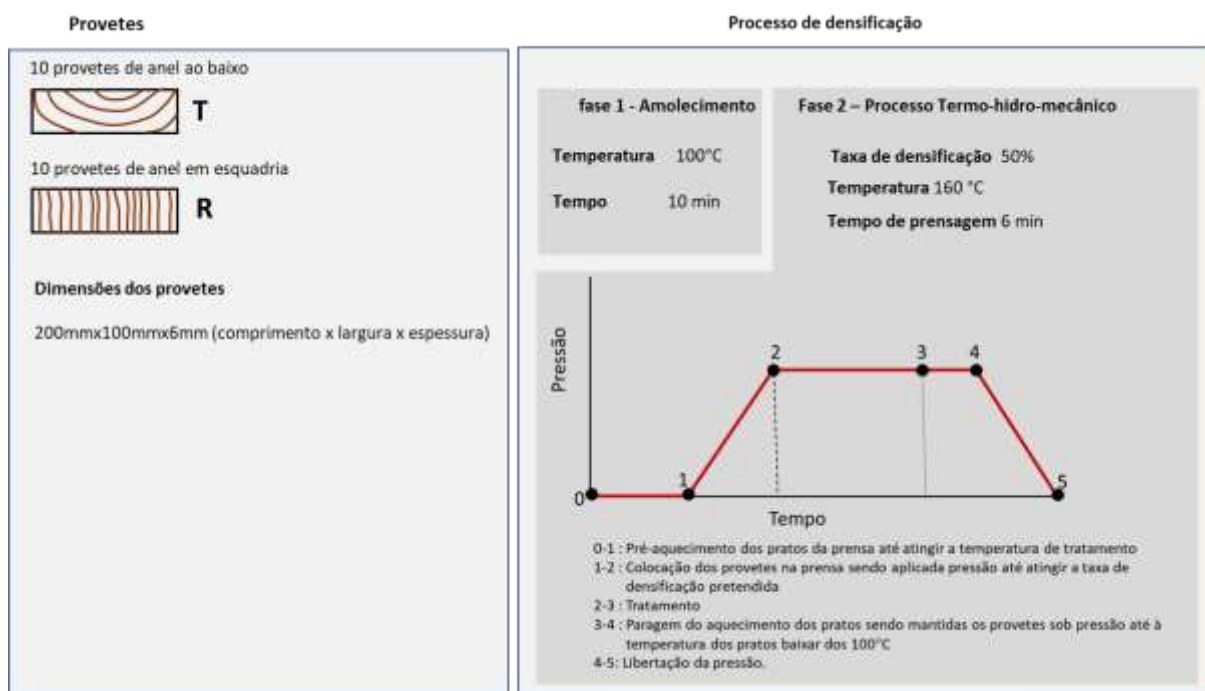


Figura 3.2 – Processo THM B – tipo de provetes e identificação dos parâmetros do processo de densificação

Os provetes a densificar foram inicialmente colocados em imersão em água a 20°C por um período entre 6 horas e 15 horas (permitindo repor condições de teor de água acima do ponto de saturação das fibras – madeira verde), sendo de seguida sujeitos a processo de amolecimento por imersão em água fervente (100°C), sendo utilizado um equipamento com controlo de temperatura do banho ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).



Figura 3.3 – a) Peça introduzida no banho; b) Equipamento utilizado para o amolecimento dos provetes

Após amolecimento, os provetes foram colocados numa prensa de pratos quentes com uma capacidade de pressão de 30MPa, com controlo independente de temperatura dos dois pratos e uma precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , figura 3.4. Após o tempo de prensagem o aquecimento dos pratos foi suprimido e os provetes deixados sob pressão até que a temperatura dos pratos baixasse dos 100°C.



Figura 3.4 – a) Equipamento de prensagem e controlo; b) Colocação dos termopares no provete; c) Colocação do provete na prensa; d) Prensagem para a espessura predefinida

Em cada provete sujeito ao processo THM A foram colocados 4 termopares, um junto de cada superfície e dois no ponto central, figura 3.5, sendo utilizada uma frequência de leitura de 17Hz. No caso do processo THM B, dada a pequena espessura dos provetes não foram colocados termopares.

Após densificação foi realizada uma leitura com o humidímetro de agulhas a uma profundidade de cerca de  $0,3 \times$  espessura. De seguida, os provetes são colocados numa sala condicionada ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $65\% \pm 5\%$  de humidade relativa do ar) sendo controlado periodicamente o teor de água até atingir um valor  $\leq 15\%$ , sendo nessa altura cortados os provetes para os diversos ensaios programados, figuras 3.1 e 3.2.

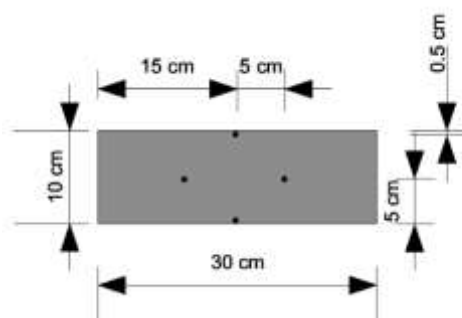


Figura 3.5 – Localização dos termopares nos provetes sujeitos ao processo de densificação THM A

A figura 3.6 apresenta as variáveis e combinações consideradas no estudo.

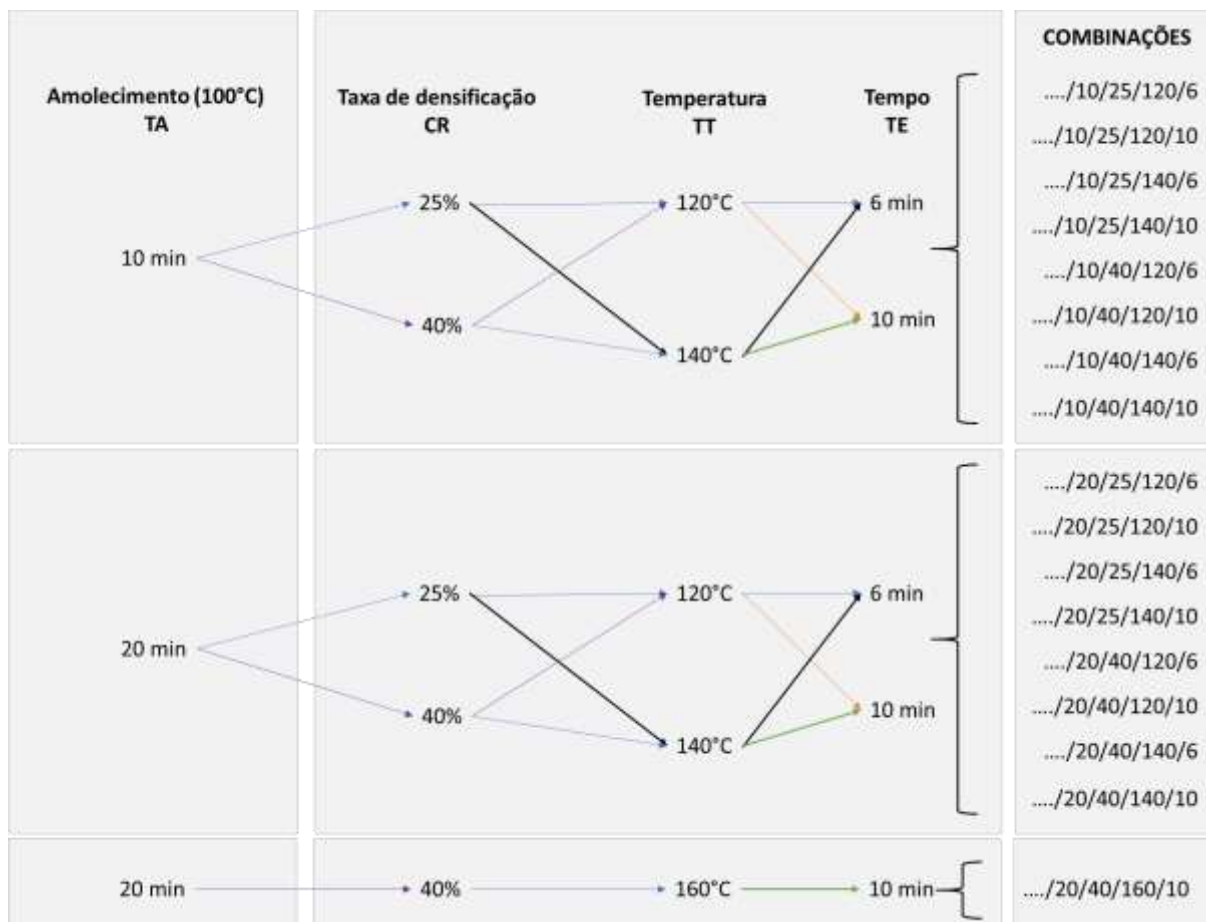


Figura 3.6 – Combinação de variáveis estudadas (THM A)

### 3.2.1.2 Determinação da massa volúmica

De cada provete inicial do processo THM A foram cortados dois provetes para determinação da massa volúmica. A massa volúmica foi determinada sobre provetes de dimensões 10mmx100mmxespessura dos provetes densificados, sendo seguido o procedimento descrito na norma ISO 13061-2.

### 3.2.1.3 Ensaio de recuperação em espessura

Dos provetes iniciais do processo THM A foram cortados dois provetes com dimensões de 50mmx50mmxespessura (variável consoante a taxa de densificação), sendo os topos (secção transversal) selados com resina epoxídica de forma a evitar o efeito da absorção de água pelos topos, figura 3.7.



Figura 3.7 – Provete para ensaio de recuperação em espessura

Os provetes foram inicialmente submetidos às condições de ensaio relativas à aplicação em ambientes interiores, adaptando o procedimento descrito na norma EN 1910. Esta norma estabelece o condicionamento prévio dos provetes num ambiente de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $65\% \pm 5\%$  de humidade relativa do ar, até que apresentem uma variação de peso inferior a  $0,1\%$  num intervalo de tempo de 24 horas. De seguida os provetes foram sujeitos a um ambiente seco e a um ambiente húmido, sendo expostos a cada ambiente por um período nunca inferior a 28 dias e até apresentarem uma variação de peso inferior a  $0,1\%$  num intervalo de tempo de 24 horas. Por fim os provetes foram imersos água durante 24 horas e secos em estufa a  $40^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Este último passo foi adaptado do estudo conduzido por Laine *et al.* (2016), ensaio designado como “Set recovery”.

Quadro 3.2 – Condições de exposição

Fases de exposição	Condições	Duração
1 Ambiente seco	Temperatura do ar - $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ Humidade relativa do ar - $30\% \pm 5\%$	Mínimo 28 dias e até a estabilização de peso
2 Ambiente húmido	Temperatura do ar - $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ Humidade relativa do ar - $85\% \pm 5\%$	Mínimo 28 dias e até a estabilização de peso
3 Imersão em água	Temperatura da água - $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	24 horas
Secagem em estufa	Temperatura do ar - $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	24 horas

A recuperação ( $R$ ) nas etapas 1 e 2 é calculada segundo a equação 1, sendo a da etapa 3 calculada de acordo com a equação 2.

$$R_{1,2} = \frac{E_i - E_{i-1}}{E_{i-1}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{E_i - E_d}{E_0 - E_d} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Em que:

$E_i$  – espessura após a fase i

$E_{i-1}$  – espessura após a fase i-1

$E_d$  – espessura após densificação

$E_0$  – espessura antes da densificação

### 3.2.1.4 Determinação da dureza

De cada provete densificado (THM A) foi obtido um provete de dimensões 150mmx50mmxespessura, sendo estes provetes inicialmente condicionados num ambiente com  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $65\% \pm 5\%$  de humidade relativa do ar, até apresentarem uma variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens consecutivas (24 horas de intervalo). De seguida os provetes foram sujeitos a ensaio de dureza Brinell de acordo com a norma EN 1534, tendo-se realizado um ensaio numa face e outro na face oposta (minimizando a variabilidade normalmente encontrada numa peça de madeira). Os provetes foram de seguida condicionados num ambiente com  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $85\% \pm 5\%$  de humidade relativa do ar, até apresentarem novamente uma variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens consecutivas (24 horas de intervalo). Tal como na fase anterior, os provetes foram sujeitos a ensaio de dureza, realizando-se mais uma vez um ensaio numa face e outro noutra face.

O ensaio consistiu na aplicação de uma força de 1 kN sobre uma esfera de diâmetro igual a 10 mm apoiada na face do provete, figura 3.8a). Após a remoção da força, e tendo decorrido um período não inferior a 3 minutos, foi efetuada a medição da moessa residual produzida na face do provete, utilizando para o efeito uma lupa binocular, figura 3.8b). A dureza foi determinada de acordo com a equação 3.

$$HB = \frac{2F}{\pi.D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

Em que:

$\pi$  – é a constante matemática Pi ( $\approx 3,14$ );

$F$  – é a força nominal, em Newtons;

$D$  – é o diâmetro da esfera, em milímetro;

$d$  – é o diâmetro da moessa residual, em milímetro.

rym  
Kryza

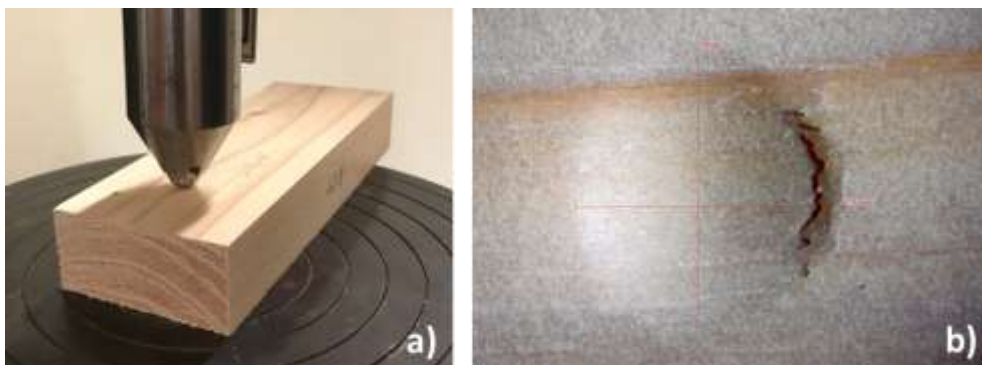


Figura 3.8 – Ensaio de dureza: a) Introdução de esfera de diâmetro igual a 10mm na face do provete; b) Medição da mocha por meio de lupa binocular

De forma a avaliar a aplicação em réguas multicamada foram produzidas lâminas de madeira densificada ( $\approx 3\text{mm}$ ) através do processo THM B, figuras 3.2 e 3.9. As lâminas de madeira densificada produzidas foram coladas a um suporte de aglomerado de partículas com uma massa volúmica superior a  $700\text{kg/m}^3$ .



Figura 3.9 – Provete composto de uma lâmina de madeira densificada ( $\approx 3\text{mm}$ ) colada a um suporte em aglomerado de partículas – ensaio de dureza

### 3.2.1.5 Resistência às térmitas de madeira seca

De forma a verificar se a densificação do material poderia influenciar a durabilidade da madeira de criptoméria face a térmitas de madeira seca (*Cryptotermes brevis* (Walker)), foram realizados ensaios na Região Autónoma dos Açores (Wallon *et al.*, 2019), tendo sido seguido um método adaptado do IPT (Instituto de Pesquisas de São Paulo), 1980 – Durabilidade natural e adquirida conforme descrito em Guerreiro e Borges (2015). O ensaio compreendeu trinta e quatro (34) provetes de criptoméria densificada com as dimensões aproximadas:  $70 \times 25 \times 6\text{mm}$  (2 provetes por cada ensaio ligados por fita cola). A espessura dos provetes apresentou variações devidas às condições de densificação (i.e., taxa de densificação). Foram igualmente utilizados como referência três (3) provetes de pinho bravo (*Pinus pinaster* Aiton) e três (3) provetes de criptoméria sem densificação, todos estes provetes apresentando dimensões semelhantes aos provetes densificados ensaiados.

Num dos lados da amostra de madeira, um tubo de PVC (altura 4 centímetros, 4 centímetros de diâmetro) foi fixado na madeira. Em seguida, no interior do tubo de PVC (em contato direto com a madeira) foram colocadas 30 térmitas da casta dominante, pseudo-obreiras (figura 3.10).



Figura 3.10 – Fotografia duma parte dos provetes ao início do ensaio (© S. Wallon).

Procedeu-se à contagem diária dos indivíduos de pseudo-obreiras, para identificar os indivíduos mortos e vivos. Foi igualmente realizada uma contagem semanal dos excrementos (pellets) durante 41 dias.

Os danos foram avaliados cada dia com uma escala qualitativa (0 – nenhum dano; 1 – dano superficial; 2 – dano moderado; 3 – dano acentuado; 4 – dano profundo, igual à testemunha) e com a contagem dos números de orifícios.

### 3.3 Análise e discussão dos resultados

Ao longo do presente ponto os resultados serão apresentados em diagramas extremos-e-quartis, mostrando em que medida estão distribuídos os dados na amostra, sendo o significado destes diagramas indicado na figura 3.11.

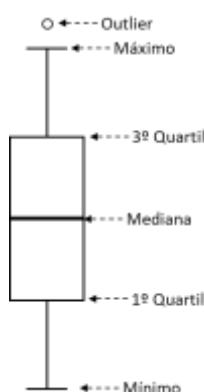


Figura 3.11 – Diagrama extremos-e-quartis – distribuição dos valores: 1º quartil – valor abaixo do qual se situam 25% dos valores observados; Mediana – valor abaixo e acima do qual se situam 50% dos valores observados; 3º Quartil – valor abaixo do qual se situam 75% dos valores observados; Outlier - valor anómalo



As figuras 3.14 a 3.16 apresentam o movimento observado entre a fase de condicionamento e a fase 1 (ambiente condicionado → ambiente seco), entre a fase 1 e 2 (ambiente seco → ambiente húmido) e no ensaio de imersão-secagem (exposição exterior), designado por “Set-recovery”.

Os resultados obtidos permitem observar uma variação de propriedades entre ambientes interiores (humidade relativa do ar de 30%, 65% e 80%) muito similar entre os diversos processos, figuras 3.14 e 3.15. A aplicação como revestimento de interiores (piso ou paramentos) poderá apresentar resultados inferiores uma vez que este tipo de revestimentos apresentam um produto superficial de acabamento (e.g. verniz), que aumenta a resistência da madeira à adsorção/dessorção de moléculas de água do ambiente interior.

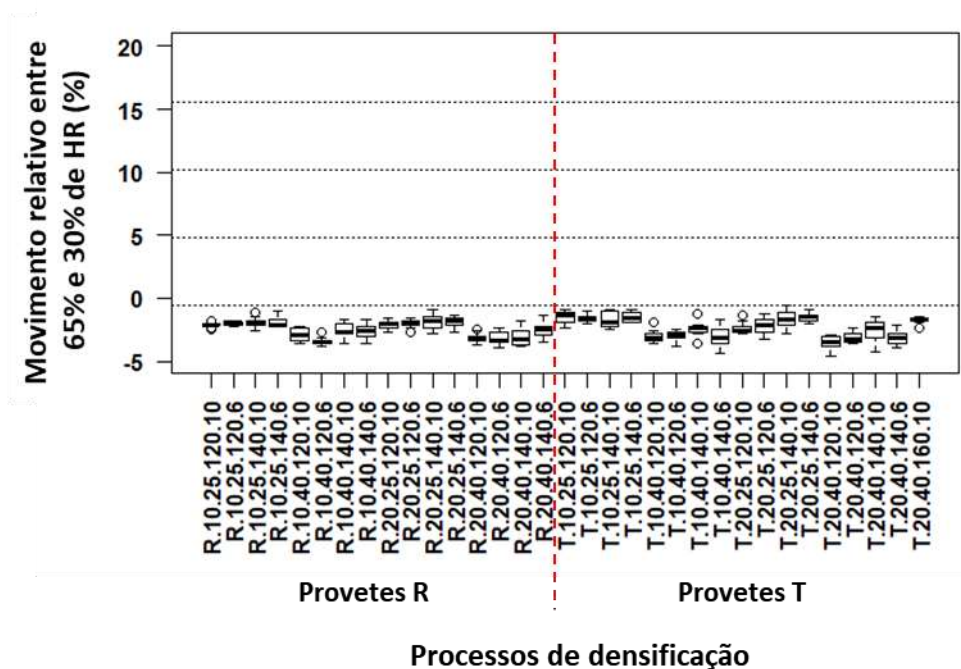


Figura 3.14 – Recuperação observada entre o ambiente de 65% (ambiente normalizado) e o ambiente de 30% (interior seco)

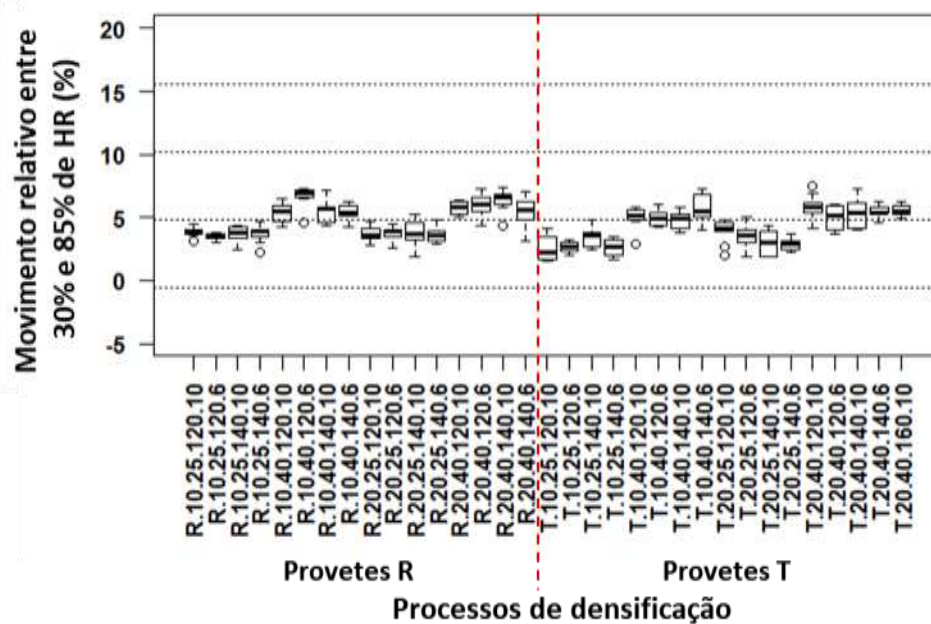


Figura 3.15 – Recuperação observada entre o ambiente de 30% (interior seco) e o ambiente de 85% (interior húmido)

Relativamente a uma exposição mais severa, figura 3.16, a variação de dimensões é mais evidente no caso do processo levado a cabo a 160°C (T.20.40.160.10). Este resultado é inesperado tendo em conta que o processo anterior e o conduzido a 140°C (T.20.40.140.10) apresentam idênticas condições de densificação, à parte da temperatura, figura 3.17.

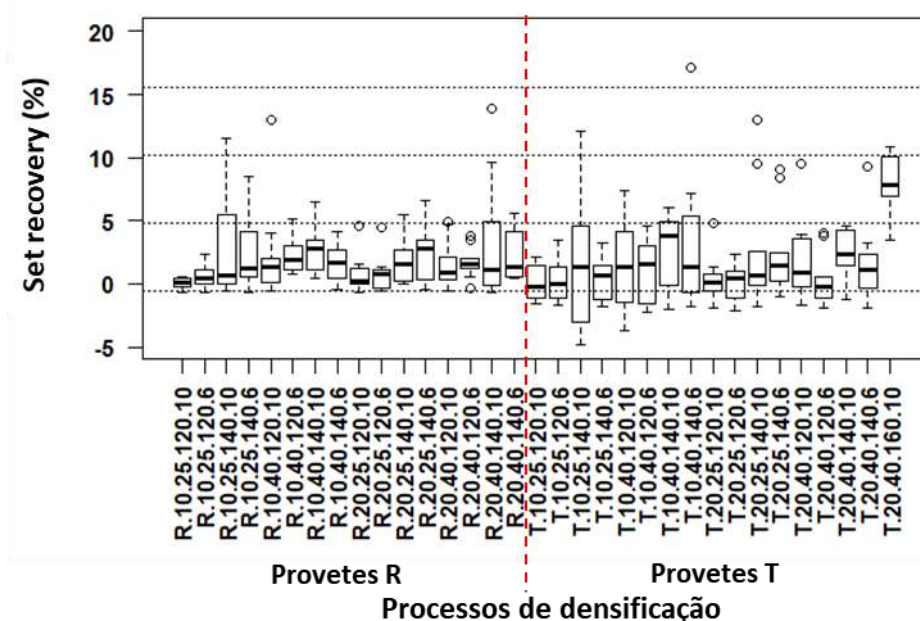


Figura 3.16 – Resultados do “set recovery”

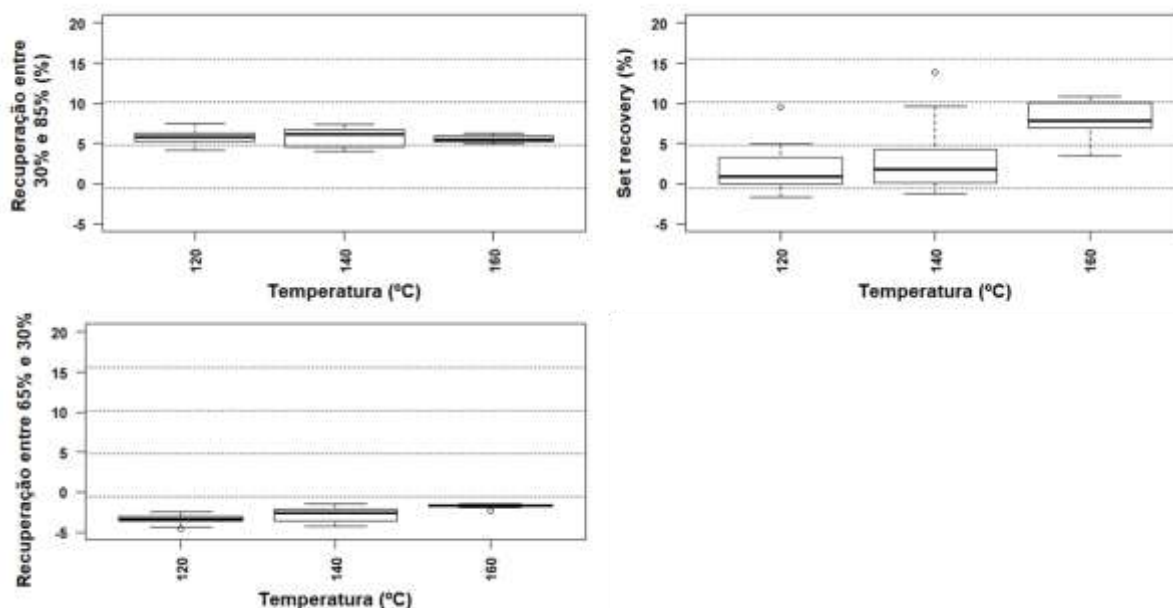


Figura 3.17 – Processos conduzidos com diferentes temperaturas mantendo constantes as restantes constantes (TA=20, TD=40 e TE=10, figura 3.6)

Os resultados obtidos tendem a confirmar que a recuperação da madeira poderá ser um problema quando da sua aplicação em situações de variações extremas de humidade relativa do ar, admitindo-se, no entanto, que a aplicação de produtos de revestimento (e.g. tintas, vernizes ou velaturas) poderão resultar numa diminuição significativa do movimento da madeira.

Os meios laboratoriais existentes não permitiram verificar a capacidade de obter bons resultados na gama de temperaturas entre 160°C e 180°C, através de uma fase de amolecimento a temperaturas superiores a 100°C através da aplicação de vapor sobreaquecido (Kutnar e Kamke, 2012).

### 3.3.3 Dureza

O ensaio sobre provetes de criptoméria não densificados não foi possível de realizar segundo a norma EN 1534, uma vez que não foi possível atingir a força mínima de 1kN de ensaio, sendo, desta forma, somente possível afirmar que a dureza da madeira de criptoméria sem densificação é inferior a 6,4N/mm<sup>2</sup>.

Os ensaios realizados nos provetes com diferente orientação do anel de crescimento face à sua secção transversal (T e R), figura 3.18, mostram que embora os valores de dureza subam significativamente, apresentam, no entanto, uma elevada dispersão não garantindo um quartil de 5% de pelo menos 10N/mm<sup>2</sup> (ou seja que menos de 5% dos valores de situem abaixo deste valor).

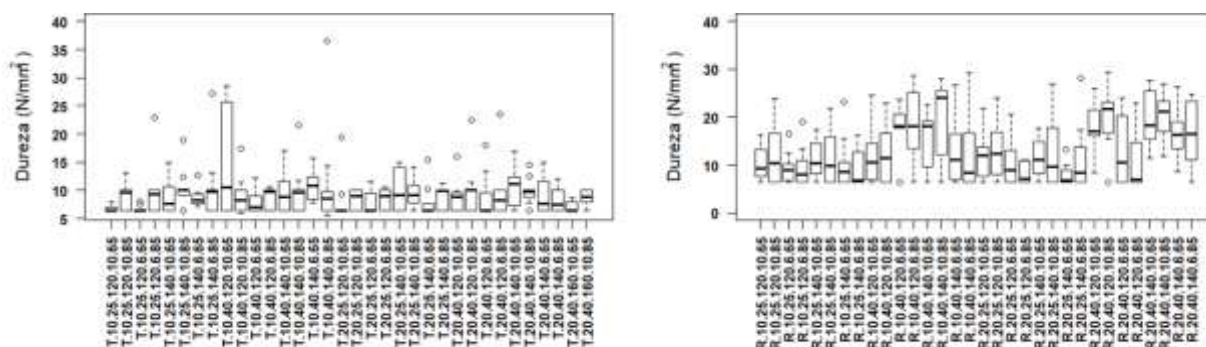


Figura 3.18 – Variação de dureza para as diversas variáveis do processo de densificação

Comparando os valores obtidos nos dois ambientes, estes não apresentam diferenças significativas, sugerindo uma baixa taxa de recuperação da madeira. Na figura 3.19 apresenta-se este resultado para os provetes de anel deitado (provetes T).

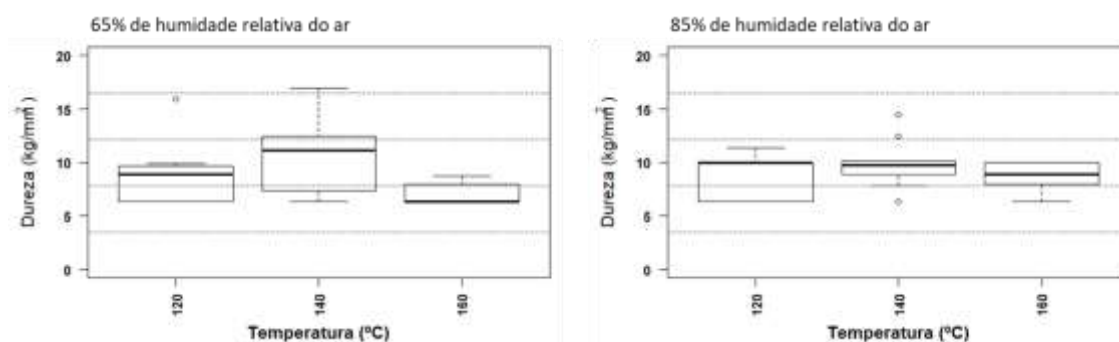


Figura 3.19 – Dureza dos provetes T em função de processos conduzidos com diferentes temperaturas e ambientes de condicionamento e mantendo constantes as restantes variáveis (TA=20, TD=40 e TE=10)

A figura 3.20 mostra que uma taxa de densificação de 40% permite admitir, no caso de provetes do tipo R, a possibilidade de ser suplantado o limite inferior de dureza de 10N/mm<sup>2</sup>. No caso dos provetes do tipo T esta possibilidade não é atingida, sendo necessário em futuros desenvolvimentos analisar esta diferença de resultados consoante a orientação dos anéis em função do perfil de variação da massa volúmica ao longo da espessura do provete.

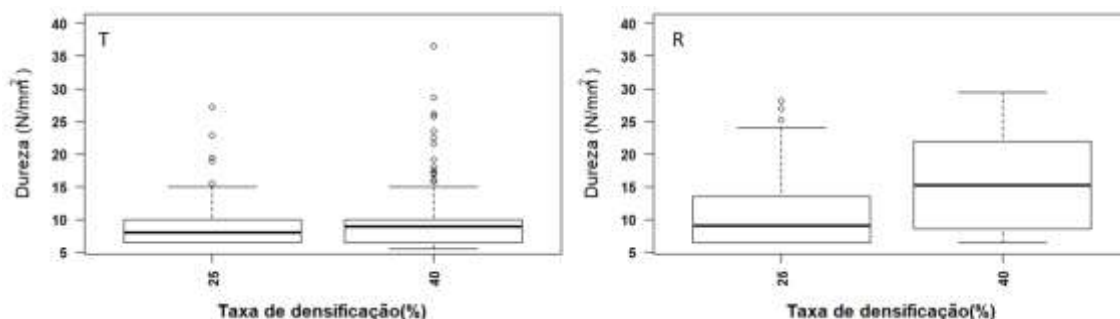


Figura 3.20 – Variação de dureza de acordo com a taxa de densificação e tipo de provete (Anel deitado – T ou anel em esquadria – R)

Relativamente a uma aplicação em réguas multicamada, os resultados obtidos, figura 3.21, indicam um acréscimo da dureza para valores significativamente acima do valor mínimo recomendado de 10N/mm<sup>2</sup>. Deste modo, admite-se a viabilidade da aplicação de lâminas de madeira de criptoméria densificada (espessura entre 3 e 4 mm) em revestimentos de piso multicamada.

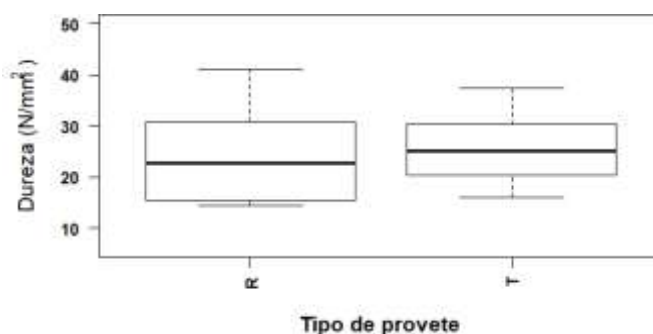


Figura 3.21 – Dureza obtida em réguas multicamada



Figura 3.22 – Ensaio de dureza sobre provetes multicamada com lâmina de criptoméria densificada

Analisando os gráficos de leituras da temperatura fornecida pelos termopares da zona superficial e central dos provetes, nota-se um desfasamento entre a temperatura dos pratos e a zona superficial de cerca de 20°C e entre a zona superficial e o centro dos provetes de cerca de entre 20°C e 40°C. Ensaio futuros devem procurar verificar a possibilidade de uma maior uniformização da temperatura nos provetes, através de um tempo de prensa mais alargado (podendo ir até 30 minutos) ou através da utilização de um período de pré-aquecimento (provetes colocado na prensa não sendo aplicada pressão), seguindo os trabalhos de Wang e Cooper (2005). No entanto, o mesmo estudo indica que este passo poderá traduzir-se numa densificação inferior junto à superfície, o que poderá comprometer o objetivo de obtenção de uma maior dureza superficial.

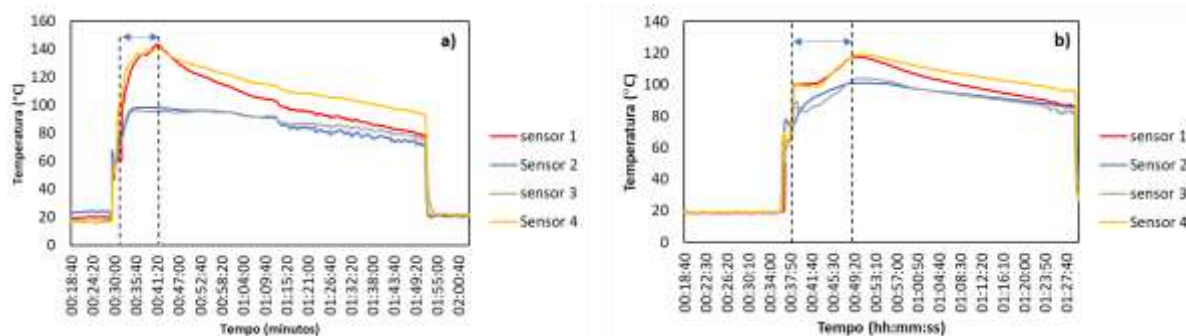


Figura 3.23 – Registo da leitura de termopares: a) provete comprimido a 40% a uma temperatura de 160°C; b) provete comprimido a uma temperatura de 140°C (setas indicam a fase 2-3, ver figuras 3.1 e 3.2)

### 3.3.4 Resistência a térmitas de madeira seca

Os resultados obtidos, de caráter de triagem, indicam a não existência aparente de diferenças significativas de resistência da madeira de *Criptomeria japonica* com diferentes taxas de densificação, aos ataques de térmitas *Cryptotermes brevis*. No entanto, os resultados indicam uma aparente tendência de que um tempo de amolecimento mais alargado (20 min), uma taxa de densificação elevada (> 40%) e uma temperatura elevada (160°C), possam influenciar a resistência da madeira *Criptomeria japonica* aos ataques das térmitas de madeira seca *Cryptotermes brevis*.

Deste modo, a realização futura de ensaios de desenvolvimento de produto, caso a durabilidade a térmitas seja equacionada, deverá estabelecer as condições atrás mencionadas como limites inferiores do processo de densificação.

## 3.4 Custos associados à produção

A implementação de um sistema de produção de madeira densificada implica um conjunto de custos, repartidos por custos de desenvolvimento do produto final (incluindo ensaios laboratoriais suplementares, definição do produto e relatório de produto-tipo), custos associados à aquisição e instalação/alteração de linha de produção e custos associados com a produção (custos de materiais e de transformação). Os custos associados a cada uma destas fases encontram-se dependentes de fatores de mercado, difíceis de neste momento quantificar de modo preciso, sendo por isso os custos mencionados no presente ponto unicamente indicativos.

O tipo de produto e uso pretendido (incluindo ambiente de utilização) irá condicionar os estudos a empreender de forma à definição exata dos parâmetros de produção e consequente relatório de produto-tipo (entendido como ficha técnica do produto). Estima-se que os custos desta fase possam se situar entre 5 a 10 k€.

A definição do equipamento de densificação depende dos estudos adicionais, acima referidos, mas atendendo às conclusões do presente estudo e de outros estudos realizados para outras

espécies de madeira, admite-se a necessidade de aquisição de uma prensa de pratos quentes, com capacidade mínima de 60kN e com capacidade de arrefecimento dos pratos. Um equipamento deste tipo, sempre dependente das dimensões da prensa, poderá ter um custo mínimo estimado de 150k€.

Relativamente aos custos de fabrico deverá ter-se em atenção a possibilidade de utilização da fonte de energia geotérmica disponível na Região Autónoma dos Açores, como forma de diminuir os custos energéticos associados à produção, nomeadamente na fase de amolecimento a temperaturas superiores a 100°C através da aplicação de vapor sobreaquecido.

#### 4. Conclusões

O presente estudo incorpora resultados preliminares envolvendo a densificação de madeira de criptoméria por meio de um processo termo-hidro-mecânico (THM), tendo sido estudados diversos parâmetros do processo, envolvendo as fases de amolecimento, compressão e arrefecimento. A aplicação de um pós-tratamento específico para o aumento da estabilidade do processo não foi realizada, devendo ser equacionada em futuros estudos.

O objetivo do estudo consistia na avaliação da viabilidade da valorização da utilização desta madeira para aplicações de revestimento de piso e de revestimento de paramentos interiores. Os resultados obtidos são promissores, indicando a possibilidade de obter elementos apresentando uma massa volúmica significativamente superior ( $\approx 500\text{kg/m}^3$ ) ao valor médio associado à madeira de criptoméria ( $\approx 350\text{kg/m}^3$ ), e tornando viável a sua utilização em aplicações onde um determinado nível mínimo de dureza é requerido (e.g. revestimentos de piso).

O estudo conduzido teve em mente unicamente avaliar de forma preliminar o potencial da densificação, sendo que os resultados obtidos, nomeadamente a necessidade de diminuir a variabilidade encontrada e aumentar a estabilidade do processo, de forma a reduzir a recuperação do material densificado quando exposta a condições húmidas, devem agora servir de base a estudos mais conclusivos.

Sertã, maio de 2020

---

José Saporiti Machado



---

Sofia Knapic

## Referências bibliográficas

- EN 1534:2010 – **Wood flooring – Determination of resistance to indentation. Test method.** Brussels: CEN.
- EN 1910:2016 – **Wood flooring and wood panelling and cladding. Determination of dimensional stability.** Brussels: CEN.
- ESTEVES, B; PEREIRA, H., 2009 – **Wood modification by heat treatment: A review.** Bioresources, 4(1):370-404.
- GUERREIRO, O.; BORGES, P., 2015. **Monitorização da espécie de térmita de madeira seca *C. brevis* no arquipélago dos Açores.** Relatório interno do Grupo da Biodiversidade dos Açores. <http://sostermitas.angra.uac.pt//fotos/biblioteca/1440508057.pdf>
- ISO 13061-2:2014 – **Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests.** International Organization for Standardization.
- KUTNAR, A.; KAMKE, F.A., 2012 – **Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood.** Wood Science and Technology, 46:953–964.
- LAINE, K.; SEGERHOLM, K.; WÅLINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M., 2016 – **Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology.** Wood Science and Technology, 50:883-894.
- SANDBERG, D.; HALLE, P.; NAVI, P., 2013 - **Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products.** Wood Material Science & Engineering, 8(1):64-88.
- WALLON, S. NUNES, L.; BORGES, P.A.V., 2019 – **Ensaio de resistência ao ataque de *Cryptotermes brevis* de madeira densificada de *Cryptomeria japonica*.** Angra do Heroísmo, Região Autónoma dos Açores. (*Relatório confidencial – não publicado*).
- WANG, J.Y.; COOPER, P.A., 2005 – **Effect of grain orientation and surface wetting on vertical density profiles of thermally compressed fir and spruce.** Holz als Roh- und Werkstoff, 63:397-402.