aimmp

Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal

aditec

ASSOCIAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

MADEIRA DE EUCALIPTO

PROPRIEDADES, TECNOLOGIA E APLICAÇÕES

2021

TÍTULO
MADEIRA DE EUCALIPTO
Propriedades, tecnologia e aplicações

PROMOTOR
AIMMP – Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal

COORDENAÇÃO DE EDIÇÃO
ADITEC -Associação para o Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

COORDENAÇÃO DE CONTEÚDOS
José António Santos

IMPRESSÃO E ACABAMENTO
Em processo de solicitação

DIREITOS AUTORAIS RESERVADOS
AIMMP – Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal
Rua Álvares Cabral, 281
4050-041 Porto

ISBN
Em processo de solicitação

DEPÓSITO LEGAL
Em processo de solicitação

ANO
2021

José António Santos, Investigador Principal no Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ex-INETI) onde foi responsável pelo Grupo de Tecnologia da Madeira entre 1992 até 2014, colaborando e dinamizando projetos de investigação aplicada, com empresas e outras instituições nacionais e estrangeiras, auditoria a empresas, normalização, divulgação e formação na área da ciência e tecnologia da madeira.
Doutorado em Mecânica dos Materiais pela Universidade do Minho em 2007.
Interesses na qualidade, nas tecnologias limpas e energeticamente eficientes. Materiais para a construção sustentável.
Dadas as suas competências específicas, continua a desenvolver trabalho nesta área.

PUBLICAÇÕES PRINCIPAIS:

- Santos, José & Serra, Clara. (2014). "Procedimentos para Tratamento Térmico". Ministério da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas
- Santos, José. (2014/01/17). "Secagem Carvalho Negral" artigo 5º-congresso 28Mar05
- Knapic, Sofia & Santos, José & Pereira, Helena. (2012). "Thermal Modification on Eucalyptus Wood: An Essay."
- Santos, José. (2008). "Towards a competitive use of solar driers. A case study for the lumber industry."
- Santos, José. (2007). "Estudo de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira", Tese.
- Santos, José. (2005). "SECAGEM NATURAL E ARTIFICIAL DO CARVALHO NEGRAL."
- Santos, José. (2000). Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. Wood Science and Technology. 34. 39-43. 10.1007/s002260050006.

Índice

1. Introdução **7**

1.1 - Qualidade /dificuldades da madeira de eucalipto comum *7*

1.2 – Informação geral sobre o eucalipto *8*

1.3 - Tecnologia *10*

2. Critérios de escolha e classificação da madeira em toro **11**

3. Toragem, descasque, preparação **15**

4. Serragem **17**

4.1 – Introdução *17*

4.2 - Serragem otimizada *18*

5. Secagem **24**

5.1 - Princípios gerais da secagem *24*

5.2 - Teor de água de equilíbrio *27*

5.3 - Retração da madeira *29*

5.4 - Controlo da secagem *32*

5.5 - Defeitos da secagem *35*

6. A secagem do eucalipto **39**

6.1 - Formação das pilhas de secagem *39*

6.2 - Espessuras a secar *42*

6.3 - Técnicas de controlo da secagem *43*

6.4 - Avaliação dos gradientes de humidade *43*

6.5 - Equilibragem dos gradientes de humidade *44*

6.6 - Avaliação das tensões internas *45*

6.7 - Eliminação das tensões internas de secagem *46*

6.8 - Tempo de secagem *46*

7. Critérios de caracterização da qualidade após secagem **47**

8. Transformação em seco / Fabricação 48

9. Colagem / reconstituição 50

10. Durabilidade natural da madeira de eucalipto 53

11. Propriedades mecânicas 58

11.1 - Módulo de elasticidade 58

11.2 - Resistência à tração e compressão 60

12. Produtos para os quais a madeira de eucalipto representa evidentes potencialidades 63

13. Considerações finais / conclusões 76

14. Bibliografia 79

1. Introdução

Todos os sectores de transformação de madeira: carpintaria, construção e mobiliário, em Portugal, se queixam da falta de matéria-prima de qualidade e a preços convenientes, no que diz respeito a madeiras maciças. A oferta nacional escasseia e a proveniente da importação representa sempre uma incerteza quanto à qualidade, regularidade de fornecimentos e preços.

Estima-se que menos do que 15% de eucaliptos que se destinam às indústrias de transformação como madeira maciça: serração; parqueteria; contraplacados e folheados, provêm de cada vez menores povoamentos mistos de pinho e eucalipto, onde ainda tem sido possível encontrar eucaliptos com as idades e diâmetros convenientes para transformação por serragem. Segundo estatísticas de ocupação do solo (6.º Inventário Florestal Nacional), desde 1995 até 2018 a área ocupada por eucaliptos foi a que registou maior aumento, em contraste com a estagnação ou diminuição de todas as outras espécies, mas, os períodos de rotação de cerca de 12 anos e acabando em cortes rasos, não são suficientes para produzir madeira de qualidade.

A madeira de eucalipto comum, para utilização como madeira maciça, já é conhecida de alguns setores da indústria de carpintaria e da construção, nomeadamente as suas vantagens e potencialidades, apesar de algumas dificuldades de transformação e outras limitações.

A escolha inicial e classificação dos toros, assim como a secagem da madeira, são a chave para a possibilidade de utilizar com sucesso esta espécie como madeira maciça, complementado com outros aspetos importantes, como as técnicas de conversão, classificação da qualidade e tecnologia de transformação.

1.1 - Qualidade /dificuldades da madeira de eucalipto comum

Para avaliar qual a posição que uma espécie, ao mesmo tempo tão polémica e tão interessante como é o eucalipto, pode ocupar no contexto do abastecimento à indústria nacional, faz-se um rápido balanço entre as suas vantagens e condicionalismos:

Vantagens e potencialidades:

- Existência crescente de áreas de produção sustentável de madeira de eucalipto em Portugal;
- Madeira de rápido crescimento (com idades entre os 30 e 35 anos apresenta-se com diâmetros convenientes para serração e desenrolamento 30 cm);
- Madeira muito dura e muito resistente mecanicamente;
- Bom aspeto estético, com possibilidades de proporcionar acabamentos muito finos;
- Muito poucos nós e geralmente de pequenas dimensões;
- Potencialidades para substituição de algumas exóticas importadas.

Dificuldades à sua utilização/transformação:

- Deformações durante e após a serragem devido a tensões de crescimento;
- Secagem difícil, demorada e com perigo de aparecimento de defeitos;
- Valores elevados de retração;
- Fraca estabilidade dimensional;
- Longo tempo para atingir as condições de equilíbrio de humidade;
- Insuficiente domínio de tecnologia apropriada à sua transformação.

As dificuldades apontadas anteriormente podem ser controladas dentro de limites aceitáveis, com o conhecimento e tecnologia de secagem, avaliação e eliminação das tensões de crescimento e tecnologia de reconstituição de componentes maciços por colagem.

1.2 – Informação geral sobre o eucalipto

Existe mais de uma centena de espécies da família botânica dos eucaliptos, as Mirtácias. O eucalipto que será objeto desta publicação é o que existe em

grandes plantações em Portugal que é o *Eucalyptus Globulus* Labill., com o nome vulgar de eucalipto branco ou eucalipto comum.

O nome tem origem no grego "Eucalyptus" que significa "bem coberto", uma vez que os órgãos reprodutores da flor são revestidos por uma membrana semelhante a uma taça que é descartada quando as brotam. "Globulus" pela semelhança das cápsulas com os botões de vestuário desse nome.

De acordo com registos históricos, as primeiras sementes de E. globulus teriam chegado a Portugal, provenientes da Austrália e ilhas de latitudes próximas, por volta de 1820 a 1830. A partir de finais do século XIX, já havia plantações de diferentes espécies de eucalipto visando a produção de madeira para diferentes fins. A expansão da área florestada com eucalipto ocorreu sobretudo entre os anos 60 e 90 do século XX, e atualmente o país dispõe de mais de 800 mil hectares plantados, sendo cerca de 90% desta área ocupada com E. globulus.

O eucalipto é uma espécie de rápido crescimento quando as condições de solo e humidade são favoráveis, atingindo dimensões apropriadas à conversão por serragem (diâmetro à altura do peito DAP ≥ 35 cm), por volta dos 25 a 30 anos, comparando com o pinheiro que se espera atingir esta dimensão por volta dos 45 anos, ou o carvalho por volta dos 65 anos. Paradoxalmente, sendo uma espécie de rápido crescimento, as densidades são muito elevadas, o que por um lado lhe confere boas propriedades mecânicas (dureza e resistência), mas também particulares dificuldades de transformação, sobretudo a secagem. Apenas como ajuda a compreender melhor estas informações, mostra-se na figura 1 uma imagem da microestrutura do eucalipto comum e o topo de um toro, para avaliação das proporções relativas de casca, borne e cerne.

Figura 1 – Microestrutura do eucalipto - porosidade difusa
e a proporção relativa de casca, borne e cerne

1.3 - Tecnologia

Com a tecnologia apropriada, é possível fabricar produtos de boa qualidade final a partir de madeira de eucalipto.

O acréscimo de custos de produção devido à necessidade de operações complementares de transformação e maiores desperdícios por retrações elevadas e eliminação de defeitos, é compensado pelas suas boas características mecânicas (menores espessuras nos componentes estruturais), bom aproveitamento por técnicas de reconstituição por colagem (permite utilizar peças com ligeiros empenos), e o pequeno número e pequena dimensão dos nós. Além de ter um preço de aquisição inferior, na atualidade, quando comparado com outras espécies para as mesmas utilizações, como o pinheiro bravo, o carvalho ou outras.

Uma escolha criteriosa das árvores a utilizar é absolutamente indispensável. À falta de melhores e comprovados critérios, terá de se optar por árvores com uma perfeita morfologia do fuste (cilíndrico, direito, primeiro ramo a altura elevada, etc.), idade e dimensões convenientes (D.A.P. igual ou superior a 35 cm).

2. Critérios de escolha e classificação da madeira em toro

A primeira preocupação na utilização de madeiras para usos com exigência de qualidade deve ser a escolha dos toros quando a árvore ainda se encontra na floresta. Há critérios simples que permitem com razoável certeza prever a possibilidade de obter madeira serrada de boa qualidade, ou pelo contrário, se será uma perda de tempo e recursos abater e tentar converter em peças, toros em que as possibilidades de bom aproveitamento sejam muito reduzidas.

Sabendo-se das dificuldades que a transformação da madeira de eucalipto pode apresentar para utilizações como madeira maciça, é fundamental estabelecerem-se regras de escolha dos exemplares que devem seguir para estas indústrias ainda na floresta com a árvore em pé.

Existem regras bem conhecidas explicando como as condições de crescimento influenciam o desenvolvimento de uma única árvore. Por exemplo, um exemplar com o fuste torto nunca dará madeira direita de boa qualidade, assim como um tronco com curvaturas, feridas ou ramificação baixa, nunca deve seguir para serração.

Assim, os principais critérios para escolha dos exemplares a utilizar resumem-se no Quadro I.

Quadro I – Critérios essenciais para escolha dos exemplares que qualidade na floresta

Fio espiralado	A simples observação visual da casca revelando um enrolamento em hélice da orientação das fibras, constitui um critério muito importante de rejeição
Curvatura	Não podem ser aceites troncos curvos. A curvatura deriva de árvore que cresceu inclinada e provoca descentragem das camadas de crescimento, com grave risco de presença de fortes tensões internas
Adelgaçamento	Troncos com perfil cónico acentuado dificultam muito a transformação por serragem e originam grande desperdício, pelo que também devem ser excluídos
Ramificação baixa	Os ramos baixos e grande diâmetro indicam desvios e curvaturas da orientação das fibras no interior do lenho. Não de deve aproveitar o último toro antes da copa
Descasque ou feridas na periferia	Zonas com casca destacada até à superfície do lenho originam anomalias como manchas e início de degradação do lenho interior. Rejeitar estes toros
Diâmetro	Diâmetros muito pequenos (< do que 30 cm) reduzem as possibilidades de bons aproveitamentos na conversão por serragem

Os critérios de escolha e classificação dos toros de eucalipto tendo em conta os diferentes critérios de avaliação, são difíceis de quantificar. Estabelecer limites numéricos a determinadas medições pode revelar-se uma tarefa complexa, carecendo de profunda reflexão e consenso dos especialistas. Mas há formas expeditas e regras simples que permitem de uma forma eficaz fazer uma escolha com elevado grau de eficácia. Por exemplo, uma simples observação de uma pilha de toros permite logo rejeitar alguns exemplares, tal como mostrado na figura 2. A má conformação circunferencial dos toros é de evidência muito simples.

Figura 2 – Exemplos de toros que devem ser rejeitados
para conversão por serragem

Na figura 3 mostra-se o exemplo de um conjunto de toros de eucalipto que passaram na avaliação de qualidade para conversão por serragem e posterior aproveitamento como madeira maciça.

Figura 3 – Exemplo de toros com boa configuração
para conversão por serragem

Na figura 4 mostra-se em detalhe a boa configuração de toros de eucalipto com potencial para obtenção de peças serradas de boa qualidade. Bom desenvolvimento em diâmetro, toros cilíndricos regulares, pequeno adelgaçamento, sem curvatura longitudinal, ausência visível de fendas e ramos.

Figura 4 – Exemplo de toros com boa configuração
para conversão por serragem

3. Toragem, descasque, preparação

A toragem, ou seja, o comprimento dos toros tirados de um tronco aproveitável de eucalipto, para além de obedecer às exigências de cada utilização, deverá também ter em conta a facilidade de transporte e características dos equipamentos de transformação. Por exemplo, para tecnologia de desenrolamento (obtenção de folha de madeira para contraplacados), a toragem terá de ser compatibilizada com aqueles equipamentos. No que diz respeito ao transporte, nos casos em que se faça em camião da floresta até à fábrica de serração, se forem empilhados transversamente, terão de cumprir a largura máxima permitida que é de 2,55 metros (Diretiva Europeia 2015/719/EU).

Outro tema que tem sido alvo de alguma reflexão é o do descasque na floresta ou em fábrica. O descasque com o toro recentemente abatido (até algumas horas ou dias) é muito fácil. Com um entalhe longitudinal, e depois duas ou três alavancas, a casca sai por inteiro, figura 5.

Figura 5 – Exemplo de fácil descasque do eucalipto logo após o abate e toragem na floresta

O toro descascado e ainda com elevada humidade superficial tem um grande inconveniente, e até ameaça à segurança do manuseamento e transporte, que é tornar-se extremamente escorregadio. A possível secagem prematura do toro sem casca revelou-se que não seria um problema, pois a principal preocupação é a secagem pelos topos. Por outro lado, o descasque do eucalipto em fábrica pode revelar-se difícil se tiver passado algum tempo de armazenamento. A serragem com casca é possível, apenas exige retirada regular das fitas fibrosas de casca que se podem prender aos equipamentos de movimentação. Talvez o melhor compromisso seja esta última opção, mas terá sempre de ser ponderada caso a caso em função dos equipamentos.

Como regra muito importante deve registar-se que o intervalo de tempo entre o abate das árvores e toragem, e a conversão por serragem, deve ser o mais curto possível (máximo recomendado no verão – duas semanas). Se por motivos de logística o armazenamento em toro tiver de ser um pouco mais alargado, recomenda-se vivamente a proteção dos topos, para impedir uma secagem prematura, causadora de abertura inevitável de fendas nos topos. Um exemplo de proteção eficaz e de baixo custo na figura 6, com utilização de filme plástico e cintas plásticas como as que se usam para embalagens.

Figura 6 – Exemplo proteção dos topos para impedir uma secagem prematura antes da operação de serragem

4. Serragem

4.1 – Introdução

A transformação de um volume cilíndrico em perfis retos com superfícies planas e arestas vivas levanta um problema geométrico que contraria as melhores condições de obtenção de peças serradas de qualidade. Quando as maiores superfícies de uma tábua se orientam na direção aproximadamente tangencial às camadas de crescimento da árvore, designa-se por peça de corte tangencial. Quando a maior superfície se orienta numa direção aproximadamente paralela às camadas de crescimento, designa-se por peça de corte radial. Exemplos na figura 7.

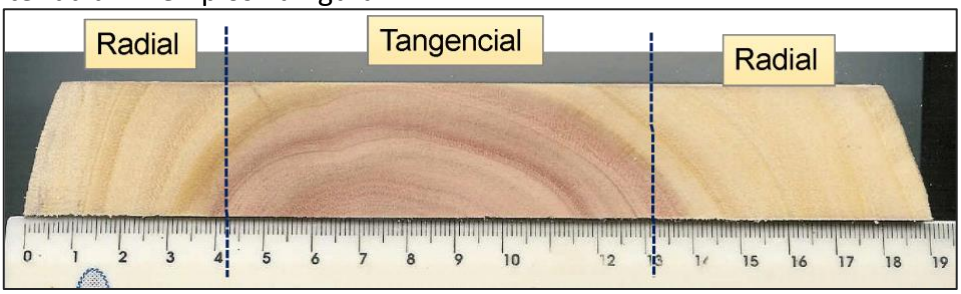


Figura 6 – Zonas de corte radial e de corte tangencial de uma mesma peça de madeira

Os movimentos da madeira em resposta às variações do seu teor de água, designados por inchamento e retração, correspondentes a aumento e diminuição de dimensão respetivamente, são cerca de duas vezes maiores na direção tangencial comparativamente à direção radial. Para melhor qualidade dos componentes fabricados, é de toda a vantagem ter peças com menor movimento de inchamento ou retração, portanto de corte radial. Isto é particularmente importante na madeira de eucalipto, caracterizada por movimentos muito elevados, madeira designada tecnicamente por muito nervosa.

Em resumo, temos a seguinte avaliação:

Vantagens relativas de cada padrão de serragem

Radial:

- menores retrações durante a secagem
- menores empenos durante a secagem
- menor probabilidade de fendas internas

Tangencial:

- desenho mais uniforme das superfícies
- melhor qualidade das superfícies no aplainamento

Como dois dos pontos mais sensíveis da utilização da madeira de eucalipto são a retração/inchamento e os empenos, há toda a conveniência em utilizar padrões de serragem que permitam maior quantidade de peças de orientação radial.

4.2 - Serragem otimizada

A serragem terá de ser feita num intervalo de tempo curto após o abate, pois o início prematuro da secagem provoca fendas importantes nos topos do toro e dificuldades de serragem, tanto por deformações durante a operação, como por endurecimento da madeira, com consequente acréscimo de consumo de potência e aquecimento das serras.

O método de corte com o primeiro ou segundo fio ao centro do toro, e depois cortes paralelos em direção aproximada à radial tem-se mostrado como um compromisso vantajoso no que diz respeito ao rendimento/qualidade. Para diferentes diâmetros ou finalidades podem aconselhar-se determinados métodos de corte, figura 7.

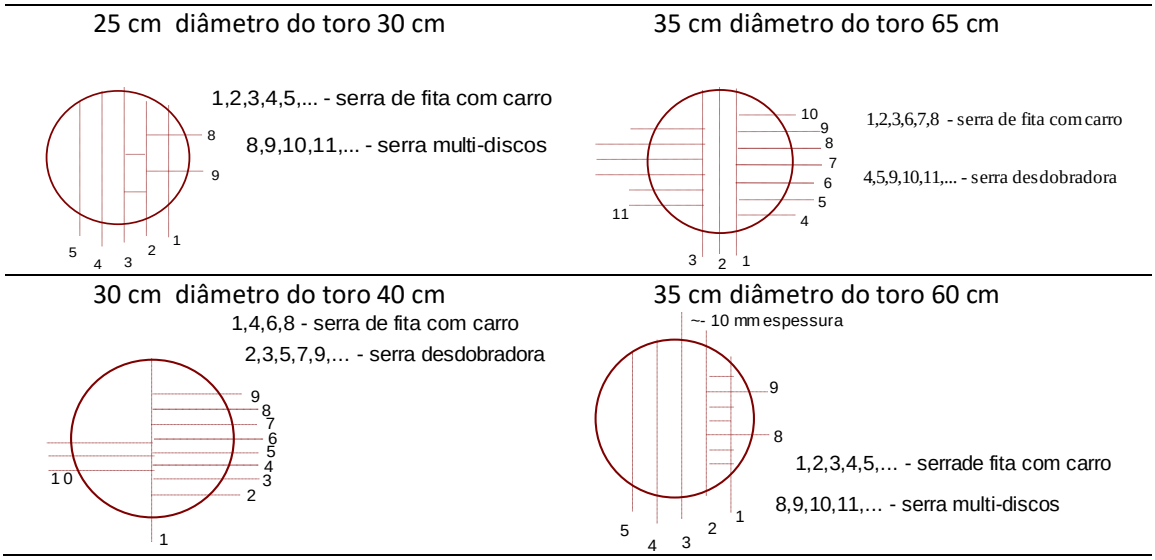


Figura 7 - Otimização dos métodos de serragem para diferentes diâmetros e otimizando o corte na direção radial.

Na prática industrial e tendo em conta as disponibilidades de árvores de melhor qualidade para a transformação por serragem, os diâmetros preferências situam-se entre os 35 cm e os 45 cm. Então, uma boa recomendação de sequência de serragem é a representada na figura 8. O primeiro corte corresponde à retirada de um costaneiro, que pela sua má configuração geométrica e má qualidade corresponde quase sempre a um desperdício em madeira serrada. Se o diâmetro for quase no limite dos 35 cm faz-se de imediato uma rotação de 90° e um segundo corte de outro costaneiro. De seguida mais uma rotação e retirada do terceiro costaneiro (terceiro fio). Após o corte pelo centro do toro (passando pela medula), teremos um perfil com três planos o que permite retirar pranchas ou tábuas de espessura final e todas com a mesma largura, dispensando a operação de galgamento (peça de cantos paralelos, largura constante e quina viva).

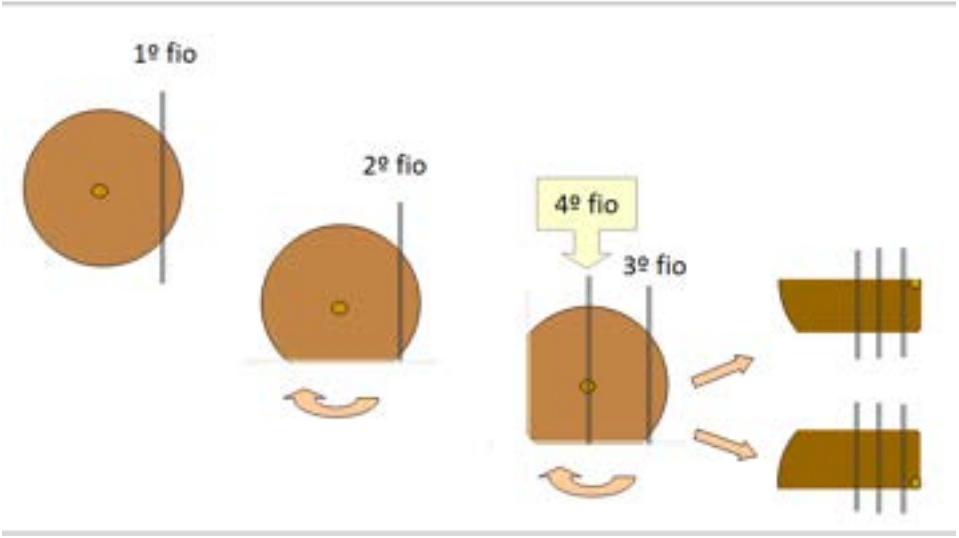


Figura 8 – Resumo de um padrão de serragem simples
e otimizado para a conversão do eucalipto

Para melhor ilustrar esta operação otimizada de serragem de um toro de eucalipto, mostra-se uma sequência de operação com um toro de diâmetro cerca de 45 cm, figuras 9 a 12.

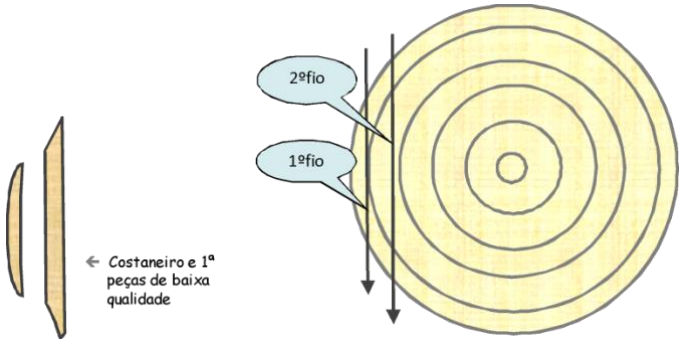


Figura 9 – Início de um padrão de serragem simples e otimizado

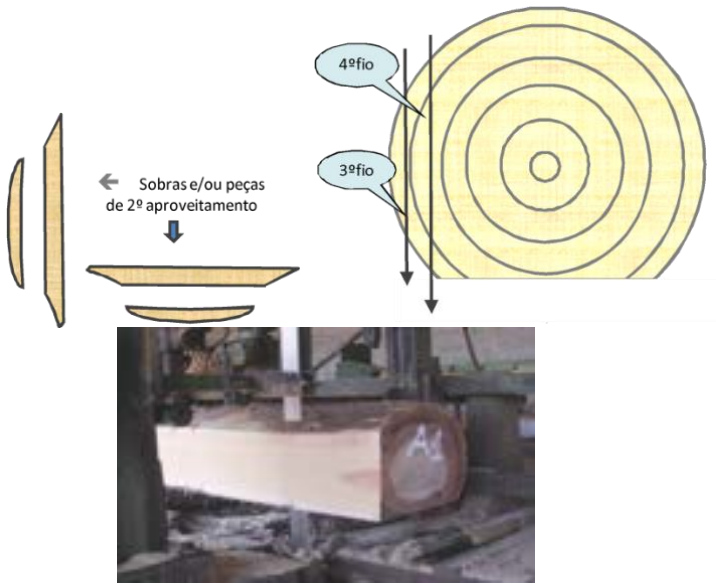


Figura 10 – Primeira rotação do padrão de serragem otimizado

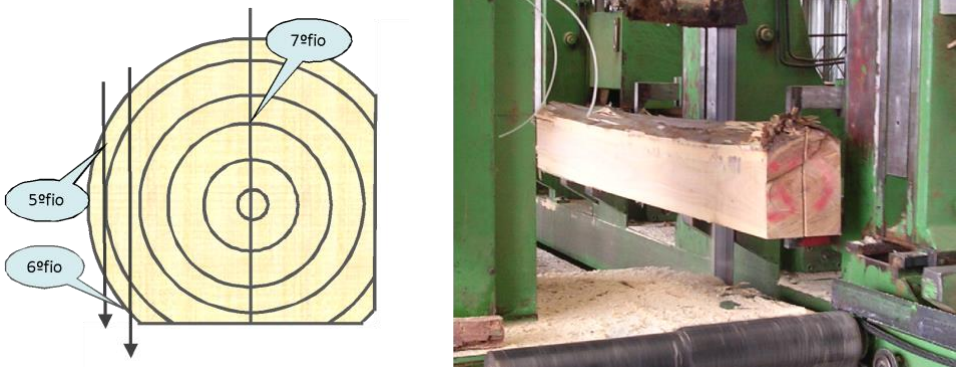


Figura 11 – Segunda rotação do padrão de serragem otimizado

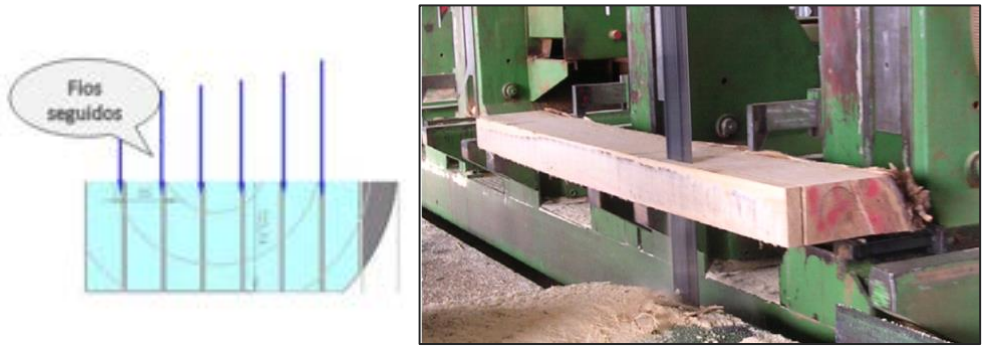


Figura 12 – Sequência final da serragem do padrão de corte otimizado

Na serragem do eucalipto não se põem problemas de abrasividade, pois os gumes das ferramentas não se desgastam anormalmente. Uma serra com trava por torção ou trava por esmagamento, com largura de traço adequado (até duas vezes a espessura da serra), são valores aceitáveis e suficientes.

Por vezes, as deformações durante a serragem podem ser importantes em locais de determinados toros (em regra perto da zona central ou na zona inferior do primeiro toro), ou mesmo em toros inteiros (especialmente os de configuração menos regular ou perto da copa).

Para a conversão do eucalipto por serragem é necessário equipamento muito robusto, tanto nos sistemas de transporte e fixação dos toros no carro de corte (charriot), como na potência do motor da serra de 1ª transformação, que não deve ser inferior a 80 C.V.

Na figura 13 mostra-se uma a superfície de uma pilha em formação, com pranchas acabadas de serrar. Uma boa sugestão de organização da marcação das pranchas serradas é atribuir uma letra ou sequência de letras a cada árvore e uma sequência de números às pranchas de cada toro de uma mesma árvore, por exemplo, as pranchas da árvore C e primeiro toro (o da base) ficam com C1, as do quinto toro da árvore C ficam com a marcação C5. Assim, depois da conversão e secagem, acumula-se experiência sobre a qualidade a partir de observações prévias de classificação.

Figura 13 – Pranchas de eucalipto comum acabadas de serrar

5. Secagem

5.1 - Princípios gerais da secagem

A secagem consiste em retirar a água da madeira até um ponto de equilíbrio, compatível com a sua utilização final.

A quantidade de água presente na madeira é designada por teor de água e é, por definição, calculada através de pesagens de uma pequena amostra, em determinadas condições e fazendo o cálculo de acordo com a expressão matemática,

$$H\% = \frac{P_h - P_0}{P_0} \times 100$$

em que H é o teor de água em percentagem, P_h é o peso inicial correspondente ao valor que vai ser calculado para *H%*, e P_0 é o peso da mesma amostra depois de completamente desidratada numa estufa ventilada a uma temperatura de 102 °C (± 2°C). Na prática industrial utilizam-se diferentes aparelhos eletrónicos que, por métodos indiretos (resistência elétrica ou dielétrica), chegam aos mesmos valores do cálculo por pesagens que serve sempre de padrão para calibração dos outros sistemas.

Sendo a secagem uma das operações mais importantes e decisivas para um bom aproveitamento da madeira de eucalipto, faz-se uma apresentação da teoria da secagem para melhor se controlar na prática industrial este processo. Na figura 14 representa-se uma célula da madeira com a parede de cor castanha e o interior em cor verde representando a água nela contida (no estado líquido). Designa-se industrialmente por madeira verde a madeira saturada em água. À medida que se inicia o processo de secagem representa-se nesta figura a água a sair do interior da célula através da parede celular. Mas, na realidade, a maior parte da água vai sair no sentido longitudinal (segundo o comprimento e direção das fibras e das células). Quando a madeira se diz seca, na verdade já não tem água líquida no interior das células, mas ainda tem alguma água nas paredes celulares. Esta quantidade mínima de água prende-se à madeira por processos químicos complexos e assim se mantem segundo regras de equilíbrio, podendo ganhar mais água ou perder água de acordo com as condições do ar exterior (mais propriamente com a humidade relativa do ar).

O mecanismo muito importante a considerar no processo de secagem é que quando toda a água saiu do interior das células, a água que ainda permanece embebida nas paredes das células, ao sair, provoca uma diminuição da espessura destas paredes, sendo a razão da diminuição de volume, ou seja, da retração.

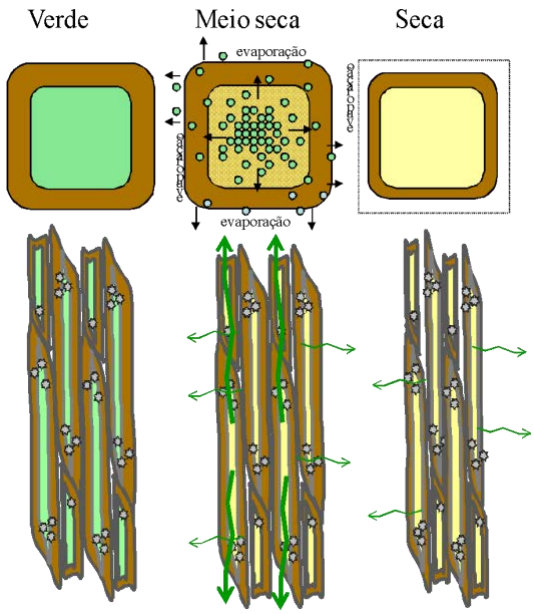


Figura 14 - Modelo do movimento da água durante a secagem

Na figura 15 mostra-se uma representação esquemática de como a água sai da madeira, de uma forma relativamente mais rápida na direção longitudinal, seguindo-se alguma saída na direção radial e muito pouca saída na direção tangencial. Para a água sair do volume de uma peça de madeira terá de se movimentar pelo interior da massa de madeira até atingir a superfície, e aí ficar sujeita a fenómeno físico de evaporação. Este efeito de arrastamento da água da superfície até à superfície chama-se migração.

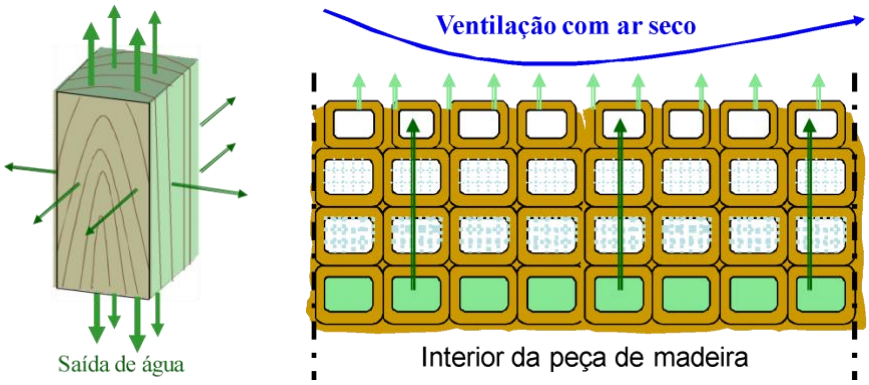


Figura 15 – Saída da água numa peça de madeira

Ainda relativamente à figura anterior, a ventilação com ar mais seco sobre as superfícies faz o arrasto final da água (evaporação), mas para que o processo seja bem conduzido, à retirada de água da superfície terá de corresponder uma migração de água do interior até à superfície, num equilíbrio que tem de ser controlado. Se a secagem da camada mais superficial for muito rápida inicia-se o fenómeno da retração, e como volume interior ainda é superior ao da camada superficial abrem-se fendas nesta zona superficial.

Para acentuar a importância deste equilíbrio destaca-se a frase seguinte como sendo o segredo para uma boa secagem,

Velocidade de evaporação deve ser < ou = velocidade de migração

A deslocação da água no interior da madeira dá-se por diferentes mecanismos e, muitas vezes, atuando em simultâneo.

a) **Fluxo líquido** – água circula na proximidade das superfícies, por fendas e por vazos comunicantes. Este movimento é instantâneo;
b) **Capilaridade** – a água circula por canais de pequeno diâmetro impulsionada por mecanismos físicos ligados à tensão sua superficial, através de poros, lumens e pequenas fendas. Movimento muito rápido.

c) **Higroscopicidade / Difusão** – a água liga-se quimicamente à madeira nas paredes celulares e a concentração de água tende a equilibrar-se. Movimento muito lento
d) **Transporte por movimento do ar húmido** – o ar húmido em circulação entre diferentes peças de madeira numa pilha pode ser responsável por transporte de água entre locais distantes. Movimento relativamente rápido.
e) **Movimento das zonas quentes para as zonas frias** – este mecanismo tem relação direta com a evaporação e condensação. Nos locais mais quentes, a água tende a evaporar e desta forma movimenta-se rapidamente pelas correntes de ar, mas ao chegar a um ponto frio tende a condensar e ao voltar ao estado líquido essa água é reabsorvida pela madeira. O movimento da água é lento, mas pode percorrer grandes distâncias.

5.2 - Teor de água de equilíbrio

O teor de água da madeira é um parâmetro variável, dependendo de vários fatores, essencialmente a humidade relativa do ar envolvente. Mas a humidade relativa do ar depende, por sua vez, de muitos outros componentes como sejam, a humidade absoluta do ar, a temperatura e a pressão atmosférica. A madeira pode perder água para o ar envolvente e ganhar água do ar envolvente, sendo considerada como um material higroscópico.

O teor de água da madeira, num determinado instante, é o resultado de um equilíbrio com as condições exteriores. Este valor do teor de água de equilíbrio é o parâmetro essencial para todo o processo de transformação (fase de secagem), mas também em toda a vida útil dos componentes de madeira, pelo que é necessário determiná-lo com relativa precisão. Uma das formas empíricas de determinar o teor de água de equilíbrio foi estudada há muito tempo e consistia em o relacionar com a temperatura e a humidade relativa do ar. A forma de apresentação era gráfica através de um ábaco com linhas, mas esta leitura era pouco precisa, e tornava-se difícil de integrar nos processos automáticos como os sistemas de secagem e controlo por meios informáticos.

A norma americana ASTM D-4433 define uma fórmula que permite determinar com razoável rigor o valor do teor de água da madeira a partir de um conjunto de parâmetros relacionados com a temperatura e a humidade relativa do ar, figura 16.

$$\mathrm{EMC} = \frac{1800}{\mathrm{W}}\left(\frac{\mathrm{KH}}{1-\mathrm{KH}} + \frac{(\mathrm{K_1KH} + 2\mathrm{K_1K_2K^2H^2})}{(1 + \mathrm{K_1KH} + \mathrm{K_1K_2K^2H^2})}\right)$$

Onde

$W = 330 + 0{,}452\ T + 0{,}00415\ T^2$

$K = 0{,}791 + 0{,}000463\ T - 0{,}00000084\ T^2$

H = Humidade relativa em (%)

$K_1 = 6{,}34 + 0{,}0000935\ T^2$

$K_2 = 1{,}09 + 0{,}0284\ T - 0{,}0000904\ T^2$

T = Temperatura (°C)

Figura 16 – Método matemático empírico para estimar o valor do teor de água de equilíbrio, segundo o definido na norma americana ASTM D-4433.

A razão de se chamar teor de água "de equilíbrio" é porque se trata de um processo dinâmico. Nas condições reais de utilização a madeira está quase sempre a variar para um novo valor, assim como as outras condições variam constantemente de acordo com as horas do dia, o clima e as estações do ano.

A partir daquela fórmula, por exemplo, introduzida numa folha de cálculo num computador, poderemos fazer um gráfico semelhante aos ábacos antigos, mas destacando apenas os valores mais comuns no uso da madeira, temperaturas entre 10°C e 30°C. Veja-se o resultado de um destes exercícios na figura 17. A variação de temperatura é aparentemente pouco significativa no valor do teor de água de equilíbrio da madeira, mas, na verdade, a temperatura também faz variar a humidade relativa do ar, que é na realidade o que condiciona o teor de água de equilíbrio.

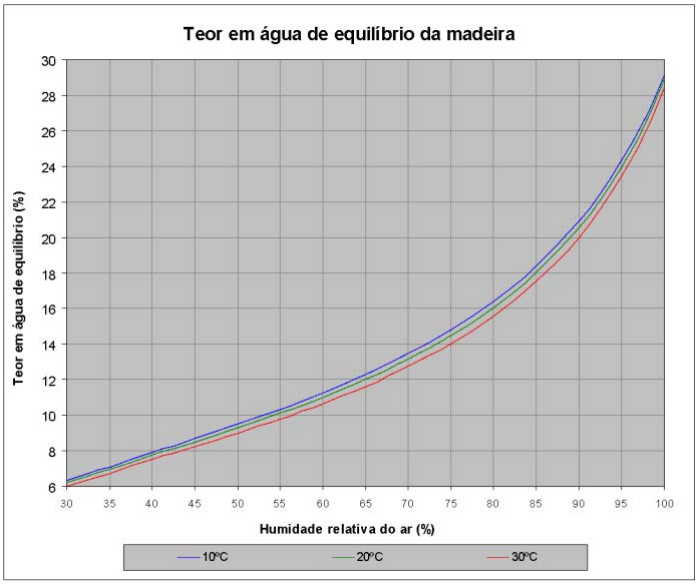


Figura 17 – A grande influência da humidade relativa do ar no valor do teor de água de equilíbrio da madeira

5.3 - Retração da madeira

Como se referiu anteriormente, a diminuição do valor do teor de água da madeira, nomeadamente durante o seu processo de secagem, tem como consequência a diminuição do seu volume. Numa amostra de madeira cortada em forma de paralelepípedo segundo os eixos principais (longitudinal, tangencial e radial), a diminuição de dimensões é muito diferente em cada uma destas direções. Na direção longitudinal (segundo o eixo do tronco cilíndrico) a retração é praticamente insignificante. Na direção tangencial às camadas de crescimento é cerca do dobro da retração na direção perpendicular às camadas de crescimento (direção radial). No entanto, as grandes variações de dimensão por retração dão-se abaixo do chamado ponto de saturação das fibras (PSF), como se exemplifica na figura 18.

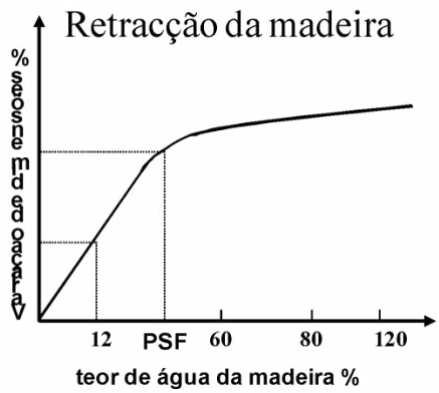


Figura 18 – Retração da madeira quando perde água

Relativamente à quantificação dos valores das retrações da madeira de eucalipto, não considerando as situações de exemplares com defeitos genéticos ou de crescimento, nem em que tenha ocorrido uma deficiente operação de secagem (por exemplo colapso, tensões internas, empenos ou outros defeitos), são de esperar os seguintes valores médios [fonte: Albino de Carvalho]:

Retração volumétrica total – 23 %
Retração tangencial total – 13,2 % (elevada)
Retração radial total – 8,3 % (média)
Anisotropia – 1,6 (elevada)
Teor de saturação das fibras – 37 %
Coeficiente de retração – 2,5 (nervosa)

Relembrar que as retrações totais se referem à diminuição de dimensões desta madeira saturada em água até completamente anidra, mas na realidade o que acontece é a diminuição desde a madeira no estado de saturado em água à saída da serragem, até ao valor de equilíbrio de teor de água no ambiente de utilização final, o que significa uma retração de pouco mais de metade dos valores referidos anteriormente.

Para cálculo da variação dimensional da madeira na sua utilização final e num ambiente com as variações normais (verão – inverno), o cálculo das retrações e inchamentos tem de ser efetuado usando os valores referidos. Em muita bibliografia opta-se por indicar não só a retração total, mas a retração por cada valor de variação do teor de água. Designa-se por retração unitária, dada em percentagem de variação dimensional por cada unidade de variação de teor de água (% / %).

Como informação geral sobre a terminologia usada na indústria da madeira, mostram-se no Quadro II os termos utilizados para caraterizar o estado da relação da água com a madeira.

Quadro II -. Terminologia habitual para caracterizar diferentes valores do teor de água da madeira

Madeira verde	> 30% teor de água	Saturada em água
Madeira no PSF	entre 25% a 35%	Depende de cada espécie
Madeira comercialmente seca	± 18 %	Armazenamento e transporte
Madeira seca	12 % a 16 %	Uso comum
Madeira anidra	0 %	Em laboratório

Quando se pretende caraterizar uma determinada espécie de madeira, os valores das retrações constituem informação muito importante a ser considerada em todas as fases de processamento (transformação e fabrico), e mesmo durante todo o tempo de uso dos componentes. Isto é particularmente importante em espécies caraterizadas por valores de retração muito elevados, como é o caso do eucalipto. Veja-se o exemplo da variação de dimensões mostrado na figura 19, com uma mesma peça de madeira de eucalipto (uma régua de soalho com 15 cm de largura), cortada com as camadas de crescimento quase paralelas à largura (corte tangencial).

Figura 19 – Exemplo do movimento da madeira de eucalipto de corte tangencial em função do seu teor de água

5.4 - Controlo da secagem

Tendo em conta que este trabalho tem como foco principal a madeira de eucalipto e sendo conhecidas as dificuldades de secagem de madeiras muito densas, como é o caso do eucalipto comum, um perfeito conhecimento do controlo do processo de secagem é fundamental para a máxima valorização desta espécie.

A secagem do eucalipto tem de ser conduzida segundo um processo lento, de modo a dar tempo para que a água no interior da madeira chegue às superfícies onde vai ser evaporada, mas sem deixar secar em demasia a camada superficial, evitando assim fendas, empenos e tensões internas, que criariam defeitos que iriam comprometer definitivamente a qualidade final. Terá de se manter uma relação equilibrada entre o teor de água médio da madeira e o teor de água de equilíbrio do ambiente envolvente, em todas as fases da evolução da secagem.

O teor de água no interior da madeira é avaliado por sensores introduzidos na madeira até uma profundidade conveniente e lido em aparelhos elétricos calibrados para este efeito. As condições de equilíbrio exterior são calculadas com outros aparelhos eletrónicos com base na temperatura e humidade relativa do ar, calculando o teor de água para o qual a madeira tende naquelas

condições. Para designar este parâmetro usa-se habitualmente a terminologia inglesa "*Equilibrium Moisture Content*" (E.M.C.). Na figura 20 mostra-se um esquema da montagem para este controlo. O quociente entre o teor de água da madeira e o valor de E.M.C. é o gradiente de secagem e tem o significado de caracterizar a velocidade que estamos a impor à secagem.

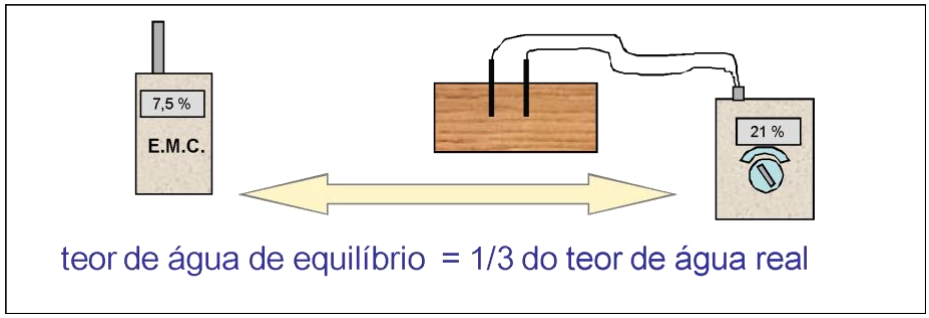


Figura 20 – Esquema da avaliação do gradiente entre o teor de água no interior da madeira e o equilíbrio nas condições exteriores.

Outra forma complementar ou alternativa de avaliar a velocidade que estamos a impor ao processo de secagem é colocando pinos de medição direta do teor de água na camada superficial. O esquema desta montagem é mostrado na figura 21. De certo modo, este último valor corresponde ao E.M.C. descrito para a figura 20 porque o teor de água da camada superficial tende a ser igual ao valor de equilíbrio do ambiente envolvente.

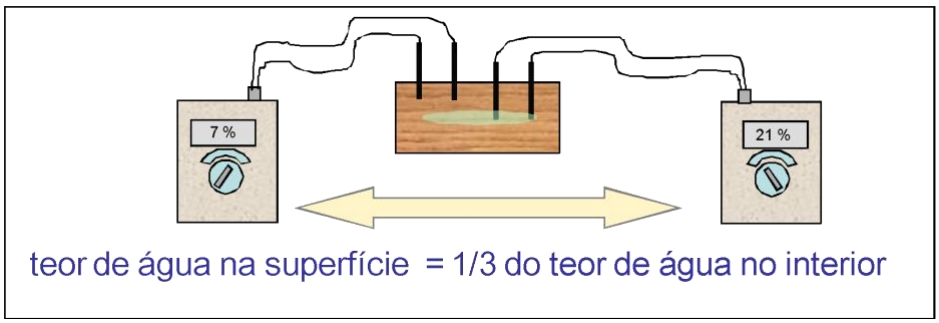


Figura 21 – Esquema da avaliação do gradiente entre o teor de água no interior e na camada superficial

No Quadro III apresentam-se as recomendações de gradiente de secagem em função das espécies mais fáceis ou mais difíceis de secar, tendo ainda em conta que, para uma mesma espécie, as pranchas de maior espessura são também as mais difíceis e demoradas de secar.

Quadro III - Gradientes de secagem para diferentes caraterísticas do material a secar

Caraterísticas do material a secar	**Gradiente ou potencial de secagem**
Espessura fina, madeira fácil de secar	4,5 a 7
Espessura grossa, madeira fácil de secar	3 a 4,5
Espessura fina, madeira difícil de secar	3 a 4
Espessura grossa, madeira difícil de secar	2,5 a 3

Alguns fabricantes de secadores usam gradientes variáveis ao longo de um mesmo processo de secagem, ou seja, gradientes mais baixos nas primeiras fases da secagem e gradientes mais elevados perto do final da secagem, mas isto não será o recomendado para a madeira de eucalipto.

Para a secagem da madeira de eucalipto recomendam-se gradientes constantes nunca superiores a 3. Só por uma questão de informação geral, este valor corresponde a uma secagem lenta ou muito lenta, em comparação com os valores de gradiente de secagem de 4 ou 6 recomendados para espécies fáceis de secar, como por exemplo, o pinheiro bravo.

Como resumo do que foi dito anteriormente, importa destacar que é muito importante manter uma relação equilibrada entre o teor de água médio da madeira no seu interior e os valores do teor de água médio na superfície em todas as fases da evolução da secagem, mas em particular no seu início.

5.5 - Defeitos da secagem

Os defeitos de secagem aparecem como resultado de uma má adaptação do programa de secagem, quer à espécie quer à espessura das pranchas. Mostra-se na figura 22 um esquema dos principais defeitos de secagem. Todos estes defeitos se revelam de forma intensa numa secagem mal conduzida da madeira de eucalipto.

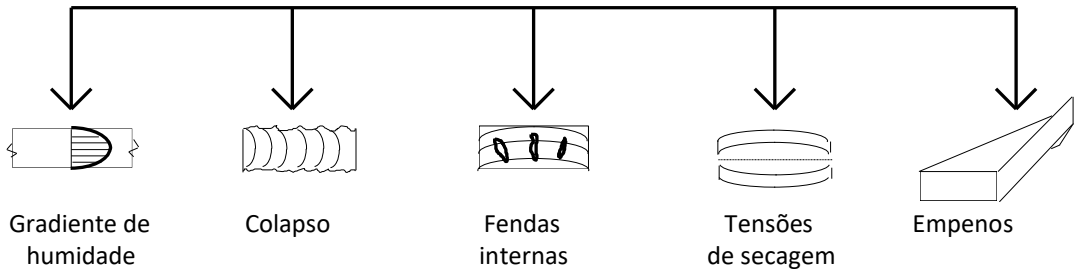


Figura 22 - Principais defeitos de secagem do eucalipto.

Gradiente de humidade

Neste tema dos defeitos de secagem, considera-se gradiente de humidade a relação entre o teor de água final nas camadas superficiais e o da camada interior. Se o teor de água não se encontrar homogéneo em toda a espessura, ao fazer-se um corte da madeira a meia espessura, ou durante as operações posteriores de fabrico, as peças começam a ficar deformadas à medida que as zonas interiores ficarem expostas ao ar e iniciarem finalmente a sua secagem e consequente retração.

Colapso

Colapso é um defeito caracterizado por um esmagamento das células em certas zonas da peça de madeira. É reconhecido pelo aspeto rugoso ou ondulado da superfície. A madeira com colapso tem uma densidade muito superior e torna-se muito difícil de trabalhar, além das elevadas retrações reduzirem também as dimensões de forma exagerada e provocarem curvaturas exageradas.

O colapso aparece com frequência nas espécies folhosas duras como os carvalhos e os eucaliptos. O colapso aparece evidenciado por ondulações superficiais nas peças de corte radial. O colapso não implica obrigatoriamente o aparecimento de fendas, mas é muito frequente aparecerem os dois defeitos em simultâneo.

O colapso sem fendas pode ser recuperado pelo tratamento pelo vapor, como é explicado mais adiante.

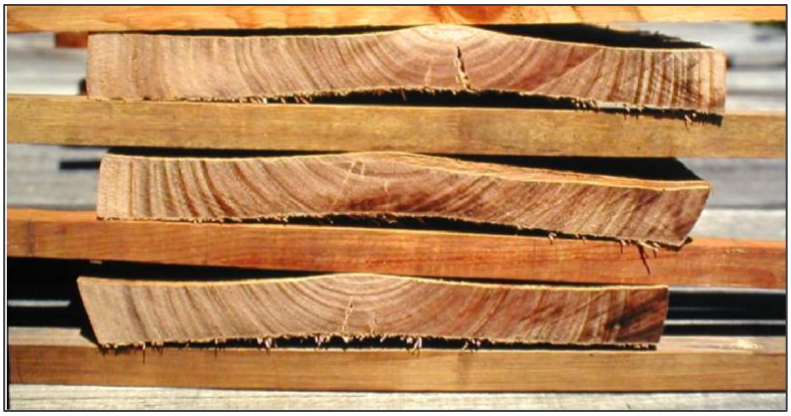


Figura 23 – Pranchas revelando forte presença de colapso.

Fendas internas

As fendas internas aparecem muitas vezes associadas ao colapso e são geralmente grandes defeitos que inutilizam completamente a madeira, figura 24. As fendas internas podem ser totalmente indetetáveis a partir da observação da superfície. Só depois de cortar as peças se dá pela sua presença. É sempre de suspeitar de fendas internas quando se observa um forte colapso ou retrações tangenciais elevadas, sobretudo nas peças de maior espessura.

Figura 24 – Pranchas revelando forte presença de colapso com fendas internas.

Fendas superficiais

As fendas superficiais aparecem por vezes a meio da secagem e desaparecem ou tornam-se invisíveis no final da secagem. A sua ocorrência significa sempre que houve uma condução incorreta do ciclo de secagem, ou seja, secagem demasiado rápida nas primeiras fases do processo. Se as fendas superficiais não forem muito profundas desaparecem nas operações de transformação mecânica das superfícies. Mas as fendas profundas representam descontinuidades que comprometem as caraterísticas mecânicas, essencialmente a resistência à tração e à flexão.

Deformações

As deformações ou empenos são um defeito causado pelo mau empilhamento das madeiras no secador. A madeira tem sempre tendência a deformar-se, mas como é plástica na fase de elevada humidade e calor durante o ciclo de secagem, os empenos podem ser eliminados ou muito reduzidos com procedimentos adequados. Se o empilhamento for correto, pode evitar-se este defeito quase completamente. É importante a regularidade das espessuras das réguas de empilhamento, a sua colocação em fiadas verticais bem alinhadas e o seu espaçamento.

Tensões internas

As tensões internas são um dos piores defeitos de secagem e dos mais difíceis de detetar. A madeira com tensões de secagem deforma-se completamente nas operações de transformação mecânica, causando um grande desperdício de material, exemplos na figura 25. A causa das tensões internas é a mesma das fendas superficiais. As tensões internas podem ser remediadas quer preventivamente, com um programa de secagem apropriado, quer posteriormente através de tratamento adequado de inversão de tensões.

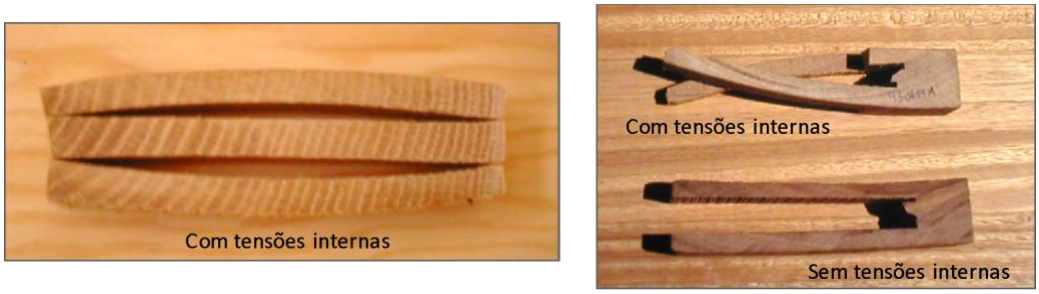


Figura 25 – Exemplo de amostras revelando presença ou ausência de tensões internas.

Descolorações

As descolorações são em geral superficiais e causadas pela elevada temperatura e/ou arrastamento de extrativos ou sujidade. Desaparecem com o trabalho mecânico de preparação das superfícies. No caso do eucalipto pode aparecer um tipo de mancha causado por escorrimento de água líquida, devida aos sistemas de humidificação ou a condensações. Estas manchas escuras são devidas a arrastamento de extrativos pigmentados e por vezes são relativamente profundas. A madeira de eucalipto é de cor clara, pelo que manchas escuras podem comprometer a qualidade final para utilizações mais nobres. Há que tomar medidas preventivas para as evitar.

6. A secagem do eucalipto

Todas as madeiras secam naturalmente se as condições exteriores corresponderem a um equilíbrio higroscópico inferior ao que a madeira tem num determinado momento. Na transformação industrial, a operação de secagem é conduzida de forma controlada. Entre as diferentes formas de secagem, como sejam, ao ar livre, em secador convencional, em secador por desumidificação, por vácuo ou ainda por novas tecnologias como as micro-ondas, para o eucalipto, as formas de secagem recomendadas são a secagem ao ar livre e a secagem por sistema convencional de ar quente. Em qualquer das formas de secagem controlada devem ser seguidas regras básicas que seguidamente se descrevem.

6.1 - Formação das pilhas de secagem

No caso específico da madeira de eucalipto, mesmo a secagem ao ar livre tem de seguir determinados procedimentos que permitam um bom resultado final.

A formação das pilhas de secagem é um aspeto importante para o bom resultado e boa qualidade final da madeira. Uma mesma pilha de secagem bem feita serve para a secagem ao ar e posteriormente para a secagem em secador.

A madeira tem de ser empilhada sobre réguas de espessura regular e bem calibrada, normalmente de 25x25mm de secção, de uma madeira dura já seca. Estas réguas de empilhamento têm de ser colocadas todas no mesmo enfiamento vertical. Não se devem misturar madeiras de diferentes espessuras, mas se tal acontecer, as sondas elétricas de controlo têm de ser introduzidas nas tábuas de maior espessas, ou seja, nas peças de secagem mais lenta, o que apenas faz atrasar a secagem das tábuas mais finas (mas sem perda de qualidade final). Ao misturar diferentes espessuras, o único inconveniente é que o tempo final de secagem é o tempo das peças que demoram mais tempo a secar. O afastamento entre as fiadas de réguas de empilhamento deve ser no máximo de 40 cm para espessuras de 27 a 35 mm, mas apenas de 20 cm ou menos para espessuras inferiores a 25 mm. Devem colocar-se pesos sobre as pilhas de madeira de forma a impedir a deformação das tábuas, sobretudo das camadas superiores, figura 27.

Na secagem ao ar livre é muito importante que as pilhas fiquem afastadas do solo, pelo menos uma distância de 30 cm de modo a permitir uma libertação do ar com elevada humidade que se pode acumular no interior e parte inferior da pilha, dificultando o necessário arejamento natural. Exemplo da formação de uma pilha secagem ao ar na figura 26. As pilhas de secagem ao ar devem ser colocadas num local relativamente arejado, mas sem excessiva exposição ao calor do Sol de verão. A cobertura das pilhas é de grande vantagem. A estrutura de apoio inferior da pilha tem de ser robusta e perfeitamente alinhada e plana.

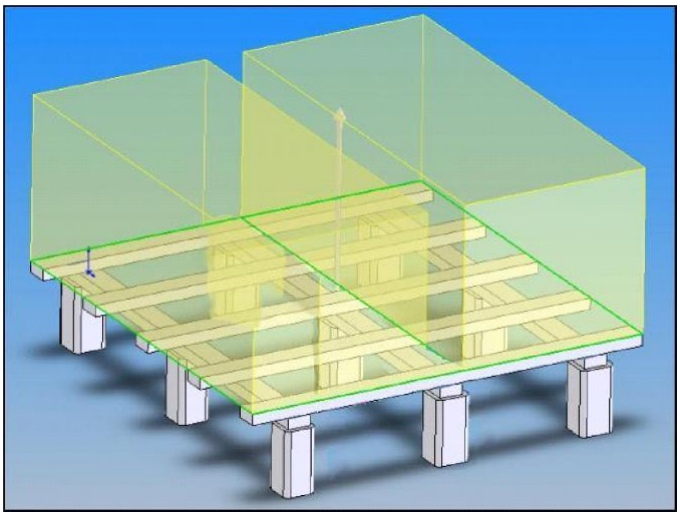


Figura 26 – Exemplo de uma pilha para secagem ao ar do eucalipto.

Na figura 27 mostra-se um exemplo real de um empilhamento de réguas de eucalipto, tanto para secagem ao ar como para secagem em secador.

Figura 27 – Exemplo real de uma pilha para secagem ar do eucalipto.

Para a secagem em secador, a colocação da madeira dentro da câmara tem de respeitar algumas regras básicas como a de deixar um afastamento entre a madeira e as paredes do secador, nos lados de circulação de ar, de uma distância igual à soma das aberturas de passagem de ar entre as tábuas, ou seja, igual à espessura das réguas de empilhamento vezes o número de camadas. Por outro lado, não se pode deixar nenhuma passagem de ar lateralmente à pilha, nem superiormente, nem inferiormente. Caso não se consiga encher totalmente o secador é necessário tapar as passagens de ar com placas de contraplacado ou outro material resistente à humidade e calor.

Sabendo-se que a madeira tem um comportamento visco-plástico nas fases de elevado teor de água e elevadas temperaturas, recomenda-se condicionar mecanicamente as pranchas de forma a impedir a sua deformação. Depois de seca, a madeira mantém a forma em que se encontrava condicionada. Na prática, colocar pesos sobre as pilhas poderia ser uma solução fácil e eficaz, contudo tem de ser feita com muitos cuidados, pois o desequilíbrio de uma grande massa a grande altura representa um potencial risco de acidentes. Uma forma mais dispendiosa mas eficaz é um sistema de condicioná-las com amarramentos ajustáveis elásticos, figura 28.

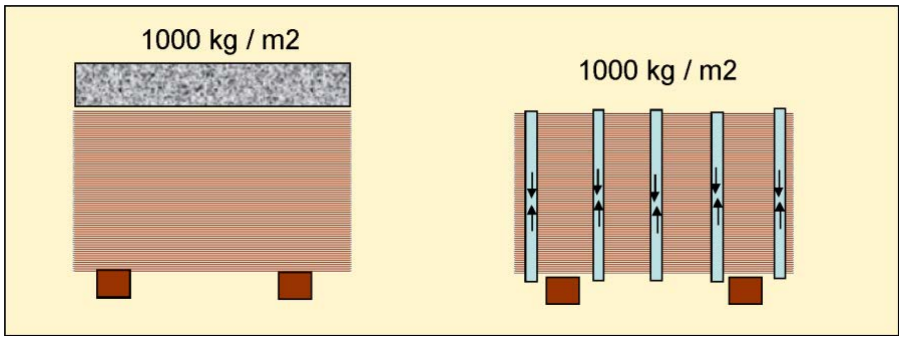


Figura 28 – Recomendação de restrição do empilhamento na secagem da madeira de eucalipto.

A secagem tem de ser cuidada e lenta nas primeiras fases (acima do ponto de saturação das fibras), em que a madeira se mostra susceptível ao colapso. Uma pré-secagem lenta ao ar, seguida de secagem em secador convencional é já prática corrente em muitas indústrias. Um programa de secagem artificial apropriado permite completar ciclos de secagem, desde completamente verde até 10% de teor de água, em períodos de tempo de 12 e 25 dias, para espessuras de 12 e 30 mm respetivamente. As temperaturas devem ser baixas nas primeiras fases da secagem artificial (35 a 40°C), subindo gradualmente ao longo do período de secagem até cerca dos 75°C, com velocidades de ventilação também fracas a moderadas (± 0,5 m/s).

Após secagem, é indispensável proceder a uma cuidada operação de controlo de tensões internas de secagem e, caso necessário, proceder a tratamentos de relaxação de tensões e estabilização dos gradientes de humidade.

6.2 - Espessuras a secar

Não se recomenda secagem de espessuras superiores a 35 mm, pois o risco de colapso, fendas internas, tensões de secagem é muito elevado, assim como o tempo total para uma boa secagem.

Por outro lado, a secagem de peças de espessuras inferiores a 15 mm é também desaconselhável pois registam-se empenos fortes, o que obriga a colocação de réguas de empilhamento a distâncias muito curtas (20 cm ou menos) e aplicação de pesos sobre as pilhas. Para secar peças muito finas, se não forem tomadas precauções especiais na forma de empilhamento, pode-se degradar quase completamente a qualidade do material. As espessuras mais recomendáveis são de 27 ou 35mm.

6.3 - Técnicas de controlo da secagem

Nos secadores modernos, o controlo do processo é feito automaticamente através de sondas elétricas que vão avaliando o teor de água da madeira ao longo de todo o ciclo de secagem, e consequentemente, impõem a evolução da temperatura e da humidade relativa do ar em conformidade com um programa pré-estabelecido. No entanto, e sobretudo quando se iniciam novos ciclos de secagem de espécies difíceis (eucaliptos e outras), e de origens diferentes do que seja o habitual, há toda a vantagem em preparar uma ou várias pranchas de controlo. A humidade inicial destas pranchas é determinada previamente por uma pequena amostra e é estimado o peso anidro de toda a prancha. Assim, ao longo do processo de secagem, a prancha é regularmente pesada e, com um cálculo muito simples, sabe-se com exatidão qual o seu teor de água. Além de se ir controlando o seu aspeto no que diz respeito a empenos e fendas de secagem, permitindo corrigir ou alterar ligeiramente o programa de secagem.

6.4 - Avaliação dos gradientes de humidade

Como a madeira seca da superfície para o interior, as camadas superficiais apresentam, no final da secagem, um valor mais baixo do que o interior das tábuas. O controlo automático é feito com as sondas introduzidas até 1/3 da espessura, sendo os valores de teor de água correspondentes mais ou menos à humidade do interior. É portanto necessário fazer uma humidificação superficial para igualar o teor de água em toda a espessura, e assim manter o gradiente recomendado.

Por outro lado, como a água circula cerca de 100 vezes mais depressa na direção axial do que na direção transversal, também os topos das peças estarão mais secos do que o meio das tábuas.

Por estas razões é conveniente fazer o controlo do teor de água tanto na espessura como ao longo de uma tábua. O controlo pode fazer-se com medidores elétricos com as pontas isoladas, introduzindo-os em diferentes profundidades e locais. O método mais rigoroso é retirar de uma tábua (1) as amostras A1, B1, e C1, a diferentes distâncias do topo, conforme exemplificado na figura 29.

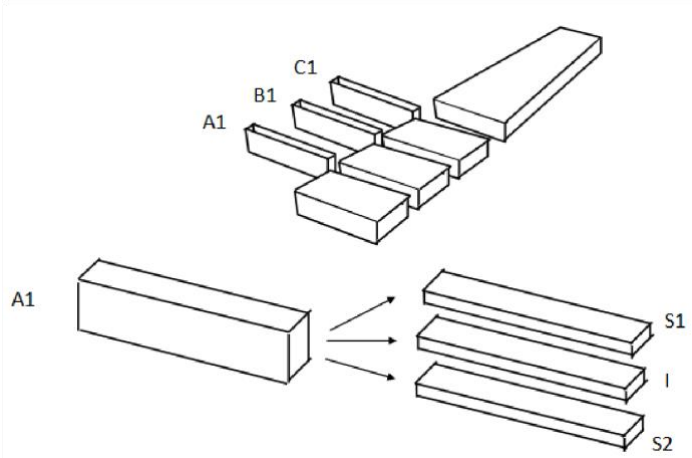


Figura 29 - Recolha de provetes para determinação do teor de água das pranchas e avaliar as tensões de secagem.

Cada uma das amostras A1, B1 e C1 é dividida em três camadas: S1, I e S2 (superfície, interior, superfície), que são pesadas de imediato e colocadas numa estufa de laboratório a 102 °C até atingirem um peso constante. Depois deixa-se arrefecer e pesa-se novamente. Por cálculos simples sabe-se qual o teor de água médio em cada uma das fatias de cada amostra. Este procedimento permite ainda avaliar as deformações indicadoras de tensões de secagem.

6.5 - Equilibragem dos gradientes de humidade

Se as diferenças entre os valores de teor de água encontrados no interior da madeira forem significativos, digamos, superiores a 4 % (mais húmidas no

interior do que na superfície), justifica-se fazer um tratamento de homogeneização que consiste em colocar a madeira no secador a 60 °C, com ventilação moderada, e com a humidificação no máximo (humidade relativa do ar de 90 % ou mais), durante 6 a 12 horas e depois desligar o secador e deixar arrefecer só com a ventilação ligada.

6.6 - Avaliação das tensões internas

As tensões internas são detetadas por amostras: A2; B2; e C2, retiradas junto às amostras A1, B1 e C1 utilizadas para os valores de teor de água. Fazem-se de seguida cortes como indicado no exemplo da figura 30 (chamado ensaio do garfo), e observam-se as deformações das pontas do garfo. Se a deformação indicada como CT (com tensões) se regista imediatamente após o corte, isso revela a presença de tensões internas, mas se esta deformação só aparecer ao fim de 24 horas indica que não há tensões mas sim diferenças de humidade entre a superfície e o interior. Se a amostra não se deformar, como em ST (sem tensões), e ao fim de 24 horas se mantiver sem deformar, então a madeira encontra-se em boas condições para ser utilizada.

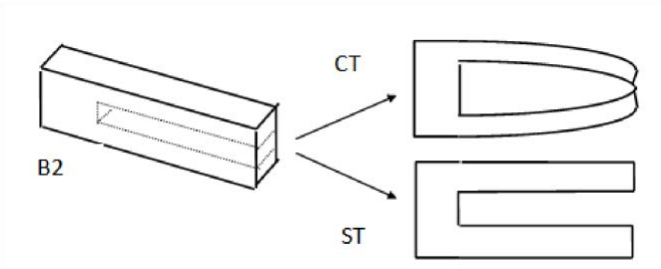


Figura 30 - Ensaio do garfo para avaliação da presença de tensões internas de secagem.
CT - amostra com tensões.
ST - amostra sem tensões.

6.7 - Eliminação das tensões internas de secagem

A forma mais eficaz de eliminar as tensões internas de secagem é com o tratamento por vapor. A madeira é colocada num ambiente de vapor de água saturado a 100 °C, à pressão normal, durante 4 a 6 horas. Este tratamento é o mesmo para a eliminação do colapso.

6.8 - Tempo de secagem

O tempo total de secagem depende dos métodos de secagem, das espessuras das madeiras e dos valores de teor de água inicial e final. A secagem ao ar livre, controlada com todos os cuidados para obtenção de uma boa qualidade final, pode demorar vários meses (até um ano), e dificilmente se conseguirão valores de teor de água abaixo de 20 %. No entanto, a combinação de secagem natural ao ar livre com uma operação final de secagem em secador convencional de ar quente, pode ser uma boa solução na perspetiva da rentabilidade da operação, porque serão reduzidos os custos finais da secagem artificial.

Como informação geral da expectativa de duração da secagem artificial da madeira de eucalipto, apresenta-se no Quadro IV a duração em dias, desde a madeira quase saturada em água, até dois valores de teor de água final, em secador convencional e em secador por desumidificação.

Quadro IV - Tempos aproximados de secagem da madeira de eucalipto

	Secagem convencional			Secagem desumidificador		
Espessuras	27 mm	41 mm	54 mm	27 mm	41 mm	54 mm
80 a 30 %	12	30	38	16	27	42
80 a 12 %	30	50	70	37	54	80

7. Critérios de caracterização da qualidade após secagem

Os critérios mais importantes de avaliação da qualidade da madeira após terminada a operação de secagem resumem-se nos parâmetros e recomendações feitas no Quadro V.

Quadro V - Critérios de caracterização da qualidade e métodos de avaliação.

Parâmetros	Método de Controlo	Comentários / Tratamentos
Gradiente de teor de água	Ensaio do teor de água por camadas	Recuperável por condicionamento ou recondicionamento por vapor saturado
Colapso	Deformação irregular da superfície / retrações	Aparece em pranchas de corte radial. Recuperável em recondicionamento por vapor saturado
Fendas superficiais e fendas internas	Visíveis à superfície / ou corte transversal	Em pranchas de corte tangencial. Perto da medula. Não recuperável.
Tensões de secagem	Ensaio do garfo	Recuperável em recondicionamento por vapor saturado.
Nós	Observação visual	Muito poucos nós e geralmente de pequenas dimensões.
Descolorações / Manchas	Observação visual	Tratamentos como o vapor tornam a madeira mais escura à superfície. Manchas no contacto com metais ferrosos. Estas ocorrências são difíceis ou impossíveis de eliminar *a posteriori*.
Empenos	Observação e medição	Problema quase completamente solucionado colocando cargas sobre as pilhas de secagem e reduzindo o espaçamento das réguas de empilhamento para valores convenientes.

8. Transformação em seco / Fabricação

As operações de preparação das superfícies (aplainamento e calibração em espessura) devem ser efetuadas em máquinas robustas e em boas condições de manutenção e afinação, e possuindo potência suficiente para o corte. Por exemplo, a falta de potência é evidenciada quando a máquina reduz velocidade durante a operação de corte.

Os gumes das lâminas de corte têm de estar num estado de perfeita afiação. O valor do passo real de corte (profundidade entre duas passagens consecutivas), no aplainamento e no desengrosso, não deve ser superior a 1,5 mm, valor a partir do qual se começam a notar ondulações superficiais, marcas da passagem da ferramenta. Se a profundidade de corte for muito reduzida (menor do que 0,5 mm), também se torna difícil a operação, uma vez que, como esta madeira é muito densa e dura, a ferramenta tende a afastar-se da madeira à custa de flexão dos eixos da máquina, tornando a operação muito ineficaz. A afinação dos vários cortantes de uma mesma árvore de ferramenta tem de ser muito precisa para que todos cortem por igual, evitando o aumento do passo real de corte. As velocidades de avanço podem, nas melhores condições, situar-se entre 10 e 20 metros por minuto. Com velocidades elevadas da árvore porta ferros (5000 r.p.m.) e gumes cortantes bem afiados, o aparecimento de fio lascado ou arrepelado fica reduzido em intensidade, localizando-se, se aparecer, apenas em zonas de fio muito inclinado (fio revesso de ângulo muito elevado).

Por fim, os trabalhos finais de acabamento, quer mecânicos, quer de proteção da superfície, são fáceis de dominar. Conseguem-se superfícies extremamente finas, de alto valor estético e em várias tonalidades de cor por aplicação de soluções pigmentadas.

Devido à significativa instabilidade dimensional da madeira de eucalipto, sobretudo quando exposta a condições ambientes variáveis, torna-se necessário na conceção de peças finais completas, prever zonas de movimentação, para que qualquer inchamento ou retração não venham a prejudicar o desempenho do conjunto ou mesmo modificar a sua configuração geométrica, ou provocar a cedência de ligações e colagens. Como exemplo concreto desta advertência refere-se que sobre um painel formado por

elementos paralelos não pode ser colado ou fixada rigidamente nenhuma peça com as fibras na direção perpendicular. Há soluções técnicas que permitem ultrapassar este problema.

9. Colagem / reconstituição

A tecnologia da reconstituição por colagem permite obter peças numa gama alargada de comprimentos e larguras, com estabilidade melhorada, incluindo soluções tendentes a aliviar o peso do conjunto, mas mantendo a resistência, como sejam os perfis ocos.

A madeira de eucalipto cola-se eficazmente com diferentes tipos de colas, como a cola mais comum em fabrico de mobiliário, a cola PVA (poliacetato de vinilo, vulgarmente conhecida por cola branca).

Conhecendo-se o comportamento menos estável dimensionalmente, comparativamente com outras espécies, têm de se encontrar soluções tecnológicas que permitam superar esta limitação. Por exemplo, para fabrico de painéis maciços de grande largura, uma boa solução é a reconstituição por colagem, figura 31. Para prevenir empenos dos painéis, a orientação das camadas de crescimento das réguas que compõem o painel tem de ser escolhida de acordo com o indicado na figura, mostrando-se a solução a evitar (x) e outras duas soluções possíveis, uma melhor do que a outra (√ e √√).

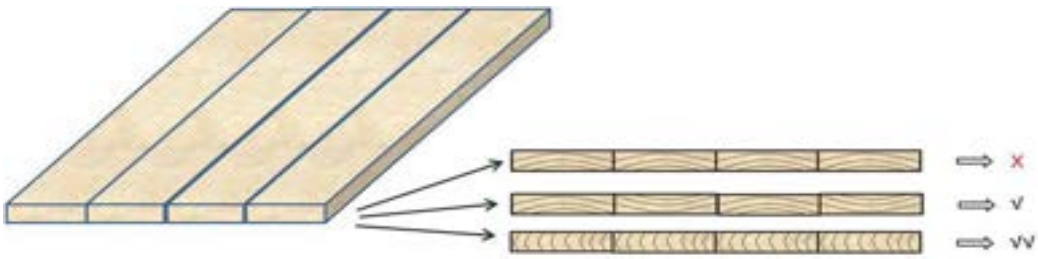


Figura 31 – Reconstituição por colagem de um painel maciço, com recomendação da melhor orientação dos anéis da madeira

Também representa uma boa solução tecnológica a reconstituição de perfis estruturais ou semi-estruturais de médias dimensões, através de colagens de réguas mais estreitas, figura 32. Esta solução tem essencialmente a vantagem de permitir recompor espessuras elevadas e uma estabilidade de forma de grande eficácia.

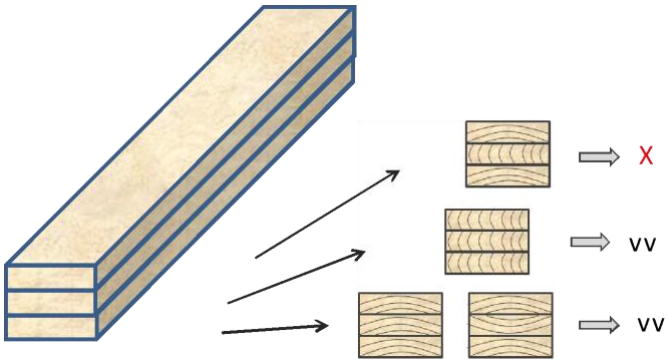


Figura 32 – Reconstituição por colagem de perfis longos e de elevada estabilidade de forma, com recomendação da melhor orientação dos anéis da madeira

Embora a colagem do eucalipto seja muito eficaz, por razões da sua elevada resistência mecânica e alguma suscetibilidade para movimentos de empeno, recomenda-se vivamente a utilização de auxiliares de ligação do tipo cavilhas longas de madeira (preferencialmente também de eucalipto). Este reforço da ligação apresenta ainda a vantagem de facilitar as operações de colagem dos componentes (alinhamento dos elementos). Tal como mostrado na figura 33, As cavilhas terão de ter um rasgo longitudinal para permitir o escoamento da cola em excesso, sob pena de funcionaram e como “embolo” e impedirem a entrada da cavilha até à sua profundidade de serviço, ou até de rachar a madeira.

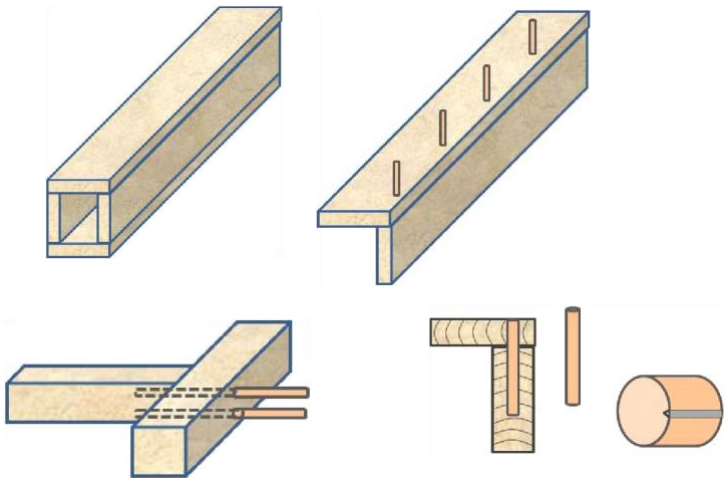


Figura 33 – Exemplos de ligações coladas com auxílio de cavilhas

Para finalizar esta breve análise das ligações coladas, refira-se que as ligações utilizando como auxiliar as cavilhas de madeira representam uma melhor solução do que a utilização de parafusos ou outros elementos metálicos, quer esteticamente quer no que diz respeito à resistência final, com a única limitação de representarem ligações não desmontáveis.

No final deste trabalho, na seção relativa aos produtos fabricados em madeira de eucalipto, mostram-se exemplos de peças de mobiliário e componentes para a construção, que foram fabricados seguindo as recomendações anteriormente referidas, e que após mais de 15 anos de utilização mantêm toda a sua integridade e estabilidade de forma.

10. Durabilidade natural da madeira de eucalipto

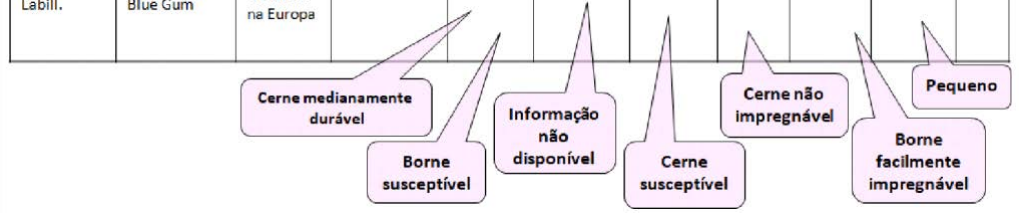
Um dos aspetos importantes quando se decide aplicar madeira, em particular na construção de edifícios, é ter informação sobre a expetativa da durabilidade a longo prazo. O conceito de durabilidade em madeiras baseia-se em avaliar o comportamento quanto à possível degradação ao longo do tempo por efeito de agentes biológicos como os fungos causadores da podridão, dos insetos, como os carunchos, que na fase larvar vivem dentro da madeira e perfuram galerias, ou ainda dos ataques por térmitas. As térmitas são insetos aparentados com as formigas (popularmente chamados de formiga branca). Alimentam-se da madeira, vivendo em colónias de grande número de indivíduos adultos, e perfurando a madeira pelo seu interior até criação de grandes espaços vazios que permanecem indetetáveis até fases muito avançadas da infestação, porque preservam intacta a superfície para se protegerem da luz e manterem o ambiente húmido no interior da colónia.

Cada um destes agentes de biodegradação da madeira tem as suas preferências, quer de espécies de madeira, quer de cerne ou borne, temperaturas e humidades, para além de formas diferentes de reprodução e disseminação.

Tendo em conta a complexidade do tema, foram feitos estudos exaustivos de avaliação das suscetibilidades de diferentes espécies cultivadas ou utilizadas na Europa, tendo dado origem à norma Europeia EN 350-2, que fornece importante informação sobre a durabilidade natural (sem interferência de tratamentos preventivos). Mostra-se no Quadro VI a informação relativa à durabilidade natural da madeira de eucalipto comum.

Quadro VI - Durabilidade natural e impregnabilidade do eucalipto comum
Norma Europeia EN 350-2 - Anexo A

Nome científico	Nome comum	Origem	Massa volúmica / 12% de teor de água (kg/m³)	Durabilidade natural			Impregnabilidade		Largura do borne	Obs.
				Fungos	*Anobium*	Térmitas	Cerne	Borne		
Eucalyptus globulus Labill.	P: Eucalipto O: Southern Blue Gum	Austrália Cultivado na Europa	700-750-800	3	N / D	S	3	1	p	



O ataque por fungos depende em grande medida da exposição da madeira a ambientes de elevada humidade ambiente que permitam que o teor de água da madeira se mantenha acima dos 20 %. A madeira seca não revela risco de desenvolvimento de fungos causadores da podridão.

A suscetibilidade aos ataques de térmitas é muito elevada quando a madeira se encontra enterrada, ou em contacto permanente com o solo ou terra húmida (exemplo vasos de plantas). As térmitas comuns requerem acesso a alguma humidade, mas, por vezes, mesmo madeiras afastadas do solo sofrem ataques de térmitas, porque estas vão à procura de fontes de humidade através de galerias escondidas com “lama”, ou deslocando-se pelo interior de paredes até fontes de humidade como o próprio solo, floreiras, algerozes, etc.

Segundo a norma Europeia anteriormente citada, o borne de quase todas as espécies é considerado suscetível aos fungos, insetos e térmitas, classificando na tabela apenas o comportamento do cerne.

Está referido na norma que o cerne do eucalipto é suscetível ao ataque de térmitas, mas ensaios realizados em Portugal, em condições reais de campos de estacas como mostrado na figura 34, revelaram resultados mais favoráveis. Pequenas barras de madeira de eucalipto de 50 cm de comprimento foram

parcialmente enterradas até uma profundidade de 15 a 20 cm e deixadas durante dois anos, num terreno macio e de elevada humidade.

Figura 34 – Campo de estacas para ensaio de degradação por ataque de térmitas

Ao fim do tempo de ensaio de quase dois anos as barras foram retiradas e observadas quanto ao seu estado de degradação, figura 35.

Figura 35 – Observação final das estacas de madeira de eucalipto após três anos enterradas no solo

Das observações da degradação da madeira de eucalipto enterrada no solo durante o período de dois anos registou um ataque muito superficial, sem presença de galerias profundas no interior da madeira. Sem nenhum ataque encontravam-se 25 % das estacas, tanto de cerne como de borne e com ataque ligeiro, entre 50 % a 75 % das estacas. Ataque moderado a severo não ocorreu em nenhuma das estacas de eucalipto. Como elemento de comprovação da presença de térmitas na zona de ensaio, estiveram no mesmo local e durante o mesmo período de tempo madeiras de outras espécies, constatando-se que as barras de pinho bravo se encontravam com grandes perfurações e galerias interiores, com presença de grande número de térmitas ainda vivas.

Por outro lado, e sendo o eucalipto globulus proveniente da Austrália onde existe e se utiliza em abundância, a norma australiana AS 5604:2005 "*Timber—Natural durability ratings*" que tem por objetivo fornecer classificações de durabilidade natural para diversas espécies de madeira, integra os resultados de ensaios realizados ao longo dos anos em diversas regiões desse país e revela igualmente resultados de durabilidade natural superior à prevista na norma EN350-2 para o eucalipto.

Quadro VII - Durabilidade natural do eucalipto comum
Norma Australiana AS 5604 - Anexo A

Quadro A1
Classificação da Durabilidade Natural

1	2	3	4		5
Nome comum / Nome científico	*Lyctus Susceptibilidade do borne*	*Térmitas Resistência do cerne (interior e acima do solo)*	*Durabilidade natural do cerne*		*Perfuradores marinhos Resistência do cerne)*
			Contacto com solo	*Exterior Acima do solo*	
Eucalipto comum Eucalyptus globulus labill.	*S*	*NR*	*3*	*2*	*4*

Segundo esta norma, a durabilidade natural do cerne do eucalipto em contacto enterrado no solo apresenta classe 3 (isto é, 5 a 15 anos) e, acima do solo e arejada, apresenta classe 2 (15 a 25 anos).

11. Propriedades mecânicas

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira é de primordial importância para a sua seleção e aplicação nos diversos domínios da engenharia. Este material é totalmente anisotrópico e suas propriedades dependem também das condições ambientais em serviço.

O conhecimento das propriedades mecânicas permite a caracterização do comportamento do material quando submetido a solicitações mecânicas. Para cada aplicação específica, interessa ter em conta a caraterística mecânica que melhor se aproxima das condições reais de aplicação desse componente, da sua finalidade e da intensidade de esforços a suportar. Sempre que possível, as propriedades mecânicas devem ser determinadas em condições iguais ou muito aproximadas às dos componentes reais.

11.1 - Módulo de elasticidade

Uma das propriedades, cujo conhecimento, correta definição e quantificação é de grande importância, quer para componentes estruturais na construção, quer em determinados tipos de mobiliário ou outras peças com exigência estrutural, é o módulo de elasticidade. Esta propriedade está associada ao comportamento elástico que os materiais apresentam ao deformar-se dentro de certos limites sob o efeito de uma carga exterior, e depois recuperar a sua forma ou dimensões iniciais quando esta carga é retirada.

Todos os materiais estruturais apresentam algum grau de elasticidade, mas no caso da madeira esta propriedade aparece como uma das mais importantes e decisivas para a maioria das aplicações, razão pela qual, para além de não pretendermos que um determinado componente entre em rotura, também não queremos que ele se deforme exageradamente, comprometendo a função ou simplesmente o seu aspeto estético. Por exemplo, na flexão de elemento estrutural da madeira, este começa a revelar uma forte deformação, antes ou muito antes da rotura. Obviamente que mesmo sem perigo de colapso estrutural, ninguém aceita uma peça curva que revele visualmente encontrar-se sob esforço. Paradoxalmente isto pode representar uma vantagem, pois poderá dizer-se que a madeira com a sua deformação, avisa que vai atingir o

ponto de resistência máxima muito antes de lá chegar, contribuindo assim para a segurança. A chamada rigidez carateriza a intensidade da força necessária para impor uma certa deformação elástica.

Teoricamente, o módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão, σ (sigma), e a deformação unitária correspondente, ε (epsilon), dentro do limite de proporcionalidade e é calculada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

A determinação experimental do módulo de elasticidade permite a avaliação do comportamento do material como método não destrutivo, podendo ser utilizado como método de previsão do comportamento do material ou como ferramenta de controlo de qualidade. Na realidade, existe uma estreita relação entre o módulo de elasticidade e as tensões de rotura à flexão, à tração paralela às fibras e à compressão paralela às fibras. Existem equipamentos industriais que fazem a classificação automática da resistência da madeira com base neste princípio teórico.

A madeira de eucalipto, tal como outras, apresenta um comportamento elástico quase perfeito até tensões muito elevadas desde que o tempo de carregamento seja curto. Para cargas aplicadas e mantidas durante alguns minutos ou horas, o comportamento será viscoelástico, ou seja, há um certo amortecimento (movimento lento), tanto na fase de aplicação da carga como na fase de recuperação sem carga aplicada.

Para períodos longos e permanentes de aplicação de cargas, (dias, semanas, meses ou anos), todas as madeiras apresentam um comportamento viscoelástico com um componente viscoplástico. Ou seja, a madeira vai mesmo adquirindo deformações permanentes. Estes comportamentos são estudados num ramo da mecânica dos materiais designado por fluência, que não será abordado neste manual.

O ensaio de flexão consiste, essencialmente, em colocar uma amostra com seção retangular entre dois suportes a uma certa distância e aplicar uma carga de flexão a meio vão, figura 36. Com esse ensaio podemos calcular a resistência à flexão e o módulo de elasticidade. Os valores mostrados na figura referem-se a ensaios com amostras de pequenas dimensões e sem defeitos. Para cálculo

estrutural em componentes de dimensão real, os números a utilizar são mais baixos, baseados em regulamentos específicos de engenharia e normas. Se quisermos apenas o módulo de elasticidade, não é necessário ir até à rotura, sendo o teste interrompido quando a aplicação de carga for cerca de 1/3 da carga máxima prevista (ainda dentro da zona elástica de deformação).

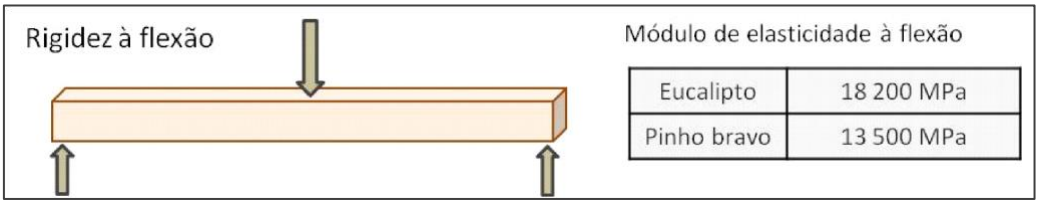


Figura 36 – Esquema do esforço e ensaio de flexão simples

11.2 - Resistência à tração e compressão

A madeira de eucalipto, tal como muitas outras espécies, é um material estrutural de muito interesse, porque alia uma grande resistência com um baixo peso próprio, concorrendo ainda hoje com materiais de alta tecnologia como as ligas de alumínio e até compósitos estruturais. Mas, com a madeira, tem de ser tomada em conta a grande anisotropia das suas propriedades mecânicas, ou seja, a grande diferença de comportamento conforme o tipo de esforço que se aplica e a direção da solicitação. As madeiras são materiais com estrutura orientada. As melhores propriedades estão presentes na direção das fibras, chamada direção axial ou paralela às fibras. Na direção transversal, as madeiras revelam grandes fragilidades, havendo ainda alguma diferença quanto aos esforços serem de tração ou de compressão. O eucalipto não é exceção a estes comportamentos.

Nas figuras 37 a 40 mostram-se os valores da resistência da madeira de eucalipto e pinho, resultado de ensaios realizados pelo autor na tese de doutoramento "*Estudo de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira*". De registar que os ensaios foram realizados em dezenas de amostras de pequenas dimensões e de madeira sem defeitos. Para cálculo

estrutural devem ser seguidos os valores referidos nas normas específicas para fins estruturais, como se refere mais adiante.

Nesta breve apresentação das propriedades mecânicas, faz-se a comparação das propriedades da madeira de eucalipto com as do pinho bravo por esta ser uma espécie bem conhecida, e que assim serve de referência para melhor compreensão das boas caraterísticas relativas da madeira de eucalipto.

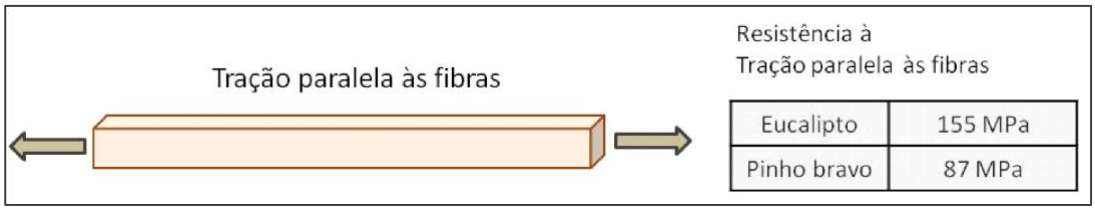


Figura 37 – Esquema do esforço e resistência à tração paralela às fibras

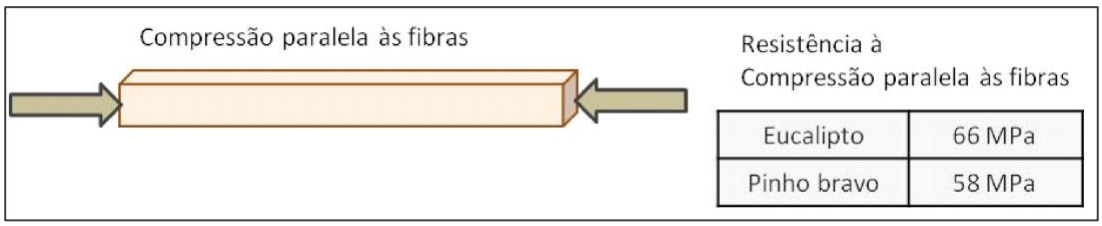


Figura 38 – Esquema do esforço e resistência à compressão paralela às fibras

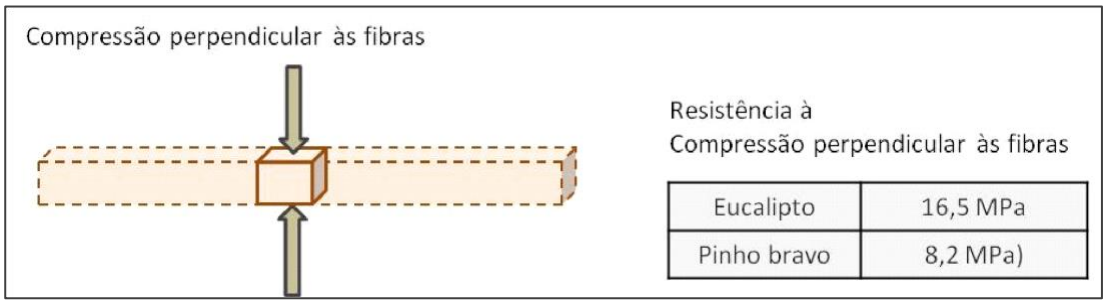
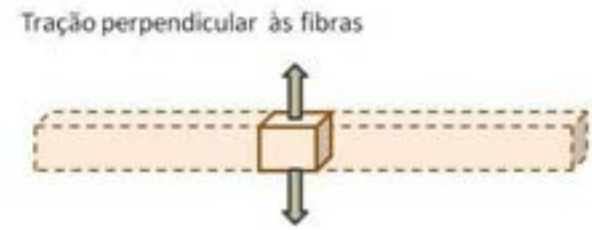


Figura 39 – Esquema do esforço e resistência à compressão perpendicular às fibras



Resistência à Tração perpendicular às fibras

Eucalipto	16,5 MPa
Pinho bravo	5,1 MPa

Figura 40 – Esquema do esforço e resistência à tração perpendicular às fibras

Para cálculo de estruturas, a madeira de eucalipto comum encontra-se referida com a classe de resistência D40, na norma Europeia *NP EN 1912:2013-pt - Madeira para estruturas; Classes de resistência; Atribuição de classes de qualidade e espécies*.

Na norma *NP EN 338:2016 - Madeira para estruturas; Classes de resistência*, encontram-se os valores caraterísticos das propriedades mecânicas, que correspondem aos valores de cálculo de engenharia tendo em conta a qualidade de madeira classificada visualmente ou mecanicamente e seguindo as tolerâncias que permitem garantir a segurança final dos elementos estruturais.

12. Produtos para os quais a madeira de eucalipto representa evidentes potencialidades

A madeira de eucalipto, depois de uma eficaz secagem, equilibragem do teor de água e tratamento de eliminação de tensões internas, torna-se um material fácil de trabalhar, quer à plaina quer ao torneamento, molduração e furação, produzindo superfícies com muito bom acabamento, desenho e cor agradáveis.

Os eucaliptos constituem uma das espécies que, sendo de rápido crescimento, produzem madeira muito dura e resistente mecanicamente. Daí ser adequada a um campo de aplicação muito específico como seja a utilização em superfícies expostas à agressividade mecânica (impactos, riscos e perfurações), e ainda como componente estrutural, tanto em carpintaria e construção como em mobiliário. Dentro das propriedades tecnológicas, salienta-se o muito bom comportamento à colagem e a fixação com elementos de ligação auxiliares, assim como a receber as pinturas e os vernizes de acabamento.

Com base nas razões apontadas anteriormente seguem-se algumas sugestões de produtos finais para os quais a madeira de eucalipto dá uma eficaz satisfação, mesmo em substituição de espécies consideradas nobres:

- elementos de carpintaria (guarnições de portas e janelas, não expostas ao exterior);
- portas de habitações e portas de armários;
- soalho e outros revestimentos de piso;
- madeira lamelada colada (conhecida por Glulam) para estruturas de maior dimensão e variedade de formas;
- painéis de madeira lamelada cruzada (conhecidos por CLT - *cross laminated timber*), em grandes dimensões, de elevada estabilidade e resistência;
- lambrins;
- prateleiras resistentes para suportar cargas elevadas;
- painéis colados para tampos de mesas e bancadas;
- certos tipos de assentos (bancos e cadeiras);
- pequenas peças resistentes.

Na figura 41 apresentam-se duas amostras representativas do aspeto estético da madeira de eucalipto comum, como sejam, a cor clara, veios pouco pronunciados (as camadas de crescimento são pouco distintas), a presença de nós pouco frequente.

Figura 41 – Dois exemplos de amostras de eucalipto comum correspondentes a madeira de boa qualidade

Uma das formas de valorizar a madeira de eucalipto para revestimentos de piso é produzir capas de eucalipto de 3 a 5 mm de espessura e depois colá-las sobre uma base de contraplacado da mesma ou de outra espécie, figura 42. Desta forma obtém-se um produto muito estável dimensionalmente e de boa qualidade e apreciado valor decorativo.

Figura 42 – Exemplo soalho macheado composto, com camada superficial de eucalipto.

Uma opção mais tradicional é o fabrico de réguas de soalho com encaixe macheado, figura 43. Desta forma compõe-se um revestimento de piso muito sólido e resistente, podendo, pela sua robustez, ser aplicado sobre uma base de vigas com afastamentos relativamente longos (40 cm ou mesmo mais). O encaixe não colado pode apresentar a vantagem de permitir o movimento da madeira por retração e inchamento, quando aplicada em ambientes com fortes variações de humidade ambiente.

Figura 43 – Exemplo de elemento de soalho tradicional em eucalipto com encaixe macheado

Na figura 44 mostra-se um exemplo de revestimento de piso em madeira de eucalipto, com duas tonalidades de cor, a cor natural mais clara e uma cor com pigmento artificial para um tom mais escuro.

Figura 44 – Dois exemplos de madeira de eucalipto aplicado num revestimento de piso de alta qualidade

Também é possível o fabrico e boa utilização da madeira de eucalipto em decks para utilização em exterior, exemplo na figura 45. Este tipo de montagem permite um livre movimento da madeira, um bom arejamento na superfície inferior e ainda o escoamento de águas. Desta forma prolonga-se o tempo de vida útil do revestimento de madeira, com pouco risco de degradação, mesmo quando aplicado em ambientes de risco moderado de degradação biológica.

Figura 45 – Exemplo de deck antiderrapante para uso exterior, em madeira de eucalipto com proteção de acabamento superficial com solução de óleo pigmentado

Na reabilitação de construções antigas é ainda muito comum a utilização de componentes de eucalipto, nomeadamente para montagem de paredes de tabique, e vigas de suporte de piso, figura 46. A experiência acumulada tem mostrado que esta solução apresenta tempos de vida útil muito longos, de muitas dezenas ou centenas de anos. Encontram-se numerosos exemplos desta utilização em construções dos centros históricos de algumas cidades (exemplo, Guimarães), sendo utilizadas as mesmas técnicas nas obras de reabilitação.

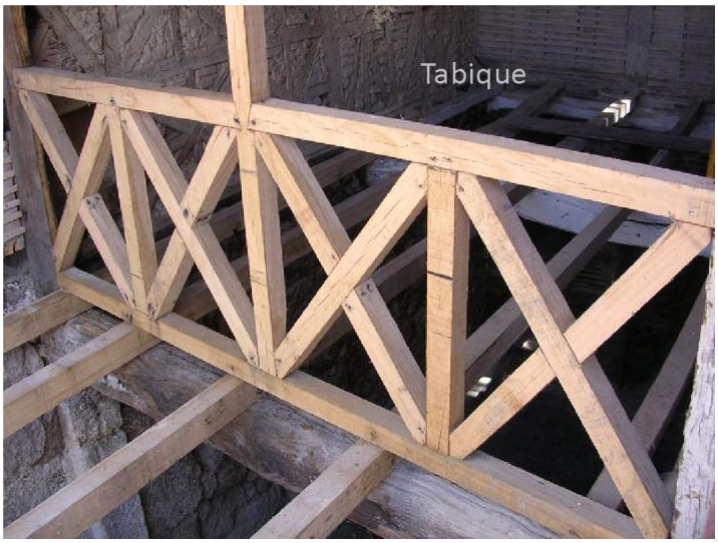


Figura 46 – Utilização de elementos estruturais em madeira de eucalipto na reabilitação de edifícios dos centros históricos de cidades portuguesas

Ensaios de utilização da madeira de eucalipto no fabrico de mobiliário revelaram uma enorme potencialidade. No exemplo da figura 47 mostra-se uma mesa/secretária com o tampo em painel colado de eucalipto maciço, que desempenhou funções durante mais de 15 anos sem qualquer ocorrência de defeitos (nem empenos nem descolagens). Como solução tecnológica é importante referir que, quer os componentes da base de apoio do tampo, quer as orlas na direção perpendicular às colagens (largura da mesa), têm um sistema deslizante que permite um ligeiro movimento de inchamento e retração do tampo.

Figura 47 – Mesa / secretária com tampo em eucalipto colado

Na figura 48 mostram-se dois protótipos de assentos, uma cadeira e um pequeno banco, construídos sem nenhum acessório metálico de ligação, apenas cola e cavilhas de madeira para ligar os elementos transversais.

Figura 48 – Dois exemplos de unidades de mobiliário em eucalipto só com elementos colados

A tecnologia de painel maciço colado permitiu, com bons resultados, a fabricação de almofadas de portas maciças, prateleiras resistentes para estantes de livros, figura 49, e ainda réguas de lambrim para forro de paredes e de tetos, figura 50.

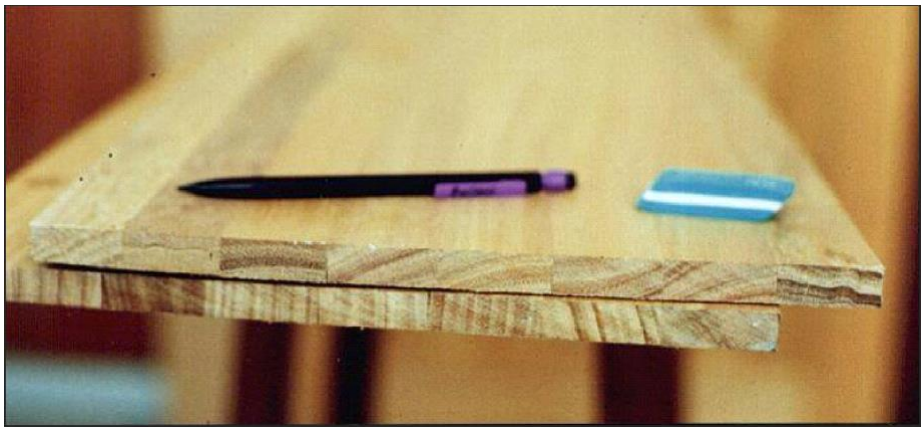


Figura 49 – Painel maciço colado em réguas finas, para prateleiras ou almofadas de portas

Figura 50 – Réguas de lambrim macheado, em componentes colados de três elementos

"GLULAM" – Madeira Lamelada Colada

A madeira lamelada colada, também conhecida como *Glulam* (do inglês *Glued Laminated Timber*), é um material estrutural fabricado através da colagem de lamelas ou réguas individuais de madeira, conforme descrito no capítulo 9, mas privilegiando a obtenção de comprimentos muito elevados, secções estruturais e ainda permitindo formas curvas, tendo como destino nobre componentes estruturais de grandes dimensões em construção.

As peças resultantes oferecem alta durabilidade e resistência à humidade, podendo vencer grandes vãos e apresentar formas variadas. Indicada para utilização em vigas, pilares, pérgulas, coberturas, escadas e em revestimentos diversos. Uma das grandes vantagens deste tipo de peça de madeira estrutural é a facilidade com que pode reproduzir formatos arqueados, em vigas ou pilares.

Figura 51 – Estruturas de coberturas em madeira de eucalipto lamelada colada (GLULAM)
Fonte: Universidade Politécnica de Madrid

A primeira e emblemática grande estrutura de madeira lamelada colada em Portugal foi a cobertura do Pavilhão Atlântico, em 1998, que certamente contribuiu para a divulgação das potencialidades deste tipo de solução que, desde então, tem sido amplamente utilizada, embora com recurso principalmente a importação e em espécies não produzidas em Portugal, figura 52.

Figura 52 – Estrutura de madeira lamelada colada (Glulam) do Pavilhão Atlântico
Fonte: Regino Cruz, aquitectos

Trabalhos de investigação recentes em Portugal e Espanha sugerem que a madeira lamelada colada de eucalipto alcança elevadas classes de resistência, acima dos valores típicos encontrados na literatura para as madeiras folhosas mais comuns na floresta europeia, sendo prematuro pensar, por enquanto, na aplicação em grandes estruturas.

CLT – Madeira Lamelada Cruzada

Tal como o Glulam, a madeira lamelada cruzada, também conhecida como CLT (do inglês *Cross Laminated Timber*) ou X-LAM, é um material estrutural, fabricado através da colagem de lamelas ou réguas individuais de madeira, só que dispostas em camadas cruzadas, tipicamente em número ímpar, e coladas sob pressão para formar um único elemento, com capacidades de carga

excecionais em todas as direções. Devido à orientação transversal de cada uma das suas camadas longitudinal e transversal, os graus de retração e inchamento da madeira ao nível dos painéis são minimizados, enquanto a carga estática e a estabilidade da forma são consideravelmente melhoradas, figura 53.

Figura 53 – Painéis de CLT
Fonte: U.S. Departamento of Agriculture

A principal diferença entre madeira lamelada colada (Glulam) e o CLT é que, com o CLT, a união de tábuas em camadas perpendiculares entre si permite a fabricação de placas de grandes dimensões (comprimentos até 16 metros e larguras até 3 ou 4 metros), com elevada estabilidade e resistência, indicadas para construção estrutural em madeira, permitindo mesmo formar paredes, figura 54.

Figura 54 – Construção com CLT
Fonte: Jular Madeiras

A CLT apresenta resistência estrutural equivalente ou superior à do betão armado (tendo em conta um muito menor peso e menor espessura), mas com alto grau de elasticidade. Apresenta vantagens comparativas com outros materiais:

- Grande liberdade de desenho;
- Sistema pré-fabricado que proporciona uma montagem rápida, simples e eficaz;
- Grande estabilidade;
- Excelente desempenho ao nível do isolamento térmico e acústico;
- Material ecológico, fabricado com madeira proveniente de florestas de gestão sustentada;
- Aplicável a qualquer tipo de construção: moradias, escolas, escritórios, hotéis, naves industriais, coberturas, etc.

Embora não seja ainda corrente no mercado a produção de Glulam ou CLT em eucalipto, considerando a necessidade hoje universalmente aceite de substituir matérias-primas importadas por espécies locais, tem sido estudada a capacidade de colagem de elementos de eucalipto para a produção de madeira lamelada colada (GLULAM) e madeira laminada transversalmente (CLT), tendo sido demonstrado que o eucalipto tem potencial para ser colado e, por conseguinte, a produção de Glulam e/ou CLT em Portugal, utilizando esta espécie de madeira local subvalorizada é potencialmente de elevado interesse industrial.

13. Considerações finais / conclusões

O eucalipto comum pode ser uma solução presente e a curto/médio prazo para complemento ao abastecimento a alguns setores da indústria portuguesa, revelando potencialidades para contribuir para uma significativa diminuição e substituição, quer da madeira de pinho, quer de importações de madeiras tropicais.

As disponibilidades imediatas de madeira de eucalipto comum, para transformação como madeira maciça, são limitadas em quantidade, pois as dimensões em diâmetro necessárias encontram-se presentemente em florestas mistas de pinho e eucalipto, onde os períodos de rotação ficaram condicionados pelo mais lento crescimento dos pinheiros. As rotações curtas nas florestas de eucalipto para transformação por trituração não permitem atingir as dimensões e qualidade necessárias para madeira de serração, mas há todo o interesse em se encontrarem modelos em que seja possível compatibilizar a produção intensiva para produção de pasta de papel e fibras, com a produção de qualidade para madeira maciça.

Embora completamente fora do âmbito e competência deste trabalho, pode deixar-se como sugestão que, em zonas de boa produção e crescimento, se deixem pequenas parcelas com os melhores exemplares, durante duas ou três rotações da madeira para trituração, o que pouco ou nada afetaria a disponibilidade de matéria-prima para estas indústrias, podendo depois ser recuperado o investimento na mais-valia da comercialização de madeira de qualidade no fim do seu ciclo (cerca de 35 anos).

Longe de defender ou monopolizar a floresta para a indesejável e desvantajosa monocultura do eucalipto, mas sentindo a premente necessidade de matérias-primas por parte da indústria em resultado do progressivo esgotamento de fontes tradicionais de abastecimento, há cada vez maior necessidade de recorrer a uma floresta do tipo industrial, na qual têm papel preponderante as espécies de rápido crescimento.

Como foi descrito ao longo deste trabalho, algumas das limitações e dificuldades da transformação da madeira de eucalipto podem ser superadas por melhoramento tecnológico e conhecimento científico. A madeira de

eucalipto comum cultivada em Portugal tem potencial para muitas utilizações na construção civil e até em nichos específicos da indústria do mobiliário.

Ressalva-se ainda que a tecnologia instalada em Portugal para a primeira transformação de madeira, incluindo secagem, pode ser convertida para a transformação de eucalipto sem necessidade de investimentos avultados.

Na construção, as utilizações mais interessantes são os revestimentos de piso, tanto interiores como exteriores, revestimentos de teto e paredes (lambris e forro), em guarnições de portas, componentes para cobertura de edifícios (de preferência com elementos colados), na reabilitação tradicional, em estruturas decorativas em exterior de médias dimensões (pérgulas), etc.

No mobiliário, embora com o inconveniente de elevado peso, é possível e interessante o fabrico de assentos e cadeiras de interior e exterior, componentes estruturais como prateleiras, tampos de bancadas e mesas, etc., vantajosos no aspeto da elevada robustez e dureza superficial.

Em resumo, para se conseguir madeira de eucalipto com potencial para a fabricação e utilização em produtos de superior qualidade é necessário seguir várias fases de todo um processo, como sejam:

a) Escolha de árvores mais bem conformadas, sem curvaturas, sem fio espiralado visível do exterior, troncos cilíndricos regulares, camadas de crescimento concêntricas, e sem ramos na zona de aproveitamento;
b) Toragem, proteção dos topos, e transformação por serragem num período de tempo curto após o abate (máximo no verão, duas a três semanas);
c) Serragem seguindo os padrões de corte mais recomendáveis para obter pranchas ou perfis de corte radial;
d) Empilhamento de forma correta para secagem, como sejam, bom alinhamento das réguas de separação, condicionamento das pilhas com pesos ou cintas elásticas, cobertura superior e evitar colocação em zonas muito expostas ao vento e calor;
e) Secagem cuidada e lenta, podendo fazer-se uma fase inicial de secagem ao ar, ou ir diretamente para secador artificial/convencional (ar quente condicionado);

f) Durante e após secagem, controlo das tensões internas, gradientes de humidade e defeitos de secagem, com eventual necessidade de recondicionamento e estabilização;
g) Fabricação com equipamentos robustos e ferramentas de corte em boas condições de afiação;
h) Seguir as melhores regras de projeto dos produtos a fabricar (exemplo, em zonas e produtos específicos deixar zonas de dilatação e micro-movimentação da madeira);
i) Finalmente, os produtos fabricados devem ser armazenados e transportados em condições ambientais apropriadas, para evitar ganhos de humidade que se afastem das condições previstas de utilização.

Estas regras são basicamente as mesmas para todas as espécies de madeiras, mas sendo a madeira de eucalipto mais nervosa, dura e resistente do que algumas madeiras tropicais de elevada qualidade e estabilidade, todas as regras devem ser seguidas com maior atenção e rigor.

14. Bibliografia

Carvalho, Albino. 1997. "Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatómica, Propriedades Utilizações". Volume II. Direção Geral das Florestas.

AITIM, CTBA, CIRAD-Forêt, INIA, LNETI, UNIMOR, UPM-ETSIM, (1994). "Study of Eucalyptus Processing For Its Utilization as Solid Wood – Final Technical Report", Forest Program. Madrid.

Hillis, W. E.; Brown, A. G. 1988. "Eucalypts for wood production", CSIRO Australia, Academic Press.

EN 350-2: 2016 + A1 Durability of wood and wood-based products; Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials

AS 5604:2005 "Timber—Natural durability ratings",

NP EN 338:2016 - Madeira para estruturas; Classes de resistência

EN 408: 2010 + A1: 2012. "Estruturas de madeira - Madeira estrutural e madeira laminada colada - Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas".

Santos, J.A. and Pinho, A.C.M. 2004. "New advances for the application of eucalyputs as a structural wood". Silva Lusitana 12(1): 43-50

Santos, J.A. 2015. "A riqueza das madeiras portuguesas. Propriedades e fichas técnicas". AIMMP – Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal. 170p.

Santos, J.A. 2007. "Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira". Tese de doutoramento. Universidade do Minho.

Santos, J. A. 1998. "Módulo de Elasticidade em Flexão Estática", INETI. Lisboa. 13p.

https://www.e-globulus.pt/biblioteca-online/dossiers/silvicultura-eucalipto-portugal

Lara-Bocanegraa, A.J.; Majano-Majano, A.; Arriaga, F.; Guaita, F. 2020. "Eucalyptus globulus finger jointed solid timber and glued laminated timber with

superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells", Construction and Building Materials, Vol. 265, 120355.

Martins, C., Dias, A.M.P.G. & Cruz, H. 2020. "Blue gum: assessment of its potential for glued laminated timber beams". European Journal of Wood Products, 78, 905–913

Suleimana, A.; Sena, C.S.; Branco, J.M.; Camões, A. Ability to Glue Portuguese Eucalyptus Elements. Buildings 2020, 10, 133. https://doi.org/10.3390/buildings10070133

Cofinanciado: