



Extraído de:

PinusLetter nº 49 - Janeiro de 2017

Autoria: **Celso Foelkel**

Uma realização:



Organizações facilitadoras:



ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel



IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores



IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais

Empresas e organizações patrocinadoras:



Fibria



ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel



ArborGen Tecnologia Florestal



CENIBRA – Celulose Nipo Brasileira



CMPC Celulose Riograndense



IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores



Klabin



Lwarcel Celulose



Solenis



Stora Enso Brasil



Suzano Papel e Celulose



Artigo Técnico por Celso Foelkel



A Água e a Madeira do *Pinus*

Madeira e água são “substâncias naturais” altamente relacionadas, pois praticamente sempre estão juntas na Natureza, principalmente devido à intimidade higroscópica entre a água e diversos dos constituintes químicos da madeira e ainda em relação à capilaridade dos elementos anatômicos da mesma madeira, que favorecem a retenção e movimentação da água nessas madeiras.

Qualquer madeira em estado natural, e mesmo após seu processamento, sempre contém ou conterá água em sua estrutura e composição. Isso porque a madeira interage com a água ambiental, tanto a que esteja na forma líquida ou gasosa (umidade natural do ar). Uma peça de madeira pode absorver água quando nela mergulhada, ou atingir uma umidade de equilíbrio, quando colocada em um ambiente com certo nível de umidade relativa no ar. Mesmo que a madeira seja secada completa e drasticamente em estufa até a suposta completa isenção de água, quando ela é colocada em um ambiente com certo nível de umidade relativa, ela tenderá a capturar água do ar até atingir o que se chama de umidade de equilíbrio da madeira em relação a esse ar em questão.

Qualquer peça de madeira sempre traz consigo certa quantidade de água em sua constituição, sendo que essa água pode ser medida e relatada como teor de umidade da madeira.

Existem milhares ou centenas de milhares de estudos científicos e tecnológicos sobre a temática “Água na Madeira”, que varia desde os relacionados aos aspectos anatômicos e químicos de uma madeira com a sua umidade, bem como trabalhos técnicos sobre a “Secagem da Madeira” para remoção do excesso de água presente

na mesma para alavancar ganhos no desempenho e para a redução do peso tal qual das peças (toras, tábuas, etc.).

O teor de umidade de qualquer madeira vai variar em relação a uma enorme série de fatores, tais como:

- Espécie vegetal;
- Idade da árvore;
- Posição no tronco;
- Tipo de tecido (xilema, casca, raízes, tipos de lenhos, etc.);
- Densidade básica;
- Tempo de secagem após colheita ou após preparação da peça de madeira serrada, por exemplo;
- Grau de secagem aplicado sobre a madeira;
- Estabilização da umidade em função do equilíbrio da madeira em suas trocas de umidade com o ambiente onde está colocada a peça.

A umidade da madeira afeta um grande número de propriedades da mesma. Um excesso de umidade é indesejável para inúmeros usos estruturais e mercadológicos das madeiras, enquanto um excesso de secagem também pode ser inadequado para outros usos, por ser causa de alguns defeitos causados nas peças. Portanto, conforme as utilizações da madeira como matéria-prima ou como produto acabado, vamos ter níveis ou faixas mais indicados de teor de umidade nas mesmas.

Quando uma árvore é abatida, a madeira está bastante úmida, próxima ao ponto de máxima saturação em água em seu interior. Isso acontece porque a árvore coloca água na forma de seivas dentro de sua porosidade natural, como forma de manter sua estabilidade dimensional e de garantir sua sobrevivência em relação às variações ambientais.

Após a colheita das árvores e conversão do tronco em toras ou tábuas, a água vai saindo naturalmente da madeira, em um processo de secagem natural. Essa secagem pode ser acelerada por processos artificiais, em estufas, onde a remoção de água é feita pela adição de calor e movimentação de ar.

A redução do teor de umidade da madeira causa uma série de benefícios ao desempenho da mesma, tais como:

- Aumento da resistência mecânica;
- Melhoria na resistência à degradação microbológica (ataques de fungos e bactérias), que em geral vêm associadas à perda de resistências físico-mecânicas e à piora na estética das peças de madeira (manchas coloridas de bolor, etc.);
- Melhoria no isolamento térmico, elétrico e na absorção acústica das peças de madeira;
- Prolongamento da vida útil;
- Melhoria na trabalhabilidade, sendo que cada tipo de produto ou de operação vai demandar níveis mais apropriados de umidade;
- Redução substancial do peso das peças com a retirada da água quer seja na secagem natural ou artificial;
- Etc.

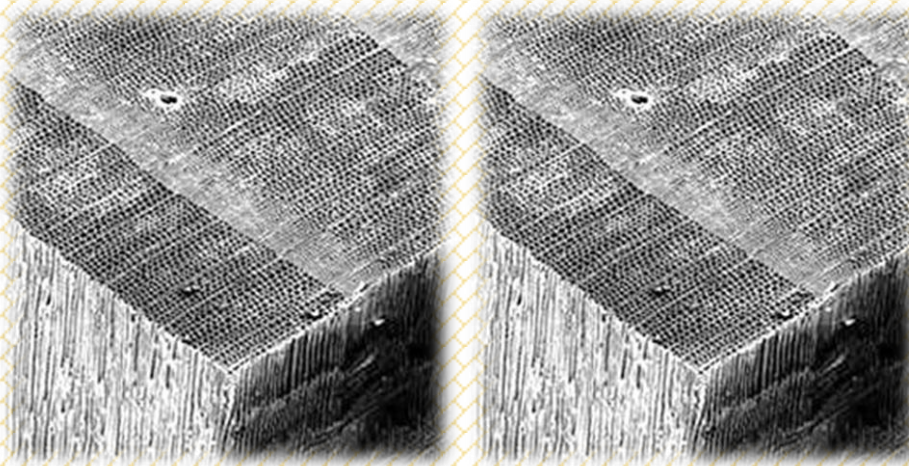
Entretanto, paralelamente às vantagens agregadas, temos também desvantagens que precisam ser conhecidas para otimização dos processos de uso da madeira:

- Contração volumétrica irregular;
- Instabilidade dimensional, gerando defeitos nas peças conforme aumenta o grau de secagem, tais como: empenamento, deformações, rachaduras, fissuras, etc.;

- Inflamabilidade;
- Ataques de térmitas e brocas que atuam sobre madeiras secas;
- Etc.

A maior parte das desvantagens é oriunda do fato de que as madeiras são heterogêneas em sua estrutura anatômica e em sua composição química. As diferenças de posicionamento e de tipos de células na formação da estrutura do tronco (e do xilema ou madeira) e as diferenças da constituição química e física dessas células acabam aumentando as variabilidades estruturais e de desempenhos das madeiras. Por essas razões, qualquer pessoa que trabalha com madeira precisa ter bons conhecimentos sobre anatomia, física, química e variabilidade da qualidade da madeira. Isso para conseguir obter melhores resultados ao longo de seu processamento e produção de bens comerciais e mesmo no uso artesanal.

A Madeira do *Pinus* e a Água



As madeiras de *Pinus* possuem uma grande variação em seus teores de umidade conforme sofrem o processo de secagem. Isso acontece porque o teor de umidade da madeira verde na árvore recém-abatida é bastante alto. Existem diversas razões para explicar esse fato, já que as madeiras do *Pinus* possuem:

- Baixos valores de densidade básica;
- Baixa proporção de paredes celulares por unidade de volume de madeira;
- Alta porosidade natural, que assim fornece espaços dentro da madeira para serem ocupados por água;
- Presença de altas proporções de madeira juvenil de baixa densidade básica em função do rápido crescimento das florestas plantadas e do manejo florestal intensivo;
- Formação de cerne maduro em idades tardias, em geral acima das idades de colheita praticadas no Brasil. No momento da colheita, as árvores ainda estão em processo de cernificação, portanto, longe de terem atingido sua maturidade fisiológica.

Quando a madeira do *Pinus* seca e entra em equilíbrio com o meio ambiente, ela costuma ser leve, é relativamente estável em suas dimensões e aceita bem os processos de conversão, com adequados níveis de trabalhabilidade. Em função da estrutura anatômica mais simples do que as madeiras de folhosas, as madeiras de coníferas (*Pinus* e *Araucaria*, dentre outras) são relativamente mais estáveis e mostram desempenhos mais previsíveis.

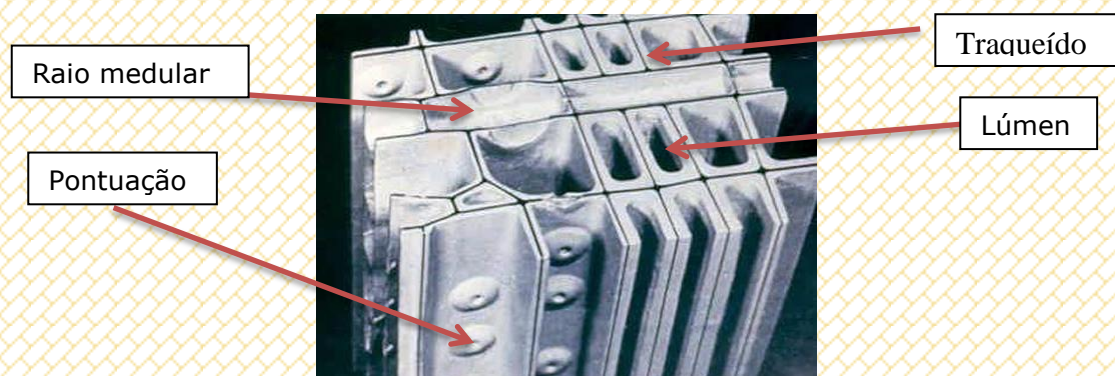
Após a secagem, a madeira do *Pinus* tem relativa dificuldade em ser reidratada, tanto devido ao fenômeno da histerese, que veremos mais adiante, como também pela presença de materiais hidrofóbicos (resinas, ceras, ácidos graxos e lignina).

As madeiras de *Pinus* são constituídas por milhões de elementos celulares que são resultantes da divisão celular do câmbio ou meristema secundário formador de xilema e de casca no tronco. O câmbio é um tecido meristemático localizado entre o xilema (madeira) e o floema (casca). De sua divisão são formadas novas células de madeira e casca, o que promove o crescimento do tronco em diâmetro.



Câmbio

Cada célula formada tem sua cavidade celular (lúmen), suas paredes (com diversas camadas e constituintes químicos) e sua composição anatômica e química característica. Muitas células possuem vacúolos ricos em extrativos. Outros elementos presentes nas madeiras resinosas do *Pinus* são os canais de resina, que conduzem uma substância complexa e rica em ceras, ácidos graxos, fenóis, terpenos, etc.



Existem diferentes tipos de células nas madeiras do *Pinus* e da *Araucaria*, porém os predominantes são os traqueídeos. Esses elementos dão resistência à árvore e também são elementos condutores de seiva bruta ou mineral. Os traqueídeos se dispõem como tubos alongados colocados no sentido do eixo do tronco da árvore. Existem outras células com menores dimensões e com paredes delgadas que são as

células dos parênquimas axial e radial (raios medulares). O parênquima axial se dispõe no sentido longitudinal do tronco e os raios medulares possuem disposição radial (ou no sentido do diâmetro ou do raio do tronco). Todas essas células se intercomunicam uma com as outras próximas através de pequenas perfurações em suas paredes, que são as pontuações ou pontoações.

A estrutura anatômica da madeira é a principal responsável pela porosidade das mesmas, sendo que os poros da madeira são os espaços vazios de lúmens, pontuações e espaços intercelulares e fissuras nas paredes.

Existem diversos tipos de tecidos ou tipos de madeira formados pelas árvores de *Pinus* e que se caracterizam por mostrarem propriedades distintas:

- Lenho inicial, formado em épocas de crescimento rápido (primavera e verão);
- Lenho tardio, formado em épocas de crescimento lento (outono ou inverno, ou estação seca);
- Madeira juvenil, com altas proporções de lenho inicial de baixa densidade básica;
- Cerne, formado pela deposição de extrativos e compactação das células do xilema mais interior do tronco e próximo à medula;
- Madeira de compressão, que é um defeito causado por tensões e estresses, em geral gravitacionais, sobre a formação dos elementos celulares.

Cada um desses tipos de tecidos pode mostrar porosidade maior ou menor, e essa porosidade se relaciona com a densidade básica dessas madeiras. As madeiras de lenho tardio costumam apresentar maiores densidades básicas e menores porosidades. Os cernes mais maduros de árvores mais velhas possuem densidades elevadas, mas os cernes juvenis são porosos e de baixas densidades básicas.

Em resumo, cada um desses tipos de madeira que estão regularmente presentes nos troncos das árvores do *Pinus* e da *Araucaria* pode ter a capacidade de conter mais ou menos água em seu interior.

Conforme a água vai saindo da madeira por secagem, em função dessa viabilidade interna, ocorrem forças de estresses que causam os conhecidos defeitos de secagem da madeira (empenamentos, rachaduras, etc.).

Por tudo isso que vimos, a ciência que estuda a Água na Madeira tem suas fundações na anatomia da madeira e em sua composição química. Por exemplo, diversas das características anatômicas e estruturais da madeira afetam tanto a sua capacidade de reter como de perder água.

São elas:

- Frequência ou proporção de traqueídeos em relação às células de parênquima;
- Diâmetro dos traqueídeos;
- Altura dos raios medulares (número de células empilhadas em sua altura);
- Espessura das paredes celulares (fração parede);
- Frequência e diâmetro das pontuações;
- Relação entre lenho inicial/lenho tardio;
- Densidade básica de cada tipo de madeira presente na estrutura.

A composição química também tem seu relevante papel na ciência que estuda a Água na Madeira. Isso porque a lignina, que costuma estar presente em cerca de 30% do peso seco da madeira do *Pinus* mostra maior grau de hidrofobicidade do que os carboidratos (celulose e hemiceluloses), que são mais hidrofílicos. Já os

extrativos orgânicos e resinosos, que podem atingir 4 a 8% do peso seco da madeira costumam ser bastante hidrofóbicos. Os extrativos afetam tanto a capacidade de absorver como de reter água. Ao ocuparem espaços na estrutura da madeira, os extrativos diminuem a porosidade para ser ocupada por água. Além disso, ao serem hidrófobos, eles dificultam a adsorção de água por sua repelência natural à água. Logo, os extrativos e as resinas das madeiras de *Pinus* são participantes efetivos nos processos de penetração e de movimentação da água nas mesmas.



Teor de Umidade na Madeira

O teor de umidade é uma das mais importantes propriedades da madeira e de outros tipos de biomassa, seja para fins energéticos diretos ou de consumo industrial para fabricação de móveis, tábuas, painéis de madeira, carvão vegetal, etc. Isso é principalmente válido para a madeira e para outros tipos de biomassas florestais, como casca e resíduos industriais ou da colheita florestal. Dentre as utilizações da madeira, a de uso direto como biomassa energética é a que mais exige que o teor de umidade seja muito bem controlado, pois a água presente na biomassa energética interfere não apenas no peso tal qual do material, mas também na quantidade útil de energia que pode ser disponibilizada pela combustão direta do material biomássico.

Existem diversos procedimentos e metodologias para realizar o ensaio de teor de umidade, sendo que a principal diferença na expressão dos resultados diz respeito à base referencial para os cálculos. Pode-se determinar o teor de umidade com base no peso úmido inicial do material, ou com base no peso seco do mesmo material após ter sido extraída toda a água por secagem em estufa. Ambos os métodos são válidos e se relacionam um com o outro, bastando alguns ajustes nos cálculos matemáticos.

Alguns setores usuários de madeira preferem referenciar a umidade com base no peso úmido inicial tal qual da amostra: é o caso do setor de celulose e papel. Outros setores, mesmo dentro da base florestal, dão preferência ao cálculo com base no peso seco do material sendo analisado, ou base peso anidro. São exemplos disso: setor de desdobro da madeira em serrarias e setor de chapas e painéis de madeira.

Em função dessas diferenças no modo de se calcular e expressar o teor de umidade há que se tomarem enormes cuidados e se colocar grande atenção ao se deparar com resultados de teor de umidade em artigos, teses, especificações de materiais e

em outros tipos de literaturas. Há que se ficar muito claro sobre qual tipo de base os resultados estão sendo apresentados.

A umidade da madeira (ou o seu teor) costuma ser apresentada em condições práticas através de duas formas de cálculo:

$$\text{Teor de umidade base peso seco (\%)} = \{(P_{\text{água}}) : (P_{\text{a.s.}})\} \cdot 100$$

ou

$$\text{Teor de umidade base peso úmido tal qual (\%)} =$$

$$\{(P_{\text{água}}) : (P_{\text{úmido.tal.qual}})\} \cdot 100$$

Pa.s. = Peso absolutamente seco, devido secagem em estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ até peso constante

O teor de umidade com base no peso absolutamente seco é bastante utilizado pelas indústrias de madeira processada mecanicamente (produtos serrados, produtos de alto valor agregado, painéis e chapas de madeira, etc.). Já a indústria de celulose e papel prefere trabalhar mais nos conceitos de consistência e de teor de umidade base peso úmido tal qual.

$$\text{Consistência (\%)} = \{(P_{\text{a.s.}}) : (P_{\text{úmido.tal.qual}})\} \cdot 100$$

Obviamente, existe uma relação entre os dois tipos de umidade, que são conceitualmente muito próximos e se valendo de dados complementares para os seus cálculos. Uma relação matemática pode ser encontrada através da manipulação organizada das duas fórmulas de cálculo desses dois tipos de umidade.

$$\text{Ub.s.} = \text{Umidade base peso seco (valor unitário)} = \{(P_{\text{água}}) : (P_{\text{a.s.}})\}$$

$$\text{Ub.u.} = \text{Umidade base peso úmido (valor unitário)} = \{(P_{\text{água}}) : (P_{\text{úmido}})\}$$

Entretanto:

$$(P_{\text{a.s.}}) = (P_{\text{úmido}}) - (P_{\text{água}})$$

Ou então:

$$\text{Ub.s.} = \{(P_{\text{água}}) : [(P_{\text{úmido}}) - (P_{\text{água}})]\}$$

$$\text{Ub.s.} = \{1 : [(P_{\text{úmido}}):(P_{\text{água}}) - (P_{\text{água}}) : (P_{\text{água}})]\}$$

$$\text{Ub.s.} = \{1 : [(1/(Ub.u.) - 1)]\}$$

$$\text{Ub.s.} = \{(Ub.u.) : [(1 - (Ub.u.))]\}$$

Vamos agora verificar como aplicar essa descoberta de forma prática. Para isso, seja uma amostra de madeira de *Pinus* que tenha um peso absolutamente seco de 70 gramas e um peso de água nela contida de 30 gramas.

$$Ub.s. = \text{Umidade base peso seco (valor unitário)} = \{(P_{\text{água}}) : (P_{a.s.})\}$$

$$Ub.s. = \text{Umidade base peso seco (valor unitário)} = \{(30) : (70)\}$$

$$Ub.s. = \text{Umidade base peso seco (valor unitário)} = 0,4286$$

$$Ub.s. = \text{Umidade base peso seco (\%)} = 42,86 \%$$

E ainda:

$$Ub.u. = \text{Umidade base peso úmido (valor unitário)} = \{(30) : (100)\}$$

$$Ub.u. = \text{Umidade base peso úmido (valor unitário)} = 0,30$$

$$Ub.u. = \text{Umidade base peso úmido (\%)} = 30\%$$

Aplicando a fórmula desenvolvida para relacionar as duas maneiras de expressar umidade (em base valores unitários):

$$Ub.s. = \{(Ub.u.) : [(1 - (Ub.u.))]\}$$

$$Ub.s. = \{(0,30) : [(1 - 0,30)]\}$$

$$Ub.s. = \{(0,30) : (0,70)\} = 0,4286 \cong 42,86\%$$

Alternativamente, pode-se também se criar uma fórmula simples para expressar a umidade base peso úmido tal qual em função da umidade base peso seco da madeira:

$$Ub.s. = \{(Ub.u.) : [(1 - (Ub.u.))]\}$$

$$(Ub.s.) \cdot [(1 - (Ub.u.))] = (Ub.u.)$$

$$(Ub.s.) - [(Ub.s.) \cdot (Ub.u.)] = (Ub.u.)$$

$$(Ub.u.) \cdot [1 + (Ub.s.)] = (Ub.s.)$$

$$(Ub.u.) = (Ub.s.) : [1 + (Ub.s.)]$$

No caso do exemplo anterior onde se tinha uma peça de madeira com teor de umidade base seca de 0,4286, ficaríamos com os seguintes cálculos para se encontrar sua umidade base peso úmido:

$$(Ub.u.) = (0,4286) : [1 + (0,4286)] = 0,30 \cong 30\%$$

O máximo teor de umidade seria a situação onde toda a porosidade da madeira estaria preenchida por água. Essa condição de máxima saturação não é uma situação vivenciada pelas árvores em sua vida diária. Apesar de bastante úmidas, as madeiras das árvores vivas não estão no máximo teor de umidade. Sempre existe algum vazio ocupado por ar, oxigênio, nitrogênio, gás carbônico ou outros gases que estejam presentes no corpo da árvore. Afinal, as árvores buscam o ar para sua fotossíntese e geram gás carbônico na respiração metabólica, como também oxigênio pela fotossíntese. Elas ainda consomem oxigênio no metabolismo das células vivas para queima metabólica de suas reservas, pela respiração.

Para finalidades de melhor entendimento e compreensão dessas relações, decidi criar uma tabela, relacionando pesos secos, úmidos e teores de umidade nas duas bases previamente debatidas. Essas relações são válidas tanto para as madeiras de *Pinus*, como outras quaisquer.

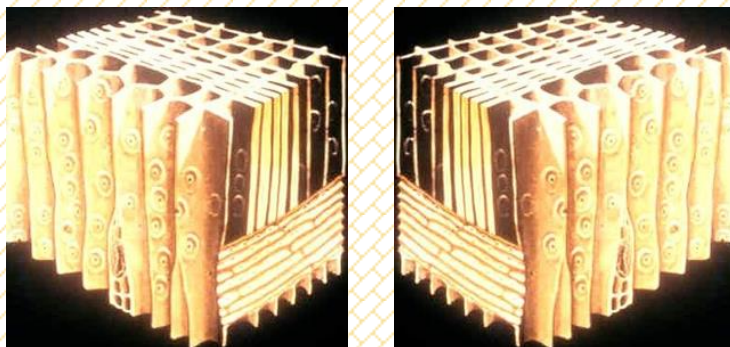
Peso absolutamente seco de madeira	Peso água contida na madeira	Umidade base seca (%)	Umidade base úmida (%)
100	200	200	66,7
100	150	150	60
100	100	100	50
100	75	75	42,9
100	60	60	37,5
100	50	50	33,3
100	42,86	42,86	30
100	40	40	28,6
100	30	30	23,1
100	20	20	16,7
100	15	15	13

Porosidade da Madeira de *Pinus*

A porosidade natural da madeira do *Pinus* é constituída pela capilaridade dos lúmens de suas células (traqueídeos, células parenquimatosas, canais de resina). Além desses macrocapilares que são os lúmens, existem os microcapilares nas paredes, tais como as pontuações e os pequenos canais de espaços intercelulares e intermoleculares entre as fibrilas. Esses últimos são mais frequentes quando a madeira se resseca. São ainda comuns as chamadas microfissuras e microfraturas nas paredes e entre as células da madeira. Esses tipos de fissuras são comuns nos cavacos e peças submetidas a esforços e menos comuns na madeira em toras. Isso porque a ação mecânica de picar a madeira é muito impactante sobre a estrutura da mesma.

Não é difícil se determinar qual espaço corresponde à porosidade e, a partir daí, calcular a relação matemática de seu percentual base volume de madeira.

Com a finalidade de calcular teoricamente a porosidade da madeira de *Pinus*, vamos, a título de exemplo, partir de duas pequenas peças de madeira de *Pinus*, cada qual tendo uma grama absolutamente seca de madeira.



Sejam então duas pequenas peças de madeira de *Pinus*, cada um com uma grama absolutamente seca de peso:

- Uma das peças foi obtida da região de madeira juvenil próxima à medula, com alta proporção de lenho inicial e pouco conteúdo de lenho tardio. Por essa razão, sua densidade básica era de apenas $0,30 \text{ g/cm}^3$.
- A outra peça foi obtida de uma região do alburno de uma árvore comercial madura e possuía uma densidade básica de $0,45 \text{ g/cm}^3$.

Essas situações são totalmente possíveis de serem encontradas em nosso dia-a-dia fabril, portanto, não é de forma alguma algo inusitado.

Para fins de cálculo, vamos admitir a densidade da "substância madeira" ou "substância parede celular da árvore" como sendo igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$, como diz a literatura de forma clara e abundante. Admitiremos também que a densidade da água é igual a 1 g/cm^3 .

Ficariamos então com as seguintes duas situações:

- **Caso 1:** Pequena peça de madeira de *Pinus* com uma grama absolutamente seca e com densidade de $0,30 \text{ g/cm}^3$

Volume saturado da peça = $(1 \text{ g}) : (0,3 \text{ g/cm}^3) = 3,33 \text{ cm}^3$

Volume de "substância madeira" ou de "100% paredes celulares" nessa peça de madeira = $(1 \text{ g}) : (1,53 \text{ g/cm}^3) = 0,65 \text{ cm}^3$

Volume de vazios ou de poros dessa peça de madeira = $3,33 - 0,65 = 2,68 \text{ cm}^3$

Porosidade da madeira capaz de ser encharcada por água, em percentagem do volume da peça =

$$2,68 \times 100 / 3,33 = \mathbf{80,5\%}$$

Máximo teor de umidade base madeira úmida que essa peça pode reter em sua condição de saturação plena = (2,68 g de H₂O que encharca a porosidade) : (1 g a.s. madeira + 2,68 g de H₂O) = **72,8%**

- **Caso 2:** Pequena peça de madeira de *Pinus* com uma grama absolutamente seca e com densidade de 0,45 g/cm³

Volume saturado da peça = (1 g) : (0,45 g/cm³) = 2,22 cm³

Volume de "substância madeira" ou de "100% paredes celulares" nessa peça de madeira = (1 g) : (1,53 g/cm³) = 0,65 cm³

Volume de vazios nessa peça de madeira = 2,22 - 0,65 = 1,57 cm³

Porosidade nessa peça de madeira capaz de ser encharcada por água =

$$1,57 \times 100 / 2,22 = \mathbf{70,7\%}$$

Máximo teor de umidade base madeira úmida que essa peça pode reter em sua condição de saturação plena = (1,57 g de H₂O que encharca a porosidade) : (1 g a.s. madeira + 1,57 g de H₂O) = **61,1%**

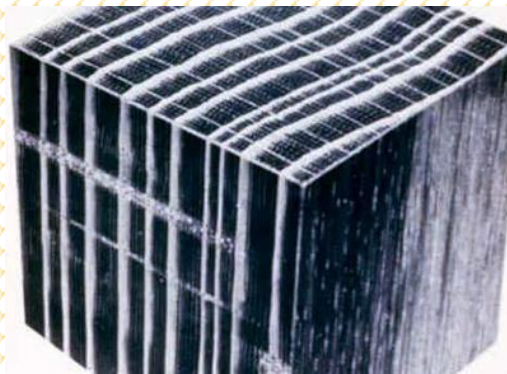
Observem amigos, o significativo efeito da densidade básica da madeira na capacidade de retenção de água por essas peças de madeira de *Pinus*. Também se pode observar a porosidade sendo alterada conforme se alteram os valores de densidade básica da madeira.

A porosidade da madeira pode então ter fórmulas desenvolvidas e baseadas no máximo teor de umidade das peças de madeira (no caso cavacos, fragmentos, palitos ou baguetas) e em pesos tomados sobre: peças secas e também peças completamente saturadas em água.

Devemos ter o maior dos cuidados para trabalhar com fragmentos pequenos de madeira para se conseguir atingir a situação de máxima impregnação e saturação dos mesmos. Dificilmente conseguiremos atingir essa situação de máximo teor de umidade com cunhas ou discos de madeira. Todas as recomendações são para se trabalhar com fragmentos de madeira com espessuras entre 1 a 3 mm e larguras e comprimentos de no máximo 25 - 30 mm. Caso os fragmentos a testar sejam maiores do que isso, eles podem ser fatiados em mais pedaços menores para facilitação da saturação, principalmente no que diz respeito à dimensão crítica que é espessura da peça. Inclusive as cunhas de madeira podem ser fatiadas em cavacos, caso se deseje usar dos métodos baseados em máximo teor de umidade. Definitivamente, não podemos sequer considerar o uso de peças grandes de

madeira previamente secas para tentar trabalhar com o máximo teor de umidade – isso porque dificilmente atingiremos essa máxima saturação nessas peças grandes e já parcialmente secas de madeira.

Com a madeira no seu máximo teor de umidade, todos os poros da madeira estarão preenchidos por água. O que não for água será substância madeira.



Logo, teremos:

$$V_{\text{água}} = P_{\text{água}} = V_{\text{poros}}$$

e

$$P_{\text{água}} = P_{\text{saturado.MTU}} - P_{\text{a.s.}}$$

E também:

$$\text{Porosidade (\%)} = \{(V_{\text{poros}}) : (V_{\text{total}})\} \cdot 100$$

Ou então:

$$\text{Porosidade (\%)} = \{(P_{\text{água}}) : (V_{\text{total}})\} \cdot 100$$

Sabemos ainda que:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{água}} + V_{\text{substância.madeira}}$$

$$V_{\text{total}} = P_{\text{água}} + \{(P_{\text{substância.madeira}}) : 1,53\}$$

Do que resulta:

$$\text{Porosidade (\%)} = \{(P_{\text{água}}) : (V_{\text{total}})\} \cdot 100$$

$$\text{Porosidade (\%)} = \{(P_{\text{água}}) : [P_{\text{água}} + (P_{\text{substância.madeira}}) : 1,53]\} \cdot 100$$

$$\text{Porosidade (\%)} = \frac{\{(\text{Psaturado.MTU} - \text{Pa.s.}) : [(\text{Psaturado.MTU} - \text{Pa.s.}) + (\text{Pa.s.}) : 1,53]\}}{. 100}$$

$$\text{Porosidade (\%)} = \frac{\{(\text{Psaturado.MTU} - \text{Pa.s.}) : [(\text{Psaturado.MTU} - \text{Pa.s.}) + 0.654.P a.s.]\}}{. 100}$$

$$\text{Porosidade (\%)} =$$

$$\frac{\{(\text{Psaturado.MTU} - \text{Pa.s.}) : [(\text{Psaturado.MTU} - 0,346.Pa.s.)]\}}{. 100}$$

Dessa forma, a partir de dados obtidos nas condições de máxima saturação da madeira, podemos obter por cálculos simples o volume de vazios ou a sua porosidade e também a sua densidade básica.

Outro dado que pode ser obtido, como já visto e calculado, é o teor de umidade na máxima saturação – ou seja, a quantidade máxima de água e que preenche todos os vazios da madeira (algo próximo ao que acontece na árvore viva).

Madeira de *Pinus*: Relações Umidade e Peso

Independentemente se o processo de conversão industrial privilegia ou não o teor de umidade da madeira como uma característica importante, todos os setores da base florestal valorizam o teor de umidade das toras e das biomassas florestais por causa da logística florestal. Quanto mais úmida for a madeira ou a biomassa florestal, mais pesada ela deverá ser por unidade de volume, e com isso, demandará mais recursos e mais energia para ser manuseada, transportada e estocada.

Em praticamente todas as empresas industriais, quando se desejar acompanhar o processo industrial com base em balanços mássicos e energéticos, a base referencial sempre deverá ser o peso seco da matéria-prima, uma vez que essa é a base que não se altera pela entrada ou saída de água nos processos. Em todos os casos, a água é um acessório que pode ser em maior ou menor quantidade para acompanhar um mesmo peso seco de matéria-prima florestal.

Dessa forma, a água da madeira e da biomassa florestal pode agregar peso e encarecer os processos logísticos florestais. Outras vezes, a água da madeira também agregará custos nos processos industriais de conversão, pois ela vai ter que ser evaporada por secagem. É o caso da secagem de tábuas de madeira, de peças de madeira em carbonização ou de partículas de madeira para produção de painéis MDP.

O teor de umidade pode inclusive resultar em perdas de produção e de produtividade em fábricas que apresentem restrições ou gargalos operacionais. Quando uma fábrica possuir limites restritivos de teores de umidade nos produtos prontos ou semi-prontos, caso a umidade inicial da madeira for alta, a fábrica poderá ter que eventualmente reduzir sua produção para manter as especificações nesses produtos, exatamente por limitações em seus equipamentos secadores.

Apesar de muito se falar em água da madeira e na biomassa florestal, quando nos referimos à água estamos na verdade falando sobre os dois tipos de seivas que circulam nas plantas: seiva bruta ou seiva mineral que circula pelo lenho, xilema ou madeira propriamente dita; seiva orgânica ou seiva elaborada, rica em materiais orgânicos sintetizados pelas folhas em seus processos metabólicos e que circula pela casca das plantas.

Uma árvore é muito rica em água (ou em seivas), quando ela está viva e ativa. Quando ela é abatida, o teor de umidade de sua madeira é muito alto e pode variar entre 50 a 65%, em base peso úmido. Já a biomassa da casca pode ter valores mais variados no abate das árvores, tudo dependendo do tipo de casca que existir no vegetal. A casca externa das árvores é mais seca, pois pode conter muito súber e por estar morta. Já a casca interna é muito úmida, viva e ativa, com teores de umidade que podem atingir 65 a 70%, em base peso úmido. É por ela que circula a rica seiva elaborada e orgânica.

Para fins de exemplificação, vamos considerar duas situações onde as toras de madeira de *Pinus* possuem valores distintos de densidade básica e de teor de umidade ao abate. Isso pode facilmente acontecer devido às diferenças exatamente na densidade básica do xilema.

Madeiras mais densas possuem menores níveis de porosidade em sua estrutura; ou seja, possuem menos espaços vazios para abrigar água (ou seiva) como umidade. Por essa razão, as madeiras leves e de baixa densidade básica costumam ter teores de umidade iniciais (ao abate na colheita) maiores do que as madeiras mais densas. Isso também acontece no chamado teor de máxima saturação (ou no MTU – Máximo Teor de Umidade), quando a madeira se encontra na máxima umidade por ter todos os espaços de sua porosidade preenchidos com água.

Vejamos então as duas situações propostas:

Situação 1:

- Madeira de *Pinus* com densidade básica de 0,35 ta.s./m³
- Teor de umidade em base úmida no máximo teor de umidade = 68,8%
- Teor de umidade ao abate da árvore = 65%

Situação 2:

- Madeira de *Pinus* com densidade básica de 0,45 ta.s./m³
- Teor de umidade em base úmida no máximo teor de umidade = 61%
- Teor de umidade ao abate da árvore = 56%

Peso médio ao abate de 1 m³ de toras de madeira de *Pinus* isentas de casca:

Situação 1 = 1,000 t úmidas (0,35 t madeira seca e 0,65 t água)

Situação 2 = 1,023 t úmidas (0,45 t madeira seca e 0,573 t água)

Logo que as árvores de *Pinus* são abatidas, a água escorre livremente pelas seções transversais recém-criadas no seccionamento das árvores em toras. O teor de

umidade decresce muito rapidamente, apenas pela ação da força da gravidade e da pressão atmosférica, “que expulsam água para fora das toras”.

Nesse momento, as madeiras mais leves e menos densas perdem muito mais água do que as mais densas. Logo, madeiras de baixa densidade mostram velocidades ou taxas de secagem inicialmente muito mais rápidas do que as mostradas pelas madeiras mais densas.

Durante o armazenamento ao ar livre, o teor de umidade das madeiras se reduz rapidamente no início e depois tende a reduzir mais vagorosamente até a estabilização de equilíbrio no campo, que pode acontecer em cerca de 8% a 20% de umidade base seca (ou cerca de 7,5 a 16,7% em base úmida), que é a chamada umidade de equilíbrio da madeira em relação ao ambiente onde ela esteja secando.

Em geral, a partir dos 30 a 45 dias secando ao ar livre no campo os teores de umidade tanto das madeiras mais leves como das madeiras mais densas começam a ficarem semelhantes e próximos a 35 a 40% em base úmida tal qual. Em geral, deixa-se a madeira secando no campo até valores de umidade entre 30 a 45% em base úmida, para então se transportá-la para as unidades consumidoras. Os tempos de secagem variarão em função de inúmeros fatores.

Vamos agora admitir em nosso exemplo numérico que as madeiras das situações 1 e 2 sejam deixadas secando ao ar livre até atingirem teor de umidade de 30%, em base peso úmido, para ambas as situações. Nesses momentos, que podem ser distintos em termos de tempos de secagem, teremos os seguintes pesos úmidos tais quais para os dois tipos de madeiras de *Pinus*:

Situação 1 = 500 kg (peso úmido tal qual a 30% Teor de Umidade, em base úmida)

Situação 2 = 643 kg (peso úmido tal qual a 30% Teor de Umidade, em base úmida)

Isso significa que para um mesmo teor de umidade, as toras de madeira mais densas deverão pesar mais do que as madeiras mais leves. Isso é fácil se entender, pois as madeiras mais densas terão no mesmo teor de umidade de 30%, mais matéria seca e mais água em sua estrutura.

Situação 1 = 500 kg (350 kg de madeira seca + 150 kg de água)

Situação 2 = 643 kg (450 kg de madeira seca + 193 kg de água)

As perdas de água pelas duas madeiras em relação ao que continham no momento do abate foram as seguintes:

Situação 1 = 650 - 150 = 400 kg de água removida da madeira/m³

Situação 2 = 573 - 193 = 380 kg de água removida da madeira/m³

Estamos aqui admitindo nesses cálculos que não aconteceram modificações nos pesos secos das madeiras em função de deteriorações ou volatilizações. Essa perda de peso seco costuma acontecer, mas em proporções percentuais muito pequenas para esses curtos espaços de tempo.

Do exposto acima, pode-se inferir que:

- Madeiras de *Pinus* de densidade básica mais baixa costumam ter maior conteúdo de umidade ao serem abatidas, por terem mais espaço em sua porosidade para reter água livre;
- Em mesmo nível de teor de umidade, as madeiras de *Pinus* de maior densidade básica são mais pesadas em termos de seus pesos brutos e úmidos, pois carregam maior peso seco por unidade de volume e desta forma, também de água referida a esse peso seco.
- Madeiras com menores densidades básicas tendem a perder água mais rapidamente por secagem, já que a mobilidade da água no interior das peças de madeira é facilitada pela menor quantidade relativa de paredes celulares a serem atravessadas. Também nessas madeiras, a porosidade natural é maior, o que facilita a saída da água livre.



Em geral, as toras de árvores abatidas de *Pinus* permanecem secando ao ar livre na área florestal com a finalidade de perderem peso para redução dos custos com a logística de manuseio, transporte e estocagem. Porém, essa razão, embora muito importante, não é a única.

Em geral, existem duas razões fundamentais para se proceder a essa secagem no campo:

- Redução do peso de cada unidade de volume de toras a ser transportada, pois o peso maior significa maiores custos em logística, por aumento dos consumos de combustível, necessidade de máquinas mais robustas, etc.;
- Possibilidade de se transportar maior volume de madeira por carga de caminhão, pois existem restrições em peso de balança por eixo dos veículos conforme a legislação rodoviária brasileira.

Quando a biomassa florestal ou as toras são recebidas nas fábricas, após um tempo de pós-corte no campo para perderem água, elas também sofreram outras

modificações, entre as quais a contração volumétrica. São madeiras desse tipo que adentram às fábricas e não madeiras saturadas e encharcadas em água.

Sabemos que definitivamente existe uma contração volumétrica da madeira entre o momento da colheita florestal e o recebimento das toras previamente secadas no campo. Essa contração se intensifica a partir do momento em que a madeira atinge teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

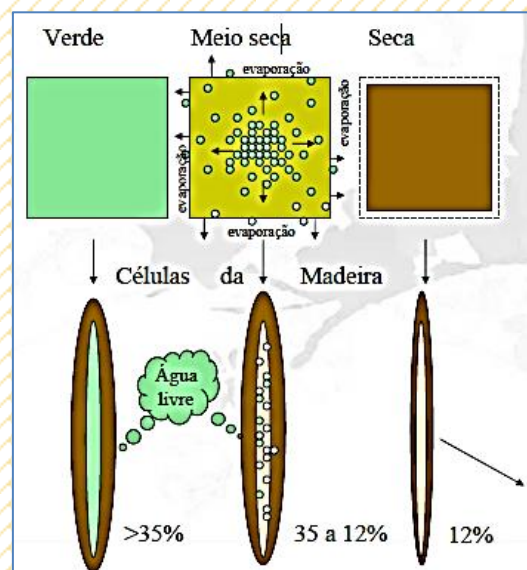


A madeira vai secando e entrando em equilíbrio com o meio ambiente em seu uso diário

Tipos de Água na Madeira de *Pinus*

Conforme já ressaltado anteriormente, todos os tipos de materiais orgânicos vegetais, inclusive a madeira, apresentam afinidade com a água e se encontram úmidos na forma natural.

Existem diversas formas de água na estrutura da madeira, conforme essa água esteja apenas ocupando livremente os espaços capilares no interior da madeira, ou então, esteja fortemente aderida nas paredes ou pelas moléculas dos constituintes químicos dos vegetais.



Fonte: Santos, 2005

Em geral, os estudiosos das madeiras classificam a água da madeira em cinco tipos, conforme sua ocorrência na estrutura da madeira:

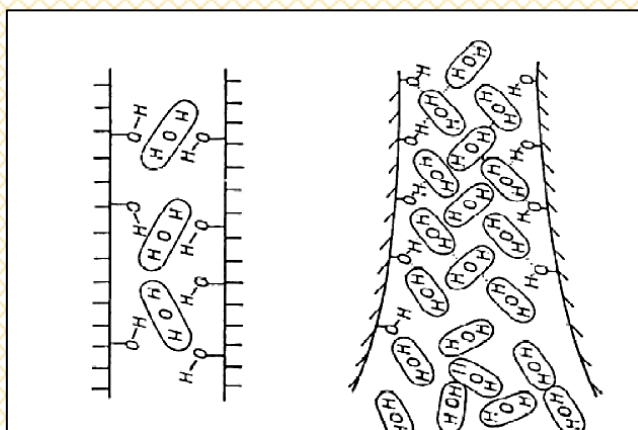
- Água livre de capilaridade ou de embebição:

É a água que ocupa as cavidades capilares da madeira, portanto lúmens, microfissuras, pontuações, etc. Portanto, trata-se da água que está acima do teor de saturação das paredes das células. Pelo fato de não haver necessidade de mais água para saturação das paredes, a água se posiciona nos vazios das cavidades celulares. As paredes celulares estarão inchadas e em volume máximo e as cavidades podem conter quantidades variadas de água, até sua máxima ocupação no máximo teor de umidade da madeira.

Como a água livre é fracamente retida pela madeira, as próprias forças de gravidade e as forças de capilaridade são suficientes para promover sua movimentação e expulsão de dentro para fora da peça de madeira. Também as diferenças de pressão e de teor de umidade criam gradientes que estimulam essa movimentação da água dentro da madeira.

- Água higroscópica ou água de adesão:

É a água contida na parede das células vegetais, geralmente retida por forças eletrostáticas devido à polaridade da água e às cargas eletrostáticas dos constituintes químicos da madeira (celulose, hemiceluloses, extrativos, lignina, etc.).



Fonte: Gonçalves, 2011

Conforme varia a quantidade desse tipo de água, passam a ocorrer variações dimensionais na peça de madeira. Se a madeira estiver absorvendo água por hidratação, a peça começa a inchar o seu volume. Se ela estiver perdendo água, passa a ocorrer a secagem, a redução do volume e aparecem os defeitos como rachaduras e empenamentos.

As variações maiores acontecem a partir do que se chama de PSF – Ponto de Saturação das Fibras, que em geral acontece quando a madeira está com umidade base seca próxima a 30% (ou 23,1% base úmida).

A água de adesão costuma ser aquela que varia entre o PSF (umidade base seca de 30%) e o teor de umidade de equilíbrio da madeira com o meio ambiente (entre 6 a 15% base seca).

- Vapor de água em mistura com o ar interno das células da madeira:

É uma espécie de água livre, mas na forma de vapor e não de líquido. Esse vapor pode ser originado da água livre ou da água de adesão das paredes celulares, que se evapora e migra para os vazios da madeira em sua rota de fuga de dentro para fora da peça de madeira.

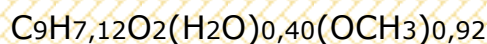
- Água de condensação capilar:

É a água que se condensa dentro da capilaridade da madeira a partir do vapor que nela está presente. Isso acontece pelo abaixamento da temperatura, em geral no período noturno, quando parte dessa água na forma de vapor muda de estado e pode ser de novo agarrada pela adesão nas paredes das células.

- Água de constituição química:

Toda substância orgânica possui hidrogênio e oxigênio em sua constituição. Esses dois componentes podem ser liberados como água quando a madeira começa a sofrer degradação térmica. Logo, costuma-se dizer que a água faz parte da constituição química das substâncias orgânicas, que por sua vez são formadas a partir de moléculas de água pela fotossíntese.

A própria fórmula molecular da lignina das coníferas costuma ser expressa dentre outras formas, como uma fórmula mínima onde se dá destaque às moléculas de água de constituição:



Essa água de constituição não consegue ser removida pela secagem da madeira. Ela só começa a ser liberada quando se inicia a termodestruição dos componentes da madeira (celulose, hemiceluloses, extrativos, lignina) em processos como torrefação, carbonização, pirólise ou gaseificação.

Higroscopicidade da Madeira de *Pinus*

Quando toda a água livre abandona a madeira pela secagem natural ou forçada artificialmente passa a existir na madeira apenas a água de adesão nas células (água higroscópica) e a água de constituição química.

A madeira contendo água higroscópica está na exata transição entre madeira em seu ponto de saturação das fibras e madeira seca.

Existem dois pontos que delimitam a higroscopicidade da madeira em suas relações ao ambiente onde está a madeira.

- PFS – Ponto de Saturação de Fibras: é onde o teor de umidade determina não mais água livre capilar, mas apenas a água de adesão nas paredes celulares. Isso ocorre para teores de umidade entre 25 a 30% base seca, que equivale a teores entre 20 a 23% base úmida. Abaixo do ponto de saturação das fibras a contração da madeira cresce rapidamente, podendo atingir contrações totais de 10 a 15%. Costuma-se dizer que para teores de umidade acima dos que se obtêm no PSF a madeira não muda de volume. Entretanto, muitas vezes, ao se

determinar o teor de umidade se nota que existe contração da peça de madeira, mesmo com esse teor médio acima do relatado como sendo ao PSF. A razão para isso estar acontecendo é simples: uma tora ou uma peça de madeira apresenta um teor médio de umidade, mas dentro da peça existem diversos teores de umidade, em alguns pontos ou seções acima e em outros abaixo do teor de umidade ao PSF.

Portanto, embora existam partes da peça com teores acima do PSF, existem outros abaixo, o que faz com que esteja acontecendo a contração da peça como um todo.

Essas diferenças de contração volumétrica acabam dando origem a forças enormes de tensão, o que gera estresses e leva à formação de defeitos, como empenamento e rachaduras, mesmo em teores de umidade médios acima do PSF.

- UEM - Umidade de Equilíbrio da Madeira: é a umidade resultante do equilíbrio entre as trocas de água entre a madeira e a umidade relativa do ar onde está colocada a peça de madeira. O teor de umidade resultante é função da qualidade da madeira e da umidade relativa e temperatura do ar ambiental. Por essa razão, diferentes ambientes e diferentes tipos de madeira acabam resultando em variados teores de umidade de equilíbrio. Essas diferenças costumam afetar a resistência da madeira, seu apodrecimento, sua estabilidade dimensional e acabam levando muitas vezes a problemas de desempenho em uso. Em geral, conforme a madeira seca, a resistência mecânica aumenta. Entretanto, existem situações entre o PSF e a UEM em que a resistência da madeira é maior mesmo estando com ligeiramente maiores teores de umidade. Explicam os entendidos, que isso acontece devido às intensas forças internas que acabam desestabilizando o comportamento da madeira em termos de seus ensaios de avaliação de resistências mecânicas. Como existem diferenças de contração nos sentidos longitudinal, radial e axial, essas diferenças realmente podem desestabilizar o desempenho das madeiras devido às diferenças de forças envolvidas em cada um desses sentidos.

Para a maioria das madeiras, conforme se atinjam umidades próximas às de equilíbrio com o ambiente, elas tendem a se estabilizar em suas dimensões. Porém, a desestabilização volta a ocorrer se a umidade relativa e a temperatura ambiental mudarem drasticamente, em geral em função da estação do ano.

O importante é que se busque conhecer bem a tendência de secagem e as variações dimensionais das madeiras em função das espécies, idades, tipos de lenho, forma de seccionamento das peças, clima, local de estocagem, etc., etc.

A Umidade de Equilíbrio das madeiras pode variar entre 6 até 15% ou mais (base peso seco), tudo dependendo dos fatores já mencionados. Para umidades relativas baixas, entre 40 a 50%, os teores de umidade de equilíbrio da madeira costumam ficar entre 8 a 10%. Já para locais úmidos, como umidades relativas do ar entre 75 a 85%, podemos ter umidades de equilíbrio acima de 18% para as madeiras armazenadas nessas condições.

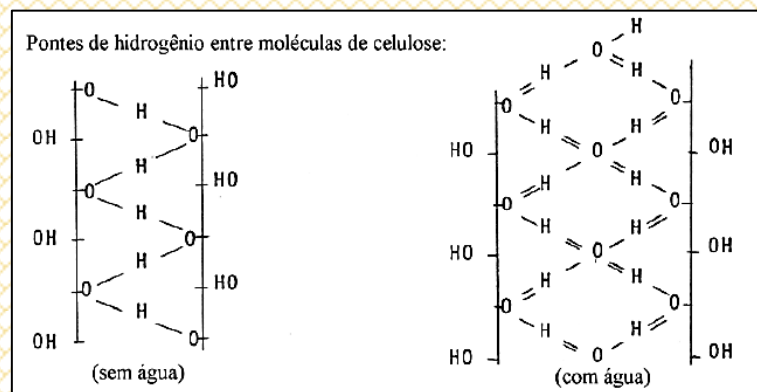
Mesmo em meios anidros, como os que se colocam em estufas de laboratório a 105°C, a madeira ainda retém certa umidade, algo como 0,2%. Ou seja, quando se diz que a madeira está absolutamente seca, ela na realidade ainda possui um nível de água fortemente retido pelas moléculas de forma higroscópica e eletrostática. Isso se deve principalmente pela elevada hidrofiliabilidade dos carboidratos da

madeira. Na verdade, é essa hidrofiliçidade que favorece as trocas de água entre madeira e ar ambiental.

Anisotropia, Retratibilidade e Histerese da Madeira de *Pinus*

A retração ou contração da madeira ocorre devido à composição química e à disposição dos elementos anatômicos das madeiras. Os componentes anatômicos não se dispõem todos na mesma direção, bem como possuem variadas dimensões em tamanho e espessura das suas paredes. Isso conduz a variações dimensionais distintas, o que acaba gerando os defeitos de secagem.

Conforme a água vai saindo da madeira, as moléculas químicas dos seus constituintes e presentes na parede celular se aproximam a tal ponto que se formam enormes forças de ligação entre as mesmas. Como temos diferentes tipos e posicionamentos das moléculas, existem forças enormes de tensões e de estresses sendo gerados, que são causadas por esses diferentes posicionamentos dos constituintes químicos e anatômicos.



Fonte: Santos, 2005

As tensões são maiores conforme intensifica a secagem da madeira e os constituintes químicos se aproximam ainda mais. Como as moléculas se colocam posicionadas em sentidos diferentes (longitudinal, axial, radial, com ângulos fibrilares diferentes, etc.), essas forças são variadas e ganham cada vez mais intensidade.

São essas razões que fazem com que a madeira apresente anisotropia, ou seja, possua variações dimensionais distintas conforme os eixos da peça se apresentem em relação ao eixo do tronco da árvore. Enquanto a variação dimensional da madeira é baixa no sentido longitudinal (cerca de 1%), já no sentido radial é bastante importante (entre 10 a 15% conforme a secagem se intensifica).

Lembrem-se de que as mudanças de dimensões não são significativas, embora aconteçam, em teores de umidades acima dos obtidos no ponto de saturação das fibras. Em geral, esse teor de umidade é uma espécie de ponto de inflexão, que conduz a rápidas e significativas mudanças nas dimensões da madeira, conforme a umidade diminua mais e rapidamente.

Os especialistas afirmam que uma mesma peça de madeira (tora, tábua, estaca, etc.) pode ter pequenas variações dimensionais quando atinge o PSF em seu

processo de secagem (algo como 1 a 5% em média, devido à sua desuniformidade interna). Porém, quando se seca abaixo desses valores e fica próxima à umidade de equilíbrio, as variações dimensionais podem atingir facilmente 10 a 14%

A reidratação da madeira que tenha sofrido secagem próxima ou abaixo do PSF é bastante mais dificultada. É difícil promover uma rota inversa de entrada de água em relação à saída da mesma da madeira, após intensa secagem. A penetração natural e sem auxílio de vácuo ou pressão é bastante problemática e dificilmente se atingem os mesmos níveis de molhabilidade em relação ao período em que a madeira estava secando e não reidratando.

Dessa forma, a reidratação e o inchamento aos mesmos níveis anteriores de uma madeira que tenha sido previamente secada são difíceis de serem conseguidos, a menos que se disponha de longos tempos de reidratação com a ajuda de procedimentos para facilitar a entrada de água na madeira, tais como vácuo, pressão ou algum modificador da tensão superficial da água.

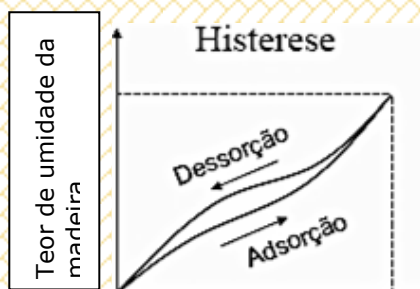
Mesmo que a água consiga penetrar no lúmen das células e em outros espaços vazios da madeira, dificilmente as moléculas dos constituintes químicos da parede celular se afastarão e serão inchados nos mesmos níveis em que se encontravam quando a madeira úmida estava saturada ou verde.



O inchamento de uma madeira seca por reidratação acontece lentamente, porém dificilmente se consegue atingir os mesmos níveis que se tinham nas madeiras verdes. Essas dificuldades de adsorção de água em relação à dessorção são conhecidas como devidas a um fenômeno prático e científico denominado de Histerese.

Histerese é, portanto, uma condição de comportamento diferente de uma mesma madeira em suas rotas de secagem e depois de reidratação, ou melhor, de dessorção e depois de adsorção. Tanto o volume original como o teor de umidade da madeira verde dificilmente conseguirão ser restaurados pela adsorção de água em uma madeira seca, isso exatamente devido à histerese.

As taxas de inchamento e a de contração da madeira sofrem também influência da histerese. Tudo isso pode ser perfeitamente visualizado ao se secar uma peça de madeira e depois se tentar reidratá-la aos mesmos níveis originais de madeira verde.



Devemos lembrar ainda que uma mesma peça de madeira, mesmo sendo de dimensões pequenas, pode conter: madeiras de lenho inicial e tardio, cerne, alburno e lenho juvenil. Esses diferentes tipos de xilemas são química e anatomicamente diferentes. Portanto, essa variabilidade interfere também nos ritmos de adsorção e reidratação da madeira.

Outro ponto importante a influenciar essas coisas todas é a forma como a madeira venha a ser serrada, ao se privilegiar algum eixo do tronco. O excesso de variáveis e a falta de embasamento teórico podem levar ao sucesso ou ao fracasso no uso industrial de uma determinada madeira de *Pinus*, *Araucaria*, ou qualquer outra.

Talvez seja por essas razões que a indústria moveleira tenha preferido focar e migrar para os painéis de madeira reconstituída (compensados, painéis e chapas MDP, MDF e chapas duras). Esses painéis e chapas são bem mais estáveis em suas dimensões e são preparados com a adição de colas, resinas, catalisadores e outros aditivos para regularização de propriedades e desempenhos.



Painéis MDF – Madeira reconstituída

O desempenho da madeira em seus processos operacionais é afetado por propriedades intrínsecas da mesma que se relacionam à água, tais como: porosidade, fração parede, proporção entre elementos anatômicos, relação entre os lenhos inicial e tardio, teor de extrativos, teor de lignina, cristalinidade da celulose, anisotropia, histerese, higroscopicidade, teor de cerne, composição química, etc.

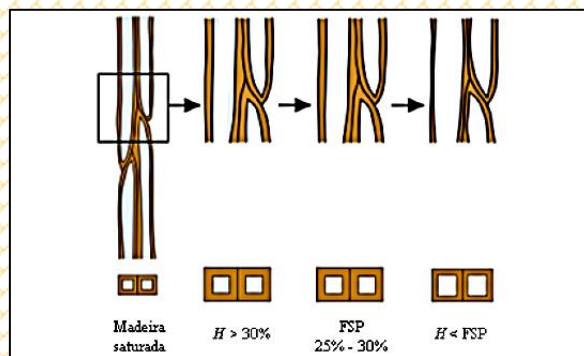
Isso pode ser facilmente comprovado por alguns exemplos práticos de nosso dia a dia no uso das madeiras de *Pinus*:

- A madeira de lenho tardio, por ser muito mais estável e menos porosa que a de lenho inicial, favorece o aumento das resistências mecânicas da madeira, inclusive porque comporta menos água em seus espaços vazios. Ao se utilizar industrialmente uma madeira de *Pinus*, um dos principais fatores a observar para qualidade da madeira é exatamente o teor proporcional de lenho tardio.
- As células parenquimatosas dos raios medulares são importantes fatores de restrição à variação dimensional dos traqueídeos, os quais se dispõem em sentido axial no tronco. Como essas células de raio se situam radialmente em relação ao eixo do tronco e os traqueídeos se colocam axialmente, quando ocorre a secagem da madeira, as células dos parênquimas radiais não acompanham a variação dimensional dos traqueídeos, portanto,

impedem a contração dos mesmos e causam a formação de intensas forças internas na madeira sendo secada.

- A madeira de cerne pode ser mais densa ou menos densa do que a do albúrneo, sendo isso dependente do nível de maturidade da árvore e de seu cerne no tronco. Essas diferenças se devem principalmente à idade da árvore e à posição da tora retirada do tronco da árvore. Uma árvore de 35 anos pode ter uma excepcional tora em sua base, com cerne maduro e alta proporção de lenho tardio. Entretanto, nessa mesma árvore, uma tora retirada no quartil superior da altura da mesma pode ter cerne juvenil, alta proporção de lenho inicial e assim, com comportamento totalmente diferente da anteriormente mencionada.

Movimentação e Fluxos de Água na Madeira de *Pinus*



Fonte: Esteves, 2009

O movimento da água no interior da madeira é um dos importantes fatores a serem entendidos para se conseguirem melhores desempenhos no processo de secagem e consequente agregação de valor aos produtos obtidos dessas madeiras.

Os fluxos de água na madeira tendem a serem predominantemente no sentido de sua saída, ou seja, da madeira úmida para o ambiente, em um processo de secagem, que pode ser natural ou artificial. Entretanto, o fluxo inverso também pode acontecer, com a entrada de água do ambiente externo para o interior da madeira (absorção de água).

Em qualquer um dos dois casos (secagem e reidratação), existem diversos fatores que podem acelerar ou retardar o processo de movimentação da água dentro da madeira.

Em função da estrutura anatômica mais simples das madeiras de coníferas, bem como pela alta porosidade dessas madeiras por causa de sua baixa densidade básica, os fluxos de água nesses tipos de madeiras são mais facilitados do que os que são esperados em madeiras de folhosas (como é o caso das madeiras de eucaliptos).

É importante se lembrar de que os fluxos da água são bastante mais rápidos no sentido longitudinal do tronco, exatamente nas mesmas direções em que se colocam os eixos dos traqueídeos. Mesmo com essa mais fácil e rápida movimentação de água, essa direção longitudinal é a que possui menores taxas de

contração ou retração. As maiores contrações acontecem nas direções radial e tangencial, principalmente em função da anatomia das madeiras de *Pinus*.

Os fluxos de água podem acontecer nas madeiras conforme três estados da mesma:

- Água livre líquida: que se movimenta rapidamente por ação de forças gravitacionais e de capilaridade;
- Água líquida adsorvida: que se difunde através da parede celular na forma líquida, podendo se evaporar ao se atingir o lúmen do outro lado da sua rota.
- Vapor de água: que se movimenta com facilidade nos espaços vazios dos lúmens. O vapor costuma se formar a partir da evaporação da água adsorvida, porém ele tende a se condensar durante a noite, para iniciar um novo processo de difusão na forma líquida através da parede celular que encontrar. Isso acontece em ciclos sucessivos até que a água encontre o caminho final de saída e atinja o ambiente externo à madeira (atmosfera externa). Quem comanda esse movimento e essa direção é o gradiente de umidade, que permite gradientes de pressão de vapor para ajudar na rota de fuga da água da madeira.

Durante o processo de secagem da madeira, a água se movimenta das partes mais úmidas (internas) para as mais secas (externas), em geral as localizadas na superfície externa das peças. Obviamente, pela ação da insolação e movimento dos ventos, as superfícies externas das peças de madeira são as mais secas. Quando ocorre uma chuva intensa, o processo pode momentaneamente se inverter por certo período. Apesar disso, a reentrada de água por reidratação não é tão simples, já que a água tem dificuldades em fazer o caminho inverso. Somente se a madeira ficar por longos períodos de tempo em ambientes molhados ou úmidos é que a reidratação poderá ser mais efetiva. Madeiras estocadas em solos úmidos (encharcados) podem recuperar o inchamento, se reidratarem e até apodrecerem por ação de organismos saprofitos.

Dessa forma, sempre existirá um gradiente de umidade ao longo de qualquer peça de madeira perdendo água por secagem. Os maiores teores de umidade estarão localizados provavelmente no meio do diâmetro e do comprimento das peças e os menores do lado externo, em contato com a atmosfera em sua parte superior e lateralmente nas regiões dos cortes transversais.

Os fatores que afetam esse fluxo de água e, com isso, os teores de umidade da madeira são os seguintes:

- Dimensões das peças de madeira (comprimento, largura e espessura);
- Umidade do ar e das toras;
- Temperatura do ar e das toras;
- Gradientes de temperatura (ΔT) e de umidade (ΔU);
- Facilitação das trocas gasosas pela ação de ventos e por diferenciais de pressão – com a finalidade de causar renovação de um ar úmido por um ar seco;

- Anatomia e estrutura da madeira;
- Forças capilares geradas pela anatomia e estrutura da madeira;
- Forças de adesão higroscópica;
- Densidade básica e porosidade da madeira;
- Hidrofobicidade da madeira, causada pelos teores de lignina e extrativos;
- Hidrofilicidade causada pelos teores e tipos de carboidratos;
- Precipitação e insolação direta sobre a madeira; etc., etc.

As principais forças que aceleram a movimentação e os fluxos de água na madeira serão então:

- Gradiente de temperatura;
- Gradiente de umidade;
- Espaçamento entre as peças de madeira;
- Dimensões das peças de madeira;
- Anatomia e estrutura da madeira; etc.; etc.

Temperatura: a temperatura fornece a energia calorífica necessária para converter a água em vapor, para facilitar seu escape das peças de madeira. Quando a água vira vapor, aumenta a pressão interna desse vapor dentro da madeira, o que facilita o direcionamento para regiões de fora da peça, onde a pressão estará menor (diferencial de pressão de vapor). Com esse diferencial criado, o vapor começa a migrar das regiões de mais alta pressão para as de mais baixa, ou seja, para as regiões da superfície da madeira, que estão mais secas.

Quanto maior for a temperatura, mais intensa será a evaporação da água e mais rápida a sua expulsão para fora da peça de madeira. Entretanto, há limites para essa ação da temperatura. Não se pode aumentá-la demais, pois isso pode ocasionar degradação térmica de componentes químicos da madeira. Mesmo sem atingir o estado de degradação térmica, existe ainda o perigo de colapsos nas dimensões das peças de madeira, com geração de muitos defeitos devidos ao superaquecimento.

Trocas de ar, com injeção de ar frio e seco ajudam a aumentar o diferencial de temperatura e de umidades entre o ambiente externo e o interior da madeira.

Umidade: trata-se de um dos principais fatores que precisam ser controlados para acelerar os movimentos de água dentro da madeira. O gradiente de umidade é dinâmico e vai mudando com a perda de umidade das regiões mais externas, que secam primeiro. Com isso, acontece um direcionamento da umidade em sua migração das regiões internas mais úmidas, para as regiões externas mais secas.

Quando a água que está saindo da madeira alcança a superfície da peça, ela tende a evaporar ou o próprio vapor nela presente se dilui no ar ambiental, integrando-se na umidade relativa do mesmo.

Dimensões das peças de madeira: Quanto maiores forem as dimensões das peças, maiores serão as distâncias para a água ou vapor percorrer em sua rota de saída da madeira. Logo, a secagem de toras de 2 metros de comprimento e com diâmetros de 15 cm é bem mais rápida do que a de toras com 6 metros de comprimento e diâmetro de 20 cm. Isso em um mesmo ambiente para sua secagem.

Devemos ainda lembrar que quando os teores de umidade forem mais altos, por exemplo, acima de 40% base úmida, as movimentações de água ocorrem principalmente na forma de água livre ou capilar. Já quando esses teores forem mais baixos, próximos a 25% base úmida, já não há mais água livre e sim água de adesão ou higroscópica. Nesse caso, a movimentação acontece em um processo de difusão pelas paredes, evaporação, condensação e nova difusão – isso em direção à superfície externa da peça, com orientação devida aos diferenciais de umidades, temperaturas e pressões de vapor.

Outra coisa que pouca gente menciona, mas que já disse a vocês, mas é bom repetir é o seguinte: uma mesma peça de madeira possui regiões onde o teor de umidade está acima do ponto de saturação de fibras e outras regiões onde está abaixo. Nessas situações, temos regiões que estão se contraindo rapidamente e outras que não estão acompanhando essa variação dimensional. Como resultado dessas diferenças, teremos instabilidades dimensionais aceleradas, geração de forças de tensão internas e aumento no aparecimento de defeitos devidos à secagem inadequada da madeira.

Anatomia e estrutura da madeira: os fluxos de água dentro da madeira dependem muito da anatomia e estrutura da mesma.

A madeira de *Pinus* é bastante porosa, possui baixos valores de densidade básica, embora em alguns casos seja rica em extrativos resinosos hidrofóbicos. Ela é rica em espaços vazios amplos e que facilitam a movimentação e fluxos de água líquida e de vapores de água.

A água livre e líquida se movimenta em fluxo dentro dos lúmens, através das pontuações, mudando assim de uma célula para a outra vizinha.

A água adsorvida se move por difusão nas paredes, mas se evapora ao atingir os lúmens das células, em condições que dependem da temperatura e pressões de vapor d'água.

A difusão é a maneira preferencial de movimentação da água através das paredes celulares, guiada pelos gradientes de umidade e de pressão de vapor.

Pode-se de forma simplificada se dizer que:

- Acima do Ponto de Saturação de Fibras: ocorre a translocação de água livre e a difusão de água líquida pelas paredes celulares;
- Abaixo do PSF: os fluxos são devidos à translocação da água higroscópica através das paredes e do vapor d'água através dos espaços vazios da estrutura lenhosa (lúmens e pontuações).
- Após a perda da água livre, grande parte do fluxo de água dentro da madeira acontece pelas movimentações de água higroscópica (difusão) e de vapor (em função dos gradientes de pressão)

Introdução à Secagem da Madeira de *Pinus*



A secagem da madeira pode ser realizada de diversas formas:

- Naturalmente na própria área florestal, deixando as toras empilhadas para perda de peso,
- Naturalmente, em pátios de cavacos de madeira ou de biomassa florestal para fins energéticos
- De forma acelerada em estufas secadoras com controles de temperaturas, ventilação, teores de umidade relativa dos ares, etc.



Biomassas florestais energéticas de *Pinus* devem ter baixos teores de umidade

As principais razões para se secar as madeiras são as seguintes:

- Redução de peso das peças;
- Redução do teor de umidade da madeira;
- Estabilização das dimensões;

- Redução de defeitos e deformações (pela secagem controlada);
- Aumento do poder calorífico em usos energéticos;
- Aumento das resistências mecânicas;
- Redução dos efeitos da degradação microbiológica (emboloramento, apodrecimento, etc.);
- Agregação de valor qualitativo;
- Redução de custos e aumento de margens de contribuição.

A secagem tem como meta atingir esses objetivos técnicos através do adequado controle das variáveis que a afetam e que são responsáveis pelos fluxos de saída da água da madeira. Esses controles podem acontecer tanto nas estufas secadoras como no próprio processo de secagem das toras na área florestal.

No caso de secagem de toras no campo, os principais itens que podem ajudar na aceleração da secagem são os seguintes:

- Controle das dimensões das toras;
- Remoção da casca das toras;
- Dimensões das pilhas e espaçamento entre elas;
- Seleção de áreas de secagem não sombreadas;
- Seleção de áreas com maior incidência de ventos;
- Colocação de toras grossas como travesseiros na base da pilha para evitar contato das toras com o solo úmido;
- Etc.

Caso se deseje secar as toras em pátios industriais, os mesmos cuidados devem ser tomados.

A perda de água livre é rápida. Em 60 a 90 dias, grande parte da umidade já deixou as toras. Entretanto, conforme se reduz a presença de água livre, vai ficando cada vez mais difícil a remoção do restante da água. Algumas empresas que desejam baixos teores de umidade em suas madeiras, podem até mesmo deixar as toras secando por 120 a até 210 dias. Entretanto, outros inconvenientes começam a acontecer, tais como: apodrecimento, emboloramento, perda de peso e perda de qualidade das peças.

Naturalmente, podem ser tomados alguns meses até que as peças de madeira consigam entrar em equilíbrio com a atmosfera. Em algumas regiões, muito chuvosas, isso pode não acontecer.

Caso se queira acelerar esse processo de remoção de água, a solução é a busca de secadores (estufas, secadores de biomassa, etc.). A seleção do processo de secagem é crítico e não faz parte do objetivo do atual texto.

Considerações Finais

As madeiras do *Pinus* e da *Araucaria* possuem relativa facilidade para secagem, embora sejam susceptíveis ao aparecimento de fungos apodrecedores e manchadores durante a secagem natural.

É fundamental que os usuários e os processadores dessas madeiras procurem entender mais sobre as interações entre as propriedades da madeira (suas qualidades intrínsecas e alguns conceitos técnicos e científicos) com os processos de redução dos teores de umidade, sejam eles naturais ou artificiais.

Nesse presente artigo, procurei colocar uma série de considerações que possam ajudar a melhor compreensão sobre essas interações para facilitar a otimização de processos operacionais e da qualidade da madeira após a remoção de sua água. Também procurei explicar alguns conceitos básicos sobre anatomia, química, física e estrutura da madeira, todos associados com a movimentação e retenção de água pelas madeiras de coníferas.

Finalmente, e logo a seguir, estou oferecendo uma seleção de textos da literatura que podem ser livremente descarregados para leitura e estudos complementares.

A todos vocês, desejo boas leituras, empenho nas navegações recomendadas (e outras mais) e muitas reflexões, planejamentos e ações conscientes para que possam melhor utilizar as madeiras de *Pinus* e de outras coníferas através da eficiente gestão da água presente nas mesmas.

Referências da literatura sobre a água e a madeira do *Pinus*:



A seguir, estamos oferecendo para navegação e leitura uma seleção de artigos relacionados à água na madeira, em especial para o caso do *Pinus*.

How wood dries. S. Angelo. Wyoming Wood Turner. Vídeos YouTube. Acesso em 12.01.2017:

<https://www.youtube.com/watch?v=wViQvYlgoYA> (em Inglês)

Wood drying. Wikipedia – The Free Encyclopedia. Acesso em 12.01.2017:

https://en.wikipedia.org/wiki/Wood_drying (em Inglês)

Seca ou verde? Escolha a madeira correta. COMAVE Madeiras. Acesso em 12.01.2017:

<http://www.comavemadeiras.com.br/novidade/seca-ou-verde-escolha-a-madeira-correta>

Secagem na floresta e ao ar livre de toras e biomassa de eucalipto. C. Foelkel. In: "Eucalyptus Newsletter Edição 51". 21 pp. (2016)

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news51_Secagem_Madeira_Biomassa.pdf

Equação envolvendo densidades e ponto de saturação das fibras de madeiras tropicais brasileiras. T.H. Almeida; A.L. Christoforo; F.A.R. Lahr. XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. 12 pp. (2016)

http://www.ebramem.com.br/content/artigos/corrigidos/170_corrigido.pdf

Qualidade da madeira do eucalipto - Reflexões acerca da utilização da densidade básica como indicador de qualidade da madeira no setor de base florestal. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 41. 199 pp. (2015)

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT41_Densidade_Basica_Madeira.pdf

Qualidade da madeira do eucalipto - Acerca dos acertos e erros na utilização da densidade básica como indicador de qualidade de madeiras. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 40. 177 pp. (2015)

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT42_Densidade_Basica_Acertos&Erros.pdf

Estudo da influência da umidade nas propriedades mecânicas da madeira. P.A.D. Sá; M. Vito. Artigo de Conclusão de Curso. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 18 pp. (2014)

<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/3020/1/PauloAtan%C3%A1zioDuarteS%C3%A1.pdf>

Relação água-madeira e sua secagem. J.C. Moreschi. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal do Paraná. 121 pp. (2014)

<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/AGUA-MADEIRA.pdf>

Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia*. T.C. Monteiro. Tese de Doutorado. UFPA – Universidade Federal de Lavras. 131 pp. (2014)

<http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/3442/1/DOUTORADO%20Efeito%20da%20anatomia%20no%20fluxo%20da%20%C3%A1gua%20em%20madeira%20de%20Eucalyptus%20e%20Corymbia.pdf>

Hysteresis in swelling and in sorption of wood tissue. A. Patera; D. Derome; M. Griffa; J. Carmeliet. Journal of Structural Biology. (2013)

https://www.researchgate.net/publication/236075534_Hysteresis_in_swelling_and_in_sorption_of_wood_tissue (em Inglês)

Secagem de madeiras. I.P. Jankowsky, I.C.M. Galina. PIMADS – Projeto Piso de Madeira Sustentável. 39 pp. (2013)

http://pimads.org/documento_atividades/Apostila%20-%20Secagem%20de%20Madeiras..pdf

Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. J.M.M.A.P. Moreira; E.A. Lima; I.C.G.R. Goulart. Embrapa Florestas. Comunicado Técnico nº 293. 05 pp. (2012)

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65182/1/CT293.pdf>

Solubilidade e absorção de água de partículas da madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson e *Pinus* sp. C.H.R. Gonçalves. Monografia de Conclusão de Curso. UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 50 pp. (2011)

http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/8808/2011_1_Carlos-Henrique-Rocha-Gon%3%a7alves.pdf?sequence=1&isAllowed=y

LIVRO: Anatomia vegetal: uma abordagem aplicada. D.F. Cutler; T. Botha; D.W. Stevenson. Tradução: M.G. Moraes. AtMed Editora. (2011)

<https://books.google.com.br/books?id=QKjZBX2e8bAC&pg=PA46&lpg=PA46&dq=Efeito+da+anatomia+no+fluxo+da+%C3%A1gua+em+madeira+pinus&source=bl&ots=7WNMJRAHp1&sig=kymJIFhgeeJJLQMwuYKtfxsviKo&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjP-dObqtbQAhUDF5AKHaTPBZ4Q6AEIQDAG#v=onepage&q=Efeito%20da%20anatomia%20no%20fluxo%20da%20%C3%A1gua%20em%20madeira%20pinus&f=false>

Understanding moisture content and wood movement. C. Hagstrom. THISis Carpentry. (2010)

<http://www.thisiscarpentry.com/2010/09/03/moisture-content-wood-movement/> (em Inglês)

Wood and moisture relationships. J.E. Reeb. Oregon State University. 07 pp. (2009)

<http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/12771/em8600.pdf?sequence=3> (em Inglês)

Identificação das propriedades de difusão na madeira *Pinus pinaster* Aiton. C.M.G. Esteves. Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 161 pp. (2009)

http://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/264/1/msc_cmgesteves.pdf

Propriedades da madeira de *Pinus elliottii* Engelm submetida a diferentes temperaturas de secagem. D.A. Gatto; L. Calegari; E.J. Santini; D.M. Stangerlin; R. Trevisan. Cerne 14(3): 220 - 226. (2008)

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74411656005>

Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. E.A. Lima; E.M. Abdala; A.A. Wenzel. Embrapa Florestas. Comunicado Técnico Embrapa nº 220. 03 pp. (2008)

http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/44878/1/com_tec220.pdf

A secagem e as relações da água com a madeira. J.A. Santos. Bem Utilizar a Madeira. Encontro sobre a Madeira e suas Aplicações Nobres. Universidade do Minho. (2005)

http://www.hms.civil.uminho.pt/events/utmadeira2005/9_00t.pdf (Texto - 12 páginas)

e

http://www.hms.civil.uminho.pt/events/utmadeira2005/9_00s.pdf (Apresentação de slides - 95 slides)

Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea var. hondurensis* tratado termicamente. L.M. Borges; W.F. Quirino. Revista Biomassa & Energia 1(2): 173 - 182. (2004)

<http://funtec.org.br/arquivos/higroscopicidade.pdf>

Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira. F.R. Stein. Monografia de Curso. UFV - Universidade Federal de Viçosa. 36 pp. (2003)

<http://engmadeira.yolasite.com/resources/Monografia%20-%20Estocagem%20de%20madeira.pdf>

Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. C.E.C. Albuquerque; J.V.F. Latorraca. Floresta e Ambiente 7(1): 158 - 166. (2000)

http://www.if.ufrj.br/biolig/art_citados/Influ%C3%Aancia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas%20da%20madeira%20na%20penetra%C3%A7%C3%A3o%20e%20ades%C3%A3o%20de%20adesivos.pdf

Drying wood. J.E. Reeb. University of Kentucky Cooperative Extension Service. 08 pp. (1997)

<http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/for/for55/for55.pdf> (em Inglês)

Fundamentos de secagem de madeiras. I.P. Jankowsky. IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Documentos Técnicos nº 10. 09 pp. (1990)

<http://www.ipef.br/publicacoes/docflorestais/cap10.pdf>

Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. M.A. Rezende; J.F. Escobedo; E.S.B. Ferraz. IPEF 39: 33 - 40. (1988)

<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr39/cap04.pdf>

LIVRO: Wood-water relations. C. Skaar. Springer Verlag. (1988)

<http://www.springer.com/us/book/9783642736858> (em Inglês)

LIVRO: Secagem racional da madeira. A.P.M. Galvão; I.P. Jankowsky. Editora Nobel. (1985)

[https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=308382&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22GALVAO,%20A.P.M.%22&qFacets=autoria:%22GALVAO,%20A.P.M.%22&ort=&paginacao=t&paginaAtual=2](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=308382&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22GALVAO,%20A.P.M.%22&qFacets=autoria:%22GALVAO,%20A.P.M.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=2)

e

<http://www.martinsfontespaulista.com.br/secagem-racional-da-madeira-126802.aspx/p>

Drying wood: a review. Part I. W.T. Simpson. Drying Technology - An International Journal 2(2). 33 pp. (1983/1984)

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.528.4703&rep=rep1&type=pdf>
(em Inglês)

Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* var *hondurensis* para a produção de celulose kraft. L.E.G. Barrichelo. Tese Livre Docência. USP – Universidade de São Paulo. 173 pp. (1979)

<http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Estudo%20das%20caracteristicas.pdf>

Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. I.P. Jankowsky. Dissertação de Mestrado. USP – Universidade de São Paulo. 99 pp. (1979)

<http://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/jankowsky,ip-m.pdf>

Estrutura da madeira. C. Foelkel. Apostila de Curso. Mestrado em Celulose e Papel. CENIBRA/UFV. 85 pp. (1977)

<http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ufv/01.%20Estrutura%20da%20Madeira.%201977.PDF>

Variabilidade no sentido radial de madeira de *Pinus elliottii*. C.E.B. Foelkel; M. Ferreira; J.H. Nehring; M.B. Rolim. IPEF 10: 01 – 11. (1975)

<http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/IPEF/1975a%20%20variabilidade%20radial%20madeira%20de%20Pinus%20elliottii.pdf>

How wood dries. The influence of wood structure. E. Fritz. 6th Annual Meeting of Western Dry Kiln Clubs. 05 pp. (1954)

http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/6095/How_Wood_Dries_ocr.pdf?sequence=1 (em Inglês)

Madeira e água. Que ligação! DeMad – Departamento de Engenharia de Madeira. Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Apresentação em PowerPoint: 18 slides. (SD = Sem referência de data)

<http://www.marioloureiro.net/ciencia/biomass/MadeiraAgua.pdf>

Some aspects of wood moisture relations. A.P. Schniewind. 06 pp. (Sem referência de data e de fonte)

https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/6022/Some_Aspects_ocr.pdf?sequence=1 (em Inglês)

Chapter 1: Properties of wood related to drying. W.T. Simpson (Revisor). 41 pp. (Sem referência de data e de fonte)

<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/usda/ah188/chapter01.pdf> (em Inglês)



PinusLetter é um informativo técnico, com artigos e informações acerca de tecnologias florestais e industriais e sobre a Sustentabilidade das atividades relacionadas ao **Pinus** e a outras coníferas de interesse comercial

Coordenação e Redação Técnica - **Celso Foelkel**

Editoração - **Alessandra Foelkel**

GRAU CELSIUS: Tel.(51) 9947-5999

Copyrights © 2012-2016 - celso@celso-foelkel.com.br

A **PinusLetter** é apoiada por uma rede de empresas, organizações e pessoas físicas.

Conheça-os em http://www.celso-foelkel.com.br/pinusletter_apoio.html

As opiniões expressas nos artigos redigidos por **Celso Foelkel** e por outros autores convidados e o conteúdo dos websites recomendados para leitura não expressam necessariamente as opiniões dos patrocinadores, facilitadores e apoiadores.

Caso você queira **conhecer mais sobre a PinusLetter**, visite o endereço <http://www.celso-foelkel.com.br/pinusletter.html>

Descadastramento: Caso você **não queira continuar recebendo a PinusLetter**, envie um e-mail de cancelamento para foelkel@via-rs.net

Caso esteja interessado em **apoiar ou patrocinar** a PinusLetter, envie uma mensagem de e-mail demonstrando sua intenção para foelkel@via-rs.net

Caso queira se cadastrar para passar a receber as próximas edições da **PinusLetter** - bem como do **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, clique em **Registrar-se**

Para garantir que nossos comunicados cheguem em sua caixa de entrada, adicione o domínio **@abtcp.org.br** ao seu catálogo de remetentes confiáveis de seu serviço de mensagens de e-mail.

