



Apostila de Marcenaria

10 - Secagem de Madeiras



SECAGEM DA MADEIRA

1ª Aula

1. INTRODUÇÃO

1.1. ORIGEM DA ÁGUA NA MADEIRA E SUA LOCALIZAÇÃO

1.2. DEFINIÇÃO, IMPORTANCIA E RAZÕES PARA SECAR A MADEIRA

1.2.1. Definição

A secagem da madeira é uma técnica que visa a redução do seu teor de umidade, objetivando leva-la até um determinado ponto, com um mínimo de defeitos e no menor tempo possível. Para tanto deve valer-se de uma técnica que seja economicamente viável, tendo-se em mente o fim para o qual a peça da madeira se destina.

1.2.2. Importância e razões para secar a madeira

No Brasil, de um modo geral, esta prática além de ser pouco difundida, é também pouco utilizada por aqueles que vivem do ramo madeireiro. São raras as serrarias que possuem pátios de madeiras, e quando possuem são geralmente de baixa eficiência.

No caso de transporte de toras, prática ainda muito comum em nosso país, muita água é transportada para os lugares mais diversos, juntamente com a madeira, sem necessidade.

A simples prática da secagem da madeira ao ar livre poderia reduzir em 400 kg ou mais o peso da carga de madeira para cada m³ transportado. Desta forma os custos com frete e mão-de-obra poderiam ser sensivelmente reduzidos, sem contar que as áreas para secagem nos grandes centros de destino das cargas de madeira seriam também sensivelmente reduzidas.

Neste sentido, é que o entendimento desta prática faz-se necessário, não apenas para que o desenvolvimento da indústria de produtos madeireiros possa crescer de uma forma mais racional, mas também para que o nosso produto possa atingir uma melhor qualidade, capaz de competir com outros produtos do mercado internacional.

1.3. INFLUÊNCIA DA UMIDADE DA MADEIRA NAS SUAS CARACTERÍSTICAS

1.4. BENEFÍCIOS OBTIDOS AO SECAR A MADEIRA

Dentre as principais razões que levam a se adotar a prática de secagem da madeira podem ser destacadas as seguintes:

a) A redução na movimentação dimensional

A madeira tende a contrair-se conforme vai secando e expandir-se conforme absorve umidade. Uma secagem adequada até um determinado teor de umidade final, diminuirá a movimentação dimensional da peça evitando empenos ou rachaduras. Como consequência, as peças de madeira poderão ser produzidas com maior precisão de dimensões proporcionando melhor desempenho em serviço.

b) Redução dos riscos de ataque de fungos apodrecedores e manchadores

A madeira verde é uma das principais fontes de alimentos tanto para fungos quanto para os insetos. O ataque desses microrganismos pode comprometer seriamente as

propriedades mecânicas da madeira, além de alterar significativamente sua aparência, ocasionando uma redução no seu valor econômico. Madeiras com T.U. abaixo de 20% tornam-se praticamente imunes ao ataque destes organismos.

c) Redução de custos

A perda de água da madeira reduz sensivelmente seu peso e, conseqüentemente, seu custo de transporte diminuirá.

d) Melhoria na tratabilidade

Uma peça de madeira com T.U. de 20% será mais facilmente impregnada por produtos químicos preservativos ou retardantes de fogo, bem como aceitará mais facilmente pinturas, vernizes, ceras e outros materiais de acabamento.

e) Aumento da resistência mecânica

Em comparação com uma peça de madeira úmida, uma madeira previamente seca apresenta uma sensível melhora nas suas propriedades mecânicas, tais como: flexão estática, compressão, dureza, cisalhamento, etc... (exceções: tração perpendicular às fibras e resistência ao impacto).

f) Melhora nas características de trabalhabilidade

Uma madeira seca apresenta melhores resultados de aplainamento, lixamento, furação, etc...

g) Melhora nas propriedades de pega

Uma madeira úmida não permite uma boa aderência de produtos fabricados à base de cola ou colados. Exemplos: compensados, laminados, etc...

h) Fixação de pregos e parafusos

Pregos ou parafusos cravados em madeira úmida tendem a afrouxar com a secagem da madeira, por isso este tipo de prática deve ser efetuado após a secagem da peça. Com isso, juntas cravadas em madeira verde podem perder até metade da sua resistência.

i) Melhora nas propriedades de isolamento

Uma madeira seca conduz menos calor que uma úmida, além de aumentar sensivelmente suas propriedades de isolante elétrico e acústico.

Outros benefícios adicionais que podem ser obtidos ao se efetuar uma secagem controlada da madeira tanto em estufas quanto em secadoras são:

- O tempo gasto na secagem em comparação com a secagem ao ar livre é menor favorecendo um giro mais rápido do capital investido;
- Reduz a área destinada ao armazenamento da madeira;
- Podem obter-se teores de umidade mais baixos do que os obtidos com a secagem ao ar livre;
- Minimizar os defeitos de secagem como rachaduras, empenos, encanoamentos quando se utilizam programas adequados;
- Combate e elimina fungos e/ou insetos presentes na madeira.

2 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA

2.1 – UMIDADE DA MADEIRA

Uma árvore viva absorve água e sais minerais do solo que circulam por toda a planta até atingirem as folhas constituindo a seiva bruta. O processo inverso, das folhas até as raízes é feito pela seiva elaborada que é constituída basicamente de água e produtos elaborados na fotossíntese. Desta forma, a umidade de uma madeira recém cortada pode variar de 35% até 200% (*Ochroma pyramidale* pode atingir até 400%), variando de espécie para espécie.

Uma madeira nestas condições normalmente apresenta seus vasos, canais, meatos, bem como o lúmen das células saturados de água. Igualmente os espaços vazios localizados no interior da parede celular encontram-se saturados por água.

Partindo deste princípio podemos dizer que existem dois tipos de água na madeira.

2.2 – TIPOS DE ÁGUA NA MADEIRA

A secagem da madeira está diretamente relacionada com a sua estrutura celular. A estrutura celular da madeira de folhosas é diferente da estrutura de coníferas. Nas folhosas o lenho é composto de vários tipos de células: fibras, vasos, células parenquimáticas e raios. As coníferas são compostas basicamente por fibras (traqueídeos) e raios. Em comparação com as folhosas, as coníferas apresentam geralmente uma estrutura celular mais simples.

Podemos dizer que existem dois tipos de água na madeira:

2.2.1 – Água de capilaridade (água livre)

Localizada nos vasos, meatos, canais e lúmen das células. Teoricamente este tipo de água pode ser facilmente retirado. A água passa de uma célula para outra até atingir a superfície externa da madeira.

2.2.2 – Água de adesão ou higroscópica (água presa)

Localizada no interior das paredes celulares. Este tipo de água mantém-se unida às microfibrilas das paredes das células em estado de vapor. A retirada deste tipo de água é mais difícil e o processo geralmente é mais lento sendo necessário a utilização de energia neste processo.

2.3 – PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS

Quando toda a água livre ou de capilaridade foi retirada da madeira remanescendo apenas a água de adesão, diz-se que a madeira atingiu sua umidade de saturação do ar (USA) ou seu PSF. Normalmente o PSF situa-se numa faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie. O PSF é importante pois é a partir deste ponto que ocorrem as alterações na estrutura da madeira, tais como: contrações que podem causar defeitos como empenos e rachaduras e conseqüentemente alterações na sua resistência mecânica e física.

2.4 – TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO (TUE)

Em contrapartida, quando uma peça de madeira é seca previamente a 0% de umidade, e exposta ao meio ambiente, esta tende a absorver a água que está dispersa no ar em forma de vapor. Neste sentido a água absorvida irá corresponder a água higroscópica ou de adesão. Quando uma peça de madeira absorve água do meio ambiente e atinge um teor de umidade final, valor este que está em função da espécie e das condições do meio ambiente, diz-se que a madeira atingiu seu teor de umidade de equilíbrio com o ambiente (TUE).

2.5 – MOVIMENTO DA ÁGUA NA MADEIRA

Durante a secagem, o que ocorre normalmente com a água presente no interior da madeira é um movimento desta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, ou seja, a parte mais externa da madeira deverá estar mais seca que o seu interior para que ocorra a secagem. A água é liberada para o ambiente através das fibras e o processo de secagem é mais rápido quanto mais alta for a temperatura ambiente, menor for a umidade relativa do ar e maior for a velocidade deste mesmo ar que circula a madeira.

Diminuindo a umidade na superfície da madeira, dar-se-á início a uma movimentação da umidade do interior da madeira para sua parte externa. Desta forma começará a formar-se um gradiente de umidade, que significa entre outras palavras que a madeira irá apresentar diferentes graus de umidade desde a sua parte mais interna até a mais externa.

A umidade move-se no interior da madeira sob a forma líquida ou de vapor e a sua velocidade de movimentação depende basicamente da temperatura interna e externa da madeira. A água movimenta-se através de vários tipos de passagens tais como: as cavidades das fibras e vasos, células radiais, pontuações, aberturas e dutos de resina dentre outros.

A umidade pode deslocar-se praticamente em qualquer direção, tanto lateral quanto longitudinalmente. Entretanto a sua difusão no sentido longitudinal é de 10 a 15 vezes mais rápida que no sentido transversal, assim como a difusão no sentido radial é mais rápida que no sentido tangencial.

Ocorrendo uma secagem, na superfície da madeira, abaixo do PSF sem que o mesmo aconteça no seu interior poderão acontecer rachaduras na superfície e extremos desta peça de madeira.

Quando a madeira está secando, diversas forças agem na movimentação da umidade no seu interior, tais como:

- AÇÃO DA CAPILARIDADE: movimenta a água livre através das cavidades das células e pequenas aberturas na parede celular;
- DIFERENÇAS DA UMIDADE RELATIVA NO INTERIOR DA MADEIRA: estabelecem gradientes de umidade que movimentam o vapor de água por difusão;
- DIFERENÇAS NO TEOR DE UMIDADE: movimentam a água presa ou de adesão através de pequenas passagens nas paredes celulares, também por difusão.

2.6. EXPRESSÃO PARA CÁLCULO DA UMIDADE DA MADEIRA

2.6.1. Pressão de saturação

Imaginemos um recipiente fechado parcialmente preenchido com água. Com o auxílio de um aparelho para medir a pressão de vapor de água neste recipiente, poderíamos verificar que a uma determinada temperatura constante, a pressão de vapor de água se

elevaria à medida que a água fosse evaporando, até que esta atingisse um ponto de equilíbrio com o meio, além do qual não haveria mais evaporação da água, e sim a sua precipitação. A este ponto é que corresponde a pressão de saturação de vapor de água àquela temperatura.

Neste ponto, o ar dentro deste recipiente está com uma umidade absoluta de saturação, não podendo comportar mais umidade, sendo que se mais água evaporar, esta será condensada nas paredes do recipiente, mantendo desta forma o equilíbrio do meio. Entretanto, se a temperatura for elevada, a pressão de vapor também aumentará até atingir novo equilíbrio.

2.6.2. Umidade relativa do ar

Por que a quantidade de vapor de água existente no ar é expressa em termos de umidade relativa ? Esta quantidade de vapor de água poderia também ser chamada de umidade absoluta. Entretanto, se analisarmos que uma umidade absoluta de 160g/m^3 ($13,6\text{g/kg}$) a uma temperatura de 20°C pode representar um ambiente bastante úmido, podemos também afirmar que a 40°C este mesmo ambiente poderá estar bastante ressecado. É por isto que normalmente a umidade do ar é expressa em termos de umidade relativa.

A umidade relativa é definida como sendo a relação percentual entre a pressão parcial de vapor de água (P) e a pressão de saturação (P_s) à uma mesma temperatura.

$$UR = \frac{P}{P_s} \times 100$$

Exemplo:

1) A 24°C temos uma pressão de saturação (P_s) de $2,24\text{cmHg}$, uma umidade absoluta de saturação (U_{as}) de $21,8\text{g/m}^3$ ($18,96\text{g/kg}$) e uma pressão parcial de vapor de água (P) de $1,36\text{cm/Hg}$. A uma umidade absoluta (U_a) de $13,6\text{g/m}^3$ ($11,41\text{g/kg}$), qual seria a umidade relativa (UR) neste ambiente ?

$$UR = \frac{1,36}{2,24} \times 100 \quad (\text{R}) \quad UR = 60,7\%$$

ou

$$UR = \frac{U_a}{U_{as}} \times 100 \quad (\text{R}) \quad \frac{13,6}{21,8} \times 100 \quad (\text{R}) \quad UR = 61\%$$

2) Supondo um ambiente a 20°C de temperatura e 70% de umidade relativa, no qual teríamos uma umidade absoluta (U_a) de $10,33\text{g}$ de vapor de água para cada kg de ar seco. Nestas condições, cada kg de ar seco poderia conter um máximo de $14,75\text{g}$ de vapor de água para cada kg de ar seco, correspondendo a sua umidade absoluta de saturação (U_{as}). Assim, cada kg de ar seco poderia receber no máximo $4,42\text{g}$ de vapor de água. Porém, ao aumentarmos a temperatura deste ambiente para 40°C sua U_{as} passaria a ser de $49,11\text{g/kg}$, significando dizer que cada kg de ar seco teria condições de receber um máximo de $38,78\text{g}$ de vapor de água, o que representa um ambiente extremamente seco.

Tabela 01. Pressão de saturação de vapor de água e umidade absoluta de saturação a diferentes temperaturas (para uma pressão barométrica de 76,0 cmHg).
Livro do Jankowsky pg 25

Tabela 02. Pressão de saturação, umidade relativa do ar (UR) e umidade de equilíbrio da madeira (UEM) em função das temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido.

Livro do MIC/STI pg 10

2.6.3. Teor de umidade

A umidade da madeira é calculada em função da relação entre o seu peso úmido (Pu) ou o peso de água contida na madeira e o seu peso seco (Ps) em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até que este atinja um valor constante.

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{ou} \quad TU = \left(\frac{Pu}{Ps} - 1 \right) \times 100$$

2.6.4. Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido

2.7. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA

2.7.1. Método da secagem em estufa

É um dos métodos mais precisos para determinação do teor de umidade da madeira, porém é também aquele que requer um maior período de tempo. Utiliza a expressão anteriormente apresentada, além de utilizar uma estufa dotada de circulação forçada de ar e termostato para controle da temperatura entre 101 e 105°C , além de uma balança com precisão de $0,1\text{g}$.

Este método não é recomendável para determinação da umidade de madeiras que contenham materiais voláteis. Neste caso deve-se usar o método de Karl Fischer. Utiliza amostras de madeira de $2,5\text{cm}$ (direção da grã) retiradas à pelo menos 30cm de distância das extremidades da peça.

Exemplo: Uma amostra de madeira medindo $20 \times 2,5 \times 2,5\text{cm}$ com um peso inicial de 185g , apresentou após seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ um peso constante de 133g . Pergunta-se qual seu teor de umidade ?

$$TU = \frac{185 - 133}{133} \times 100 \quad \text{ou} \quad TU = 39,1\%$$

$$TU = \left(\frac{185}{133} - 1 \right) \times 100 \quad \text{ou} \quad TU = 39,01\%$$

2.7.2. Método dos medidores elétricos

São aparelhos de grande utilidade pois determinam a umidade imediata da madeira. Seu princípio está baseado na resistência a passagem de corrente elétrica que varia inversamente com a umidade da madeira. São muito práticos e rápidos não sendo

necessário cortar a madeira. Possuem agulhas que são introduzidas na madeira fornecendo a leitura analógica ou digital, dependendo do aparelho utilizado, através de um mostrador. São mais precisos dentro de uma faixa de umidade que varia entre 7 até 30%.

2.7.3. Método de destilação

O teor de umidade da madeira é determinado volumetricamente, utilizando-se produtos químicos específicos como xileno ou tolueno, que atuam como extratores por não se misturarem com a água contida na madeira. São mais indicados para madeiras que contenham extrativos voláteis.

2.7.4. Outros métodos

Além dos métodos anteriormente descritos, existem outros um pouco menos comuns, utilizados em situações mais específicas.

a) Método de Titulação Karl Fischer.

Este método fundamenta-se na determinação iodométrica da água que é removida da madeira por destilação.

b) Método Higrométrico

A umidade da madeira é determinada introduzindo-se um higrômetro em um orifício previamente aberto na madeira. Sela-se este orifício e após a umidade da madeira entrar em equilíbrio com o ar contido no seu interior, o teor de umidade da madeira é obtido.

c) Método da Radiação Nuclear

Utiliza um gerador de nêutrons de alta velocidade, os quais são dirigidos para a madeira. Parte destes nêutrons tem sua velocidade diminuída pelas moléculas de hidrogênio presentes nas moléculas de água, e a sua contagem é efetuada através de um detector. Como o teor de umidade é avaliado em função do peso da madeira, a sua densidade deve ser medida, sendo efetuada através de radiação gama. Para isso, um feixe de raios gama é dirigido para a madeira e a intensidade de radiação refletida através do material, que é inversamente proporcional a sua densidade, é medida por um detector. Os dados dos dois detectores combinados fornecem o teor de umidade da madeira.

3. PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA

3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROCESSO DE SECAGEM

O mecanismo de secagem da madeira pode ser explicado a partir de dois pontos distintos, quais sejam:

1º) A evaporação da água das camadas superficiais da madeira, que é absorvida pela atmosfera; e

2º) A movimentação da água das camadas internas da madeira para as camadas mais externas, até atingir a sua superfície.

Entretanto, estes dois fatores não ocorrem de um modo sincronizado e também não se encontram sob a influência dos mesmos fatores.

Desta forma pode-se dizer que a diferença entre a velocidade de evaporação da umidade superficial da madeira, e a velocidade de transfusão da umidade interna, ocasionam a maioria dos defeitos nas peças de madeira, como encanoamentos, empenamentos e outros. Assim, se a perda da umidade superficial for mais rápida que a transfusão interna da umidade, teremos uma secagem ineficaz, com o aparecimento de defeitos. Daí a necessidade de limitarmos a velocidade de movimentação da umidade das camadas internas da madeira.

Desta forma, ao efetuarmos a secagem de uma madeira que esteja com uma umidade:

1º) Acima do PSF, o movimento da água livre seguirá em geral as leis capilares, ou seja, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maior será a força de tração da coluna de água nestes capilares. Podendo então, surgirem defeitos durante a secagem.

2º) Abaixo do PSF a secagem é considerada geralmente como sendo um processo de difusão, ou seja, a água das camadas mais internas se difundem na forma de vapor preenchendo os espaços vazios deixados pela água livre, até atingirem a superfície da madeira por capilaridade.

Estas duas situações descritas são ilustradas na Figura X.

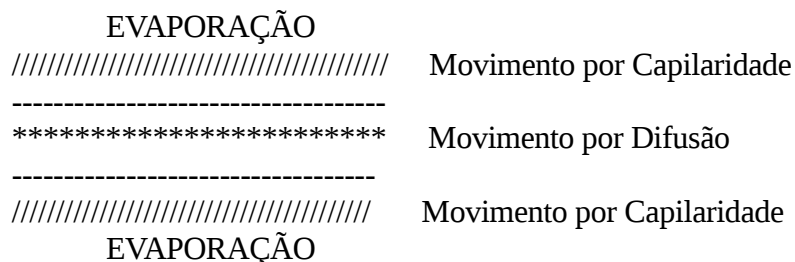


Figura X. Esquema representativo da movimentação da água em uma peça de madeira durante a sua secagem.

Desta forma, a secagem da madeira pode ser considerada como sendo um processo físico constituído, inseparadamente, de movimentos capilares e de difusão de vapor de água.

3.2. GRADIENTES DE SECAGEM

Gradiente de secagem ou também chamado Decurso de secagem, é o período de tempo que uma peça de madeira leva até atingir peso constante, ou seja, até ser considerada seca.

3.2.1. Para materiais porosos e não higroscópicos

Para estes tipos de materiais, como por exemplo a cerâmica, argila ou gesso, o decurso de secagem depende unicamente do gradiente das temperaturas interna e externa do material a ser seco. A Figura X representa graficamente o decurso de secagem para materiais desta natureza.

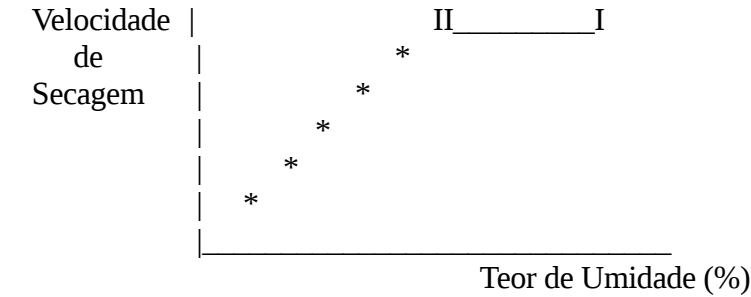
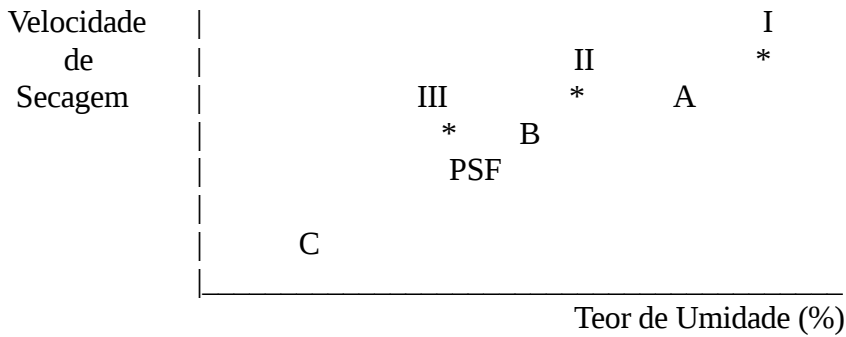


Figura X. Representação gráfica do gradiente de secagem para materiais porosos e não higroscópicos.

No ponto I, temos o início da secagem, com o movimento capilar (secagem superficial), até a superfície mais externa da madeira tornar-se seca atingindo o ponto II. Deste ponto em diante, a velocidade de secagem diminui progressivamente, pois a água do interior da peça precisa atravessar camadas mais espessas, até atingir a superfície externa.

3.2.2. Para materiais porosos e higroscópicos

Para materiais desta natureza, como por exemplo a madeira, o decurso de secagem ocorre de maneira diferente, como representado na Figura X.



A primeira etapa da secagem situa-se entre os pontos I até o II, representado pela Fase A. Nesta etapa, ocorre a evaporação da água livre contida nos espaços intercelulares das camadas superficiais da madeira.

A Segunda etapa ocorre entre os pontos II e III, representada pela Fase B. Nesta etapa, ocorre a evaporação da água das camadas mais abaixo da superfície da peça, onde os movimentos capilar e de difusão estão estreitamente ligados. Nesta fase nota-se a existência de um certo fator de resistência à evaporação.

No final da segunda etapa, toda a água livre terá sido liberada tendo, portanto, a madeira atingido o seu Ponto de Saturação das Fibras. Deste ponto em diante, há um aumento gradual do movimento de difusão, e uma conseqüente diminuição do teor de umidade da peça. Com isto, a resistência à evaporação cresce, fazendo com que a velocidade de secagem torne-se cada vez mais baixa.

3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE SECAGEM DA MADEIRA

A velocidade com que uma peça de madeira serrada seca, pode sofrer influência de determinados fatores, tanto internos, relacionados a própria madeira, como externos, relacionados às condições atmosféricas, sob as quais a peça de madeira estará sujeita.

3.3.1. Fatores internos

Dentre estes fatores, podem ser destacados como principais, os seguintes:

1º) Espécie de madeira

Algumas madeiras secam mais rapidamente que outras, em função da sua estrutura anatômica. Algumas espécies possuem vasos e/ou traqueídeos mais largos e abertos ou mais abundantes que outras espécies, favorecendo com isso, a circulação da umidade no seu interior e, conseqüentemente, a sua secagem.

Madeiras de coníferas, por exemplo, precisam, normalmente, de menos tempo para secar, do que madeiras de folhosas.

A massa específica da madeira serve como indicativo para a sua velocidade de secagem. Madeiras com maior massa específica, levam mais tempo para secar e vice-versa.

2º) Tipo de madeira

Peças com maior quantidade de alburno em geral secam mais rapidamente do que as com maior quantidade de cerne. Peças de madeira que possuam anéis de crescimento mais largos e ricos em lenho primaveril, apresentam maior velocidade de secagem do que a mesma espécie com anéis de crescimento finos e ricos em lenho juvenil.

3º) Teor de umidade inicial

Uma determinada espécie de madeira poderá apresentar diferentes velocidades de secagem ou diferentes tempos de secagem. Estas diferenças estão em função do teor de umidade inicial das peças a serem secas. Uma peça com teor de umidade inicial baixo levará um menor tempo para secar em relação a outra com um teor de umidade inicial mais elevado. Desta forma, KOLLMANN & CÔTÉ propõem a seguinte equação para estimar o tempo de secagem da madeira, em função do seu TUI juntamente com outros fatores.

$$T = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{U_i}{U_f} \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{k} \cdot (\ln U_i - \ln U_f) \quad \text{onde:}$$

— —

T = tempo (h)

k = coeficiente de secagem

folhosas = 0,0265

coníferas = 0,0477

Ui = teor de umidade inicial

Uf = teor de umidade final

ln = logaritmo natural (neperiano)

Assim sendo, pode-se dizer que quanto maior for a diferença entre a Ui e a Uf da madeira, maior será a duração da sua secagem.

Exemplo:

1) Qual o tempo necessário para secar tábuas de 25mm de espessura de uma conífera com massa específica igual a 0,45g/cm³ a 70% de umidade, em uma estufa à 65°C de temperatura, até esta atingir um teor de umidade de 10%.

$$T = \frac{1}{0,0477} \cdot \left(\frac{70 - 10}{10} \right) \cdot \ln(2) \quad \text{---} \quad T = 40,8 \text{ E } 41 \text{ horas}$$

4º) Espessura

O tempo de secagem pode ser estimado em função do quadrado da espessura da peça a secar. Para tanto, este tempo pode ser calculado em função da seguinte expressão:

$$\left(\frac{e_2}{e_1} \right)^2 \quad \text{onde:}$$

t₂ = tempo estimado de secagem da tábua de e₂ (horas ou dias)

t₁ = tempo conhecido de secagem da tábua de e₁ (horas ou dias)

e₂ = espessura da tábua 2

e₁ = espessura da tábua 1

Exemplo:

1) Sabendo-se que uma peça verde de 2,5cm de espessura de cedro levou 6 dias para secar até 10%. Quantos dias serão necessários para secar outra peça de 7,5cm nas mesmas condições ?

$$t_2 = 6 \times \left(\frac{7,5}{2,5} \right)^2 \quad \text{---} \quad t_2 = 54 \text{ dias}$$

5º) Orientação do corte

O fluxo ou movimentação da umidade no interior da madeira chega a ser de 10 a 15 vezes maior no sentido longitudinal do que no transversal. Já no sentido transversal, esta movimentação chega a ser de 20 a 50% maior no sentido radial em relação ao sentido tangencial.

6º) Cerne e alburno

Tanto para folhosas quanto para coníferas, o alburno seca mais rápido que o cerne, apesar de possuir um teor de umidade mais elevado. Isto se deve a sua alta permeabilidade em relação ao cerne, tendo em vista também, que o cerne apresenta maior quantidade de extrativos que podem obstruir as aberturas das paredes celulares.

7º) Massa específica

Quanto maior a massa específica, maior o tempo de secagem.

8º) Outros fatores

A presença de fungos manchadores e/ou apodrecedores dificultam o movimento da água no interior da madeira, pois o micélio destes fungos auxiliam o bloqueio da passagem da água. Além disso, a presença de resinas e outros extrativos, dificultam a movimentação de água e com isso aumentam o tempo de secagem da madeira.

3.3.2. Fatores externos

Os seguintes fatores podem estar relacionados com a velocidade de secagem da madeira:

1º) Temperatura

De maneira geral, quanto maior for a temperatura, maior será a velocidade de secagem. Entretanto, neste ponto, deve ser observado dois aspectos fundamentais. O primeiro relacionado a remoção da água livre, a qual não necessita de elevadas temperaturas, pois o seu efeito não influirá significativamente sobre a taxa de secagem. O segundo aspecto diz respeito a retirada da água de adesão (abaixo do PSF), a qual será influenciada diretamente pela temperatura. A elevação da temperatura provocará uma alteração na umidade relativa do ar, acelerando o processo de difusão, responsável direto pelo aumento da taxa de velocidade de secagem.

Na Tabela X são apresentados alguns exemplos de temperaturas máximas obtidas através de ensaios práticos, para secagem de algumas espécies de madeiras brasileiras.

Tabela X. Temperaturas máximas de secagem de algumas espécies de madeiras brasileiras obtidas através de ensaios práticos.

2º) Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar é a razão entre a quantidade de vapor de água contido num determinado volume de ar, em relação a sua umidade de saturação. Em outras palavras, é a quantidade de vapor de água que um determinado volume de ar contém a uma determinada temperatura. Desta forma, pode-se dizer que quanto mais baixa for a URA, mais umidade este poderá absorver da superfície da madeira, favorecendo a velocidade de secagem.

3º) Circulação do ar

Durante o processo de secagem, o ar seco que entra na estufa absorve a umidade da madeira. Caso este ar não circule, ele tenderá a entrar em equilíbrio com a carga de madeira, e o processo de secagem estabilizará. Por tanto, a circulação do ar dentro da estufa é muito importante pois a saída do ar úmido, sendo substituído pelo ar seco, dará sequência ao processo de secagem, com uma distribuição homogênea de calor por toda a pilha, transferindo energia para a superfície da madeira.

4ª Aula

4. SECAGEM CONTROLADA DA MADEIRA

A secagem da madeira pode ser feita de duas formas básicas, quais sejam: 1ª) sob condições naturais ou também chamada ao ar livre; e 2ª) através de estufas ou secadores. Neste capítulo será abordado apenas a secagem em estufas, ou também conhecidas como secadores industriais, as quais operam, em geral, a temperaturas inferiores a 100°C.

4.1. VANTAGENS EM RELAÇÃO A SECAGEM NATURAL

As principais vantagens da secagem em estufa em relação a secagem natural são:

- 1ª) Redução do período de tempo de secagem, possibilitando em última análise, um maior giro de capital;
- 2ª) Maior controle sobre os defeitos de secagem;
- 3ª) Possibilidade de eliminar ataques de fungos e insetos;
- 4ª) Redução da umidade da madeira a teores pré-determinados, em qualquer época do ano; e
- 5ª) Dispensar a utilização de grandes pátios necessários para secagem natural de grandes volumes de madeira.

4.2. VARIÁVEIS DIRETAMENTE RELACIONADAS COM O PROCESSO DE SECAGEM ARTIFICIAL

De um modo geral, uma estufa de secagem de madeira, deve possibilitar uma circulação mais rápida do ar no seu interior, temperaturas maiores que as do ambiente externo e uma variação controlada da umidade relativa no seu interior.

Desta forma, durante uma secagem em secadores, esses três fatores devem ser controlados de maneira rigorosa, a fim de permitir uma secagem adequada da madeira.

4.2.1. Circulação do ar

As finalidades básicas da circulação do ar no interior de uma estufa são:

- 1ª) Transferência de calor do sistema de aquecimento para o compartimento de secagem;
- 2ª) Distribuição de calor de maneira uniforme sobre todo este compartimento;
- 3ª) Misturar e condicionar o ar (UR e Temperatura) antes da sua passagem pela pilha de madeira; e
- 4ª) Remover a água da superfície da madeira.

Além disso, a circulação do ar pode ser feita de duas formas, quais sejam:

1ª) Circulação natural, a qual fundamenta-se no princípio de que o ar quente sobe e o ar frio desce. Desta forma, uma correta localização e controle das aberturas para entrada de ar seco e frio, bem como do ar quente e úmido, podem proporcionar uma adequada circulação do ar, o qual pode atingir uma velocidade de até 9m/min. (0,15m/s).

2ª) Circulação forçada, a qual pode ser obtida através de circuladores de ar acionados eletricamente, podendo atingir uma velocidade variando entre 21 até 120m/min. (0,35 até 2m/s). Sendo que velocidade ao redor de 2m/s apresenta-se como mais econômica e eficiente. Velocidades superiores e esta podem ser usadas, porém são mais indicadas para umidades iniciais elevadas.

De um modo geral, quanto mais espessa for a peça de madeira, maior deverá ser a umidade relativa inicial e mais baixa a temperatura utilizada, sendo menos vantajoso, do ponto de vista econômico, o aumento da velocidade do ar.

4.2.2. Temperatura (Sistema de aquecimento)

Por temperatura, deve-se entender a temperatura do ar, a qual sendo maior que a da madeira, permitirá que aconteça a transferência da energia para as peças, favorecendo desta forma, a difusão e capilaridade e consequentemente, a evaporação da água.

O aumento da temperatura influi na URA, ocasionando uma elevação da pressão de saturação do vapor de água. Desta forma, o ar poderá absorver mais vapor de água extraído da superfície da madeira.

O sistema de aquecimento de uma secadora pode ser feito a vapor, um dos mais utilizados, e a óleo térmico.

Em uma secagem artificial podem ser distinguidos dois tipos básicos de temperatura:

a) Temperatura de bulbo seco, que fornece a temperatura do ar no interior do secador; e

b) Temperatura de bulbo úmido, que possibilita calcular a umidade relativa do ar no interior do secador e a umidade de equilíbrio da madeira.

4.2.3. Umidade relativa do ar (Sistema de fornecimento de vapor)

A umidade relativa do ar está relacionada a dois fatores, quais sejam:

a) A capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água; e

b) A remoção da água das camadas superficiais da madeira.

O controle da umidade relativa do ar dentro de um secador, pode ser feito através de quatro diferentes maneiras, quais sejam:

a) Através do sistema de aquecimento;

b) Através do fornecimento de vapor;

c) Através da admissão de ar seco e frio do ambiente externo; e

d) Através da eliminação do ar úmido e quente do interior do secador.

O sistema de fornecimento de vapor consiste basicamente de uma caldeira ou gerador, cuja produção de vapor é controlada através de um termostato de bulbo úmido, semelhante ao de uma sauna. Desta forma, de acordo com a umidade relativa, ou do programa de secagem de um modo geral, uma maior ou menor quantidade de vapor de água é admitido no interior da câmara de secagem.

4.3. TIPOS DE SECADORES

De uma forma geral, as estufas podem ser classificadas quanto a sua forma de carregamento e quanto a circulação do ar no seu interior.

Quanto ao seu carregamento as estufas podem ser classificadas como câmaras progressivas ou de túnel e câmaras descontínuas ou de compartimento. Já quanto a circulação do ar elas podem ser classificadas como câmaras de circulação de ar natural e câmaras de circulação forçada.

5. PREPARAÇÃO DA CARGA NA SECADORA

É de fundamental importância para que se possa obter um bom desempenho da secagem. Obedecendo-se os critérios básicos, pode-se conseguir ao final da secagem, madeira sem empenamentos, com menores tensões de secagem, mais uniformes e possivelmente um processo de secagem mais rápida.

5.1. SELEÇÃO E ENTABICAMENTO

A seleção das peças de madeira simplifica a operação de entabicamento, bem como, auxilia na obtenção de peças com similaridade em características de secagem. A seleção pode ser feita de várias formas, sendo as principais descritas a seguir:

5.1.1. Seleção por espécie

Na medida do possível, o carregamento deve ser composto por uma só espécie de madeira, ou por espécies que apresentem características semelhantes.

5.1.2. Seleção por teor de umidade

Não é recomendável misturar num mesmo carregamento, peças parcialmente secas ao ar com peças consideradas verdes. As peças verdes requerem condições mais suaves de secagem inicial e também um tempo mais longo, em comparação com aquelas parcialmente secas.

5.1.3. Seleção por cerne e alburno

Normalmente, o cerne e o alburno apresentam diferentes teores de umidade. O alburno seca mais rapidamente que o cerne. Portanto, é vantajoso, sempre que possível, separar peças de cerne e de alburno, principalmente, quando está se processando grandes volumes de madeira.

5.1.4. Seleção por espessura

Esta prática simplifica o entabicamento e, conseqüentemente, a secagem pois reduz o empenamento das peças e dos tabiques. A falta de contato entre a tábua e o tabique, pode provocar empenos, como por exemplo, encanoamentos e torções, resultando em uma desuniformidade do fluxo de ar através da pilha de madeira.

5.1.5. Seleção por comprimento

Pilhas formadas com peças de diferentes comprimentos, podem dar origem a tábuas empenadas no final da secagem. Ao contrário, tábuas com o mesmo comprimento, bem apoiadas e alinhadas, facilitam a secagem, bem como, proporcionam uma maior estabilidade à pilha de madeira.

O uso de tabiques ou separadores, podem reduzir sensivelmente os empenamentos, assegurando uma secagem mais rápida e uniformes. Na Tabela X são apresentadas dimensões e distâncias entre separadores, em função da espessura das peças e da espécie de madeira que formará a pilha a secar.

Tabela X. Dimensões e distâncias entre separadores, relacionados com a espessura das peças e a espécie de madeira que compõem a carga a secar.

Espessura da peça (mm)	Dimensões dos tabiques (mm)		Distância entre tabiques (cm)	
	Espessura	Largura	Coníferas	Folhosas
< que 30	20 a 25	20 a 40	40 a 80	30 a 50
30 a 60	25 a 35	25 a 50	60 a 100	40 a 60
> que 60	30 a 40	40 a 80	80 a 120	50 a 80

5.2. AMOSTRAS CONTROLADORAS

São amostras de madeira previamente selecionadas, que servirão como representativas da carga à secar. Estas amostras são colocadas em locais adequados na pilha, de tal forma, que possam ser removidas, periodicamente, para serem pesadas, avaliadas e ensaiadas. Esta prática, apresenta uma desvantagem que é a de perder este material que irá ser analisado. Em compensação, ele pode apresentar inúmeras vantagens, tais como:

- Reduzir os defeitos de secagem;
- Obter um melhor controle do teor de umidade final desejado para a carga de madeira;
- Reduzir o tempo de secagem da carga de madeira;
- Melhorar a qualidade do material;
- Desenvolver programas de secagem em função do tempo;
- Localizar possíveis focos de problemas que podem afetar o bom desempenho da estufa;
- Reduzir o custo de secagem; e
- Obter um material mais uniforme e isento de tensões internas.

5.2.1. Número de amostras

Depende, principalmente, das condições e características de secagem, eficiência da estufa, uso final da madeira e nível de qualidade requerido. Entretanto, devido à existência de muitas variáveis envolvidas neste processo, o número de amostras também poderá ser determinado em função da experiência do operador da estufa. Porém, como regra geral, este valor poderá ser estimado através do volume de madeira a secar, sendo recomendado, de acordo com RASMUSSEN (1968), no mínimo 4 amostras para carregamentos de até 47m^3 ; e de 10 a 12 amostras para carregamentos acima de 236m^3 .

5.2.2. Seleção das amostras

As amostras selecionadas para serem analisadas deverão ser preferencialmente aquelas contendo porções mais pesadas (maior massa específica), úmidas, grossas e também, comparativamente, maior porcentagem de cerne. Para lotes de madeiras heterogêneas, é recomendado a retirada de uma amostra de cada espécie selecionada, a fim de assegurar-se uma boa representatividade do grupo.

Além disso, devem ser descartadas aquelas que apresentarem nós, medula e porções degradadas, exceto quando o material for de muito baixa qualidade. Entretanto, as seções que forem retiradas dessas amostras, deverão ser, preferencialmente, de madeira sã e isentas de casca.

5.2.3. Estimativa do Teor de Umidade Final e Tensões Internas

Concluído o período de secagem, o teor de umidade final e as tensões internas da carga, seca ao nível de teor de umidade preconizado no início da secagem, são determinados. Para tanto, são selecionadas três seções das amostras controladoras, de aproximadamente 10cm de comprimento, retiradas à 30cm das extremidades. Uma amostra servirá para determinar o teor de umidade médio da carga, determinado através da expressão:

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{onde:}$$

TU = teor de umidade (%)

Pu = peso úmido (g)

Ps = peso seco (g)

Outra amostra será utilizada para determinar a distribuição do teor de umidade na peça de madeira como um todo, para tanto, separam-se amostras pequenas do centro e da periferia da tábua. Estas pequenas amostras são pesadas separadamente, secas novamente em estufa e determinado seu teor de umidade. A terceira seção será utilizada para os ensaios de tensões internas, conforme ilustrado nas Figuras X1 e X2.

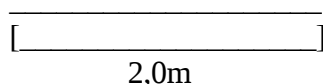
5.2.4. Registros de dados de secagem

Embora possam variar dependendo da situação em que a madeira for submetida a secagem, em geral, os dados a serem registrados, são os seguintes: espécie de madeira, classe, procedência, data de corte, teores de umidade, espessura, data de início da secagem, defeitos observados, método e duração da estocagem antes e depois da secagem em estufa e data da expedição da carga de madeira seca.

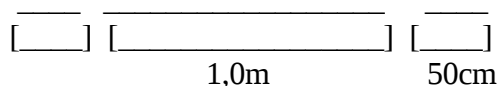
5.3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS CONTROLADORAS DE UMIDADE E SUA DETERMINAÇÃO AO LONGO DA SECAGEM

O método consiste em efetuar pesagens constantes, a partir de amostras de madeira previamente selecionadas, ao longo do período de secagem. Para tanto, devem ser seguidas as etapas a seguir apresentadas,:

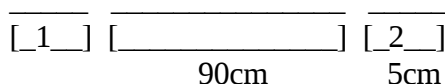
1ª) Peça inteira



2ª) Desprezar as extremidades da peça



3ª) Selecionar amostras para determinação do teor de umidade em estufa a 103±2°C.



4ª) Determinar o teor de umidade das amostras 1 e 2 através da expressão:

$$TU = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100$$

5ª) Calcular a média do teor de umidade entre as duas amostras 1 e 2

$$TU_{\text{médio}} = \frac{TU_1 + TU_2}{2}$$

6ª) Determinar a massa da amostra A

$$\left[\frac{\text{A}}{90\text{cm}} \right] \quad M_A = X \text{ gramas}$$

7ª) Admitir que o TU médio é o teor de umidade da amostra A

$$\left[\frac{\text{A}}{\text{A}} \right] \quad TU_{\text{médio}} = X\% \quad M_A = X \text{ gramas}$$

8ª) Calcular a massa da amostra A para um teor de umidade a 0% (massa seca) através da expressão:

$$M_f = \frac{M_i}{1 + \frac{TU_m}{100}} \quad \text{onde:}$$

M_f = massa final (g)

M_i = massa inicial (g)

TU_m = teor de umidade médio (%)

9ª) Determinar o teor de umidade da amostra a qualquer momento, através da seguinte expressão:

$$U_t = \left(\frac{M_t}{M_f} - 1 \right) \times 100 \quad \text{onde:}$$

U_t = TU da amostra a qualquer momento (%)

M_t = massa da amostra a qualquer momento (g)

5.3.1. Exemplo prático

Pinus elliottii espessura = 25mm; comprimento = 2m; largura = 10cm

As etapas 1, 2 e 3 são as mesmas descritas no item 5.3.

4ª) Amostra 1: massa úmida = 42g; massa seca = 16g

$$TU_1 = \frac{42 - 16}{16} \times 100 \quad TU_1 = 162,5\%$$

Amostra 2: massa úmida = 45g; massa seca = 17g

$$TU_2 = \frac{45 - 17}{17} \times 100 \quad TU_2 = 164,7\%$$

5ª) Teor de umidade médio entre as amostras 1 e 2

$$TU_{\text{médio}} = \frac{162,5 + 164,7}{2} \quad TU_{\text{médio}} = 163,6\%$$

6ª) Massa da amostra A

$$M_A = 405g \quad TU_{\text{médio}} = 163,6\%$$

7ª) Massa final da amostra A a 0% de teor de umidade

$$M_f = \frac{405}{1 + \frac{163,6}{100}} \quad M_f = 153,6g$$

8ª) Supondo que após 2 dias de secagem a massa (M) da amostra A seja de 300g, qual será o seu teor de umidade ?

$$U_{2 \text{ dias}} = \left(\frac{300}{153,6} - 1 \right) \times 100 \quad U_{2 \text{ dias}} = 95,3\%$$

9ª) Supondo que após uma semana de secagem a massa (M) da amostra A seja de 170g, qual será o seu teor de umidade ?

$$U_{1 \text{ semana}} = \left(\frac{170}{153,6} - 1 \right) \times 100 \quad U_{1 \text{ semana}} = 11\%$$

6. PROGRAMAS DE SECAGEM

Consistem basicamente de uma sequência previamente estudada de temperatura e umidade relativa, as quais visam a redução, mais rápida possível, da umidade da madeira até um teor pré determinado, com o menor número de defeitos possíveis.

O teor de umidade da madeira e o período de tempo decorrido desde o início da secagem, são os parâmetros que regulam a passagem de uma etapa para outra.

6.1. TIPOS DE PROGRAMAS DE SECAGEM

Basicamente existem três tipos de programas de secagem, a saber: a) umidade – temperatura; b) tempo – temperatura e c) baseados no gradiente de secagem.

6.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROGRAMAS

6.2.1. Umidade – Temperatura

Os parâmetros adequados de temperatura e umidade relativa a serem utilizados num programa de secagem são determinados em função da fase de secagem na qual a madeira se encontra. Sabe-se, por exemplo, que altas temperaturas e baixas umidade relativas proporcionam uma rápida redução da umidade da madeira, entretanto, estes parâmetros também podem significar sérios problemas de secagem. Desta forma, durante um programa de secagem, três etapas distintas são reconhecidas:

1ª Etapa: Fase de Aquecimento Inicial

Nesta fase o processo de secagem ainda não foi propriamente iniciado. Aquece-se o ar no interior da estufa até a temperatura de bulbo seco desejada. Normalmente utilizam-se umidades relativas elevadas acima de 85%. Também nesta fase procura-se equilibrar a temperatura a temperatura entre o ar e a madeira.

Após atingir a temperatura de bulbo seco desejada no interior da estufa, inicia-se a fase de aquecimento da madeira. A duração desta fase está em função da espessura da peça. HILDEBRAND (1970) sugere uma hora de aquecimento para cada centímetro de espessura da peça de madeira a secar.

A diferença higrométrica ($t_s - t_u$), tanto para o aquecimento do ar, quanto para o da madeira, não deve ser superior a 2°C, principalmente para madeiras suscetíveis a defeitos.

2ª Etapa: Fase de Secagem Propriamente Dita

Nesta fase inicia-se o processo de remoção da umidade da madeira. Utilizando-se baixas temperaturas em torno de 40° a 60°C, remove-se inicialmente a água livre ou capilar. Umidades elevadas devem ser utilizadas para se evitar possíveis colapsos ou rachaduras. Umidades acima de 85% são indicadas para espécies de difícil secagem, podendo a mesma ser reduzida a medida que a madeira vai perdendo sua umidade.

RASMUNSSEM (1968) aconselha iniciar a redução da umidade relativa após a madeira ter perdido, pelo menos, um terço da sua umidade inicial.

A temperatura inicial do termômetro de bulbo seco (t_s) deve ser mantida até que toda a água livre tenha sido removida, sendo que os valores máximos para a temperatura variam de acordo com a espessura da madeira. Quanto maior a espessura, menor a temperatura. Nesta fase, apesar das baixas temperaturas e altas umidades relativas, o processo de remoção da água livre ocorre de forma relativamente rápida.

Para a retirada da água de adesão ou higroscópica, utilizam-se temperaturas mais elevadas e umidades relativas mais baixas de forma simultânea. A temperatura poderá ser

elevada de forma mais rígida, quando o centro das peças atingir um teor de umidade de aproximadamente 30%.

Para madeiras de folhosas que não serão usadas em situações que exijam sua resistência máxima, como por exemplo para escadas, cabos de armas de fogo, raquetes de tênis, aviões, etc., as temperaturas podem variar entre 81°C até 92°C. Fora dessas situações, deve-se dar preferência a temperaturas mais baixas.

O período de tempo necessário para a remoção da água higroscópica pode variar em função de fatores tais como: massa específica da espécie, espessura da peça, temperatura e do gradiente de umidade dentre outras.

3ª Etapa: Fase de Igualação (equalização) e Acondicionamento

Dependendo do material e do processo de secagem, esta etapa poderá ser dispensada.

A equalização visa reduzir a variação de umidade que existe entre as peças de madeira da carga, tendo em vista que, ao final da secagem, nem todas as peças encontram-se com o mesmo teor de umidade. Quando o resultado final da secagem for considerado bom, ainda assim, existirá uma variação em torno de 2% entre uma peça e outra. A dificuldade em se obter uma equalização aumenta com o teor de umidade final desejado.

O acondicionamento objetiva, principalmente, a eliminação das tensões internas, decorrentes da remoção da água da madeira. Peças de madeira que forem desdobradas novamente após a secagem, devem receber este tratamento, o qual consiste, basicamente, em elevar de forma significativa a umidade relativa das peças de forma a umedecer as camadas superficiais das peças e desta forma, suavizar o gradiente de secagem estabelecido durante o processo de secagem.

6.2.2. Programa de Tempo – Temperatura

São programas fundamentados basicamente no período de tempo no qual a carga de madeira deverá permanecer sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa. São mais utilizados para coníferas ou madeiras com uma estrutura anatômica mais uniforme. Programas desta natureza, tornam necessárias constantes determinações do teor de umidade da madeira. A elaboração destes programas tem sido, tradicionalmente, um processo de sucessivas tentativas e erros.

6.2.3. Programas Fundamentados no Gradiente de Secagem

O gradiente de secagem ou também chamado de potencial de secagem, é a relação existente entre o teor de umidade médio da madeira e o teor de umidade de equilíbrio correspondente às condições do secador, em um determinado momento. O gradiente de secagem pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$GS = \frac{TUm}{TUE} \quad \text{onde:}$$

GS = Gradiente de secagem

TUm = Teor de umidade médio da madeira (%)

TUE = Teor de umidade de equilíbrio da madeira (%)

Exemplo:

1) Uma carga de madeira em secagem apresenta um teor de umidade médio igual a 20%, em uma estufa cuja temperatura de bulbo seco é de 60°C e de bulbo úmido de 44°C, correspondendo a um teor de umidade de equilíbrio de 6%. Qual será o gradiente de secagem desta carga de madeira?

$$GS = \frac{20}{6} \quad (\text{R}) \quad GS = 3,3$$

Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968) o gradiente de secagem varia de espécie para espécie, com valores variando entre 1,6 até 3,5 como segue:

$$1,6 - 1,8 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5$$

Exemplos de gradientes de secagem de algumas espécies:

Carvalho e Eucalipto: 1,6 a 1,8

Pinus: 3,0 a 3,5

Araucária: 2,0

Exemplo:

1) Com a Araucária apresentando um gradiente de secagem igual a 2,0 e um teor de umidade médio de 20%, qual será seu teor de umidade de equilíbrio?

$$GS = \frac{TUm}{TUE} \quad (\text{R}) \quad TUE = \frac{TUm}{GS}$$

$$TUE = \frac{20}{2} \quad (\text{R}) \quad TUE = 10\% \quad (ts - tu)$$

6.3. ESCOLHA DO PROGRAMA

Quando não houver um programa definido para uma determinada espécie deve-se, primeiramente, estudar em detalhe as características da espécie a secar, bem como, a finalidade para a qual ela se destina. Assim, dentre outras características que devem ser analisadas, previamente, salienta-se as seguintes:

- Massa específica;
- Coeficiente de difusão;
- Prováveis defeitos de secagem;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras e;
- Instabilidade dimensional.

Além destas características, devem ser consideradas também, a espessura e o número de peças a secar. De posse desses dados e através da comparação destes com os de uma outra espécie cujo programa já foi estudado e definido, pode-se determinar um programa que seja mais adequado para esta espécie.

Quando, dentre uma carga de madeira a secar, tivermos espécies com características diferentes das acima relacionadas, a melhor atitude a ser tomada será a de escolher um programa de secagem mais suave, que corresponda à espécie de madeira que apresente maior dificuldade de secagem.

6.4. PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS BRASILEIRAS

No início dos estudos de programas de secagem para madeiras brasileiras, grande parte dos programas foram estudados e definidos no exterior por pesquisadores estrangeiros.

Na Tabela 01 é apresentado um exemplo de um programa de secagem para a espécie Imbuia (*Phoebe porosa*), de acordo com uma seqüência previamente estudada de temperaturas (T3) e de diferenças higrométricas (D1), representando as diferenças entre as temperaturas de bulbo seco (ts) e bulbo úmido (tu).

Na Tabela 02 são apresentadas algumas seqüências de temperaturas para secagem de coníferas, de acordo com o teor de umidade da madeira no início de cada etapa, a serem utilizados na elaboração de programas de secagem, como o apresentado na Tabela 01.

Nas Tabelas 03 e 04 são apresentadas algumas seqüências de diferenças higrométricas (ts - tu) para folhosas e coníferas, respectivamente, a serem utilizadas na elaboração de programas de secagem, como o apresentado na Tabela 01.

TABELA 01. Programa T3-D1 para madeira de Imbuia com 50mm de espessura.

Umidade da Madeira (%)	Fases de Secagem	Temperatura (°C)			
		Diferença			UR
Acima de 50		Ts	Tu	1,5	91,0
50	Aquecimento Inicial	43,0	41,0	2,0	89,0
40		43,0	40,0	3,0	83,0
35		43,0	37,5	5,5	73,0
30	Secagem Propriamente Dita	49,0	35,0	14,0	35,0
25		54,0	26,5	27,5	9,0
20		60,0	32,0	28,0	4,0
15	Uniformização e Condicionamento	71,0	43,0	28,0	4,0

Nas Tabelas 05 e 06 são apresentadas algumas seqüências de temperaturas e depressões de bulbo seco e úmido, respectivamente, para secagem de madeiras em estufas convencionais.

TABELA 02. Seqüências gerais de temperaturas para coníferas e folhosas, a serem utilizadas na elaboração de programas de secagem sugeridos na Tabela 07.

Teor de umidade da madeira no início da etapa	Temperatura do Termômetro de Bulbo Seco (°C)										
Acima de 30	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
30	38,0	38,0	43,5	43,5	49,0	49,0	54,5	54,5	60,0	60,0	60,0
25	40,5	43,5	49,0	49,0	54,5	54,5	60,0	60,0	65,5	65,5	71,0
20	40,5	49,0	54,5	54,5	60,0	60,0	65,5	65,5	71,0	71,0	71,0
15	46,0	54,5	60,0	60,0	65,5	65,5	71,0	71,0	71,0	76,5	76,5
	49,0	65,5	71,0	82,0	71,0	82,0	71,0	82,0	71,0	82,0	82,0

Fonte RASMUSSEN (1968)

TABELA 03. Sequências de diferenças higrométricas ($t_s - t_u$) para folhosas, a serem utilizadas na elaboração de programas de secagem.

Classes de Teor de Umidade

A	B	C	D	1 2 3 4 5 6					
Acima de 30	Acima de 35	Acima de 40	Acima de 50	Diferenças Higrométricas (°C)					
30	35	40	50	1,5	2,0	2,5	4,0	5,5	8,5
25	30	35	40	2,0	2,5	4,0	5,5	8,0	11,0
20	25	30	35	3,5	4,5	6,0	8,5	11,0	16,5
15	20	25	30	5,5	8,0	10,5	14,0	19,5	28,0
10	15	20	25	14,0	16,5	19,5	22,0	28,0	28,0
				28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0

Fonte RASMUSSEN (1968)

TABELA 04. Sequências de diferenças higrométricas ($t_s - t_u$) para coníferas, a serem utilizadas na elaboração de programas de secagem.

Classes de Teor de Umidade

A	B	C	D	1 2 3 4 5 6					
Acima de 30	Acima de 35	Acima de 40	Acima de 50	Diferenças Higrométricas (°C)					
30	35	40	50	1,5	2,0	2,5	4,0	5,5	8,5
25	30	35	40	2,0	2,5	4,0	5,5	8,0	11,0
20	25	30	35	3,5	4,5	6,0	8,5	11,0	14,0
-	20	25	30	5,5	8,0	8,5	11,0	14,0	16,5
-	-	20	25	8,5	11,0	11,0	14,0	16,5	19,5
-	-	-	20	11,0	14,0	14,0	16,5	19,5	19,5
-	-	-	20	14,0	16,5	16,5	19,5	19,5	19,5
15	15	15	15	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0

Fonte RASMUSSEN (1968)

TABELA 05. Sequências de temperaturas para secagem de madeiras em estufas convencionais.

Temperatura de Bulbo Seco (°C)

Etapa	T.U. (%)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
		38	38	43	43	49	49	54	54	60	60	66	71	77	82
2	30	40	43	49	49	54	54	60	69	66	66	71	77	82	88
3	25	40	49	54	54	60	60	66	66	71	71	71	77	82	88
4	20	46	54	60	60	66	66	71	71	71	77	77	82	88	93
5	15	49	66	71	82	71	82	71	82	71	82	82	82	88	93

TABELA 06. Sequências de depressões de bulbo úmido para secagem de madeiras em estufas convencionais.

Etapa	T.U. no Início de cada Etapa (%)						Depressão de Bulbo Úmido (°C)					
	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6
1	> 30	> 35	> 40	> 50	> 60	> 70	1,7	2,2	2,8	3,9	5,6	8,3
2	30	35	40	50	60	70	2,2	2,8	3,9	5,6	7,8	11,1
3	25	30	35	40	50	60	3,3	4,4	6,1	8,3	11,1	16,1
4	20	25	30	35	40	50	5,6	7,8	10,6	13,9	19,4	27,8
5	15	20	25	30	35	40	13,9	16,7	19,4	22,2	27,8	27,8
6	10	15	20	25	30	35	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8

A Tabela 07 apresenta alguns programas de secagem para madeiras brasileiras de acordo com as seqüências apresentadas nas Tabelas 02, 03, 04, 05 e 06.

TABELA 07. Programas de secagem de madeiras brasileiras.

Nome Científico	Nome Comum	Espessura das Peças (cm)	
		2,5 a 3,8	5,0
<i>Araucaria angustifolia</i>	Pinheiro do Paraná	T3-D2	T3-D1
<i>Carapa guianensis</i>	Andiroba	T3-C2	T3-C1
<i>Cariniana</i> sp.	Jequitibá	T3-D2	T3-D1
<i>Cedrela fissilis</i>	Cedro	T10-D4S	T8-D3S
<i>Eucalyptus maculata</i>	<i>Eucalyptus maculata</i>	T3-C2	T3-C1
<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	T3-C2	T3-C1
<i>Grevillea</i>	Grevillea	T3-C2	T3-C1
<i>Paratecoma peroba</i>	Peroba	T3-D2	T3-D1
<i>Phoebe porosa</i>	Imbuia	T6-D2	T3-D1
<i>Pinus caribaea</i>	<i>Pinus caribaea</i>	T10-D4S	T8-D3S
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	T10-D4S	T8-D3S
<i>Swietenia macrophylla</i>	Móгно	T6-D4	T3-D3
<i>Tectona grandis</i>	Teca	T10-D4S	T8-D3S
<i>Vochysia</i> sp.	Quaruba	T2-D4	T2-D3

S: Indica que a tabela de coníferas deve ser usada para as diferenças higrométricas. Fonte: British Forest Products Laboratory (1959).

A Tabela 08 apresenta os programas de secagem utilizados pelo Laboratório de Produtos Florestais (LPF/IBAMA) para o estudo de madeiras brasileiras.

TABELA 08. Programas de secagem utilizados pelo LPF/IBAMA para estudo de madeiras brasileiras.

PROGRAMA A – FORTE				
T.U. (%)	Temperatura	Grupo	U.F.	Potencial
Saturada até 30	70	02	10	-
30 – 25	70	02	6,9	04
25 – 20	80	01	5,6	04
20 – 15	80	01	4,4	04
15 – 10	80	01	3,1	04
Acondicion.	80	-	14	-
PROGRAMA B – MÉDIO				
Saturada até 30	60	03	13,3	-
30 – 25	60	03	9,2	03
25 – 20	70	03	7,5	03
20 – 15	70	02	5,8	03
15 – 10	70	03	4,2	03
Acondicion.	70	-	14	-
PROGRAMA C – SUAVE				
Saturada até 30	50	06	16,3	-
30 – 25	50	06	13,8	02
25 – 20	60	05	11,3	02
20 – 15	60	05	8,8	02
15 – 10	60	05	6,3	02
Acondicion.	60	-	14	-

9 – ARMAZENAMENTO DA MADEIRA

Esta é uma das principais etapas do processamento da madeira. Desde o seu abate até o uso final, a madeira passa por várias etapas de armazenamento. Durante este período, as peças de madeira, sejam elas verdes ou secas, devem receber um cuidado todo especial. O principal deles é o controle do teor de umidade. Mudanças bruscas no TU podem ocasionar sérias perdas originadas de possíveis defeitos ou ainda pelo ataque de microrganismos xilófagos (fungos e insetos).

Exemplo:

- variação rápida e desigual do TU pode ocasionar rachaduras e empenos.
- se o TU ultrapassar os 22% a madeira estará sujeita a deterioração.

9.1 Técnicas para Armazenagem de Madeiras

A madeira quando armazenada deve receber alguns cuidados especiais, estando ela verde ou seca, bruta ou beneficiada ou ainda empilhada adequadamente ou não.

Os principais cuidados que se deve Ter com a madeira à armazenar são basicamente dois, quais sejam:

1º) Protegê-la contra a ação das intempéries.

Existem situações em que a madeira é empilhada sem tabiques ou separadores. Nestas situações a água da chuva fica armazenada nos pequenos espaços entre as tábuas, favorecendo o aparecimento de fungos manchadores ou emboloradores.

2º) Protegê-la contra a ação dos organismos xilófagos.

Neste caso, independentemente da dimensão e forma da madeira ou ainda da maneira como ela foi armazenada, deve-se, na medida do possível, efetuar um tratamento químico temporário para poder protegê-la contra a ação destes microrganismos.

9.2 Tipos de Armazenagem de Madeira Serrada

A escolha do tipo adequado de armazenagem vai depender dentre outros fatores, do teor de umidade final desejado; das condições climáticas locais e das condições financeiras para investimento da empresa.

Na prática existem vários tipos de armazenagem de madeira serrada, porém os principais são a armazenagem ao ar livre e a armazenagem em galpões.

Para a armazenagem em galpões existem dois tipos de estruturas, os galpões abertos e os fechados, sendo que estes últimos podem apresentar ainda as seguintes características: sem aquecimento, com aquecimento e com ar condicionado.

9.3 Armazenagem ao Ar Livre

Nesta prática de armazenagem da madeira, deve-se ter o cuidado de escolher um local bem drenado, ventilado, livre de vegetação ou detritos que possam restringir a movimentação do ar principalmente ao nível do solo e também locais que não apresentem riscos de incêndios. As pilhas de madeira devem ser colocadas sobre suportes a uma distância mínima de 40 a 50 cm do solo.

Preferencialmente, a madeira seca quando for armazenada ao ar livre deve apresentar um teor de umidade igual ou superior à umidade de equilíbrio do local (Temperatura x UR do local).

Se a madeira seca a ser armazenada tiver um TU abaixo da UE local, esta tenderá a absorver umidade. Esta absorção será tanto maior quanto maior for a diferença entre o TU da madeira e a UE local.

Quando o TU da madeira for menor que 20%, deve-se dar preferência ao empilhamento sem tabiques, tendo-se sempre o cuidado de proteger bem a pilha contra a chuva. O acúmulo de água pode proporcionar o aparecimento de fungos, por isso, o uso de lonas plásticas ou outro material impermeável é recomendado.

Quando o TU da madeira for maior que 20% é recomendado o empilhamento com tabiques ou separadores, conforme visto na secagem ao ar livre.

Para madeiras secas em estufas com TU acima de 20% é recomendado um empilhamento sem tabiques, também conhecido como pilhas sólidas, pois a tendência é da madeira absorver umidade, principalmente, nos dias frios e nos períodos úmidos. Entretanto, não deve se esquecer de proteger bem as pilhas contra a água da chuva, usando-se lonas plásticas ou outros tipos de plásticos.

9.4 Armazenagem em Galpões

A estocagem em galpões promove uma maior e melhor proteção à madeira em relação àquelas estocadas ao ar livre. Além de fornecerem uma maior proteção contra as intempéries, os galpões dispensam gastos extras com lonas para coberturas temporárias e com mão de obra para colocação, retirada e manutenção deste tipo de cobertura.

Basicamente existem dois tipos de galpões:

9.4.1 Galpões abertos

Como o próprio nome diz, são aqueles que não possuem paredes laterais, entretanto, existem alguns que podem ser abertos em um ou mais lados, permanecendo os demais fechados.

São excelentes para a proteção de madeira verde ou parcialmente seca. Dependendo das condições climáticas locais, podem ser usados inclusive para armazenar madeiras secas em estufas. Porém, não são recomendados para madeiras com TU inferior a 12 ou 15%.

Da mesma forma que nos casos anteriores, se a madeira a ser estocada tiver mais que 20% de TU, esta deverá ser entabizada para dar continuidade ao processo de secagem. Ao contrário, se a madeira apresentar um TU abaixo de 20%, as pilhas sólidas são as mais recomendadas.

Neste caso, como há uma proteção contra as intempéries, os riscos de ocorrerem fendilhamentos ou rachaduras são menores.

Este tipo de galpão deve ser localizado preferencialmente em áreas bem ventiladas e drenadas. O espaço ocupado pelo galpão deve ser grande suficiente para permitir as operações de carga e descarga, e se possível, com beirais bem largos que evitem chuvas de vento e insolação direta nas laterais das pilhas. Além disso, as pilhas devem ficar apoiadas sobre suportes estáveis espaçados pelo menos 30 cm do solo, permitindo uma boa ventilação entre o piso e a base da pilha.

Figura 17 página 40 Varlone

9.4.2 Galpões fechados

São os mais indicados para armazenagem de qualquer tipo de madeira, desde verde ou parcialmente verde, seca ao ar livre ou em estufa. São os que oferecem melhor proteção contra as intempéries.

Madeiras verdes ou parcialmente secas devem ser entabicadas, sendo que nestas condições, os riscos de aparecerem defeitos de secagem são mínimos.

Madeiras com TU superior a 20% devem ser entabicadas, e em caso contrário (menor que 20%), a madeira poderá ser empilhada sem separadores. Caso se queira continuar secando a madeira, deve-se usar os separadores e eventualmente também ventiladores, os quais promoverão a movimentação do ar entre as pilhas.

Madeiras secas em estufas, sujeitas a absorver umidade nos períodos chuvosos, portanto, o uso ou não de tabiques, dependerá do período de estocagem da madeira no galpão. Caso a madeira for empilhada com separadores, isso promoverá uma aceleração na absorção de umidade.

Madeiras com TU em torno de 10 a 12% quando estocadas em galpões com alta umidade relativa, por longo período, poderão apresentar defeitos tais como: inchamento de toda ou parte da peça, empenamentos, rompimento da linha de cola em painéis, dentre outros, mesmo quando empilhados sem separadores.

Este tipo de galpão poderá ainda ser aquecido através de serpentinas a vapor ou resistências elétricas, permitindo a elevação da temperatura que provocará uma diminuição na URA e conseqüentemente na UE. Neste caso, como a temperatura requerida é de 5 a 10°C acima da temperatura ambiente faz-se necessário o uso de ventiladores para a circulação do ar, porque a quantidade de calor requerida não é muito grande.

Para madeiras secas em estufa até 12% de umidade, os galpões fechados com aquecimento são os mais indicados, pois pode manter-se o TUE do galpão bem próximo ao TU da madeira com uma mínima influência do TUE externo ao galpão.

O uso de aparelhos de ar condicionado em galpões fechados, é outra forma que se dispõem para fixar a UE do galpão bem próximo ao TU da madeira.

Numa situação desta, o ar é resfriado e forçado a passar através de um trocador de calor. Quando o ar é resfriado, ele perde umidade por condensação, desta forma, a UR dentro do galpão baixa, conseguindo-se desta forma, manter um controle quase que preciso da URA dentro do galpão, através da manipulação destes aparelhos (ligando e desligando-os).

Entretanto, a escolha do melhor sistema de armazenagem sempre estará em função dos seguintes fatores:

- a) TU desejado;
- b) condições climáticas locais e;
- c) possibilidades de investimento da empresa.

Figura 18 página 41 Varlone