



Centro Universitário de União da Vitória

Centro Universitário de União da Vitória

União da Vitória | São Mateus do Sul | Paraná

Telefones: 42.3522.1837 | 42.3532.6154

www.uniuv.edu.br

Secagem da Madeira

APOSTILA
Versão 2013

Prof. Peterson Jaeger

Conteúdo

1. Introdução
2. Teor de umidade da madeira
3. Movimentação da água na madeira
4. Fatores inerentes à madeira que afetam a secagem
5. Fatores externos que afetam a secagem da madeira
6. Secagem ao livre ou natural
7. Amostras controladoras de secagem
8. Defeitos de secagem
9. Programas de secagem
10. Programas de secagem baseados no potencial de secagem
11. Dimensionamento de secadores

1

Introdução

O conceito de secagem da madeira

- Técnica que visa reduzir a umidade da madeira até determinado teor, minimizando defeitos, tempo e custo.
- Neste contexto, o termo “madeira seca” é relativo. Pode-se considerar:
 - A madeira em equilíbrio com a umidade relativa do ar;
 - A madeira com teor de umidade mínimo, definido comercialmente.

Por que secar a madeira?

- Redução da variação dimensional
 - Impossibilidade de definir peças dimensionadas com a madeira úmida;
 - Altas temperaturas promovem maior estabilidade da madeira (termorretificação)

- Redução de ataques de biológicos
 - A madeira é fonte de alimento para várias espécies de fungos e insetos
 - Sua ocorrência promove perdas e danos comerciais

- Fixação de pregos e parafusos
 - Elementos de fixação tendem a afrouxar quando inserido em madeira úmida, quando esta vier a secar.

2

Teor de umidade da madeira

Tipos de água existentes na madeira

- Uma árvore vivas absorve água e mantém um fluxo interno desse líquido.
- Nesta condição, a água preenche por completo os espaços vazios da madeira e de sua parede celular, caracterizando o estado saturado.

- Água de capilaridade ou livre
- Água de adesão ou higroscópica
- Água de adsorção química

Água de capilaridade

- Localizada nos vasos, canais e lúmens das células;
- Fácil de retirar;
- A água passa de uma célula para outra até atingir a superfície da madeira.

Água de adesão

- Localizada no interior da parede celular;
- Unidas as micro fibrilas na forma de vapor;
- Retirada mais difícil e com maior tempo e dispêndio de energia.

Água de adsorção química

- Participa da constituição química da madeira;
- Não se pode retirar;
- Não tem significância no teor de umidade da madeira.

- O teor de umidade da madeira é um fator relacionado:
 - Ao transporte
 - A variação dimensional
 - A resistência mecânica e trabalhabilidade
 - Susceptibilidade a ataque de fungos
 - Poder calorífico

Ponto de saturação das fibras - PSF

- Momento teórico em que toda água de capilaridade foi retirada, remanescendo na madeira toda água higroscópica.
- Situado em torno de 28% de umidade da madeira (padronização)
- A partir deste ponto, ocorrem as variações dimensionais da madeira
 - Disso pode ocasionar o aparecimento de rachaduras e empenamentos.

Determinação do teor de umidade - Secagem em estufa

- A umidade da madeira é calculada em função da relação do seu peso úmido (P_U) e seu peso seco (P_S);

$$tu = \left(\frac{P_U - P_S}{P_S} \right) \times 100$$

Peso úmido Peso seco

Exemplo

Uma amostra de madeira medindo 20 x 2,5 x 2,5 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?

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

Ou

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

Premissa

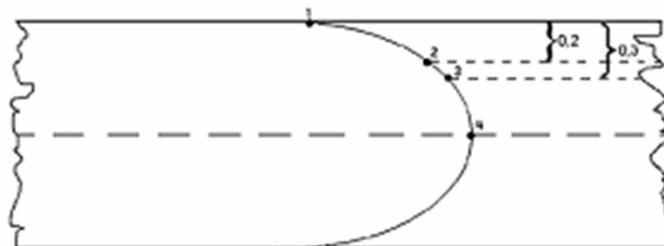
- Secar em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ate atingir peso constante;
- Peso constante: a diferença de peso entre três pesagens sucessivas não dever ter variação maior que 0,1%.

Determinação do teor de umidade - Aparelhos elétricos

- Baseados na resistência da madeira a passagem de uma corrente continua.
- Assim, o conteúdo de água existente na madeira facilita a passagem da corrente.
 - Quanto mais úmido, maior a passagem

- Desvantagem:
 - Imprecisão em teores de umidade muito baixos;
 - Imprecisão em teores de umidade acima de 30%;
 - Podem estar restritos a uma leitura superficial

- A umidade dentro de uma peça é representada por uma distribuição parabólica;
- A medição deve ser tomada a profundidade entre 20% e 30% da espessura da peça.



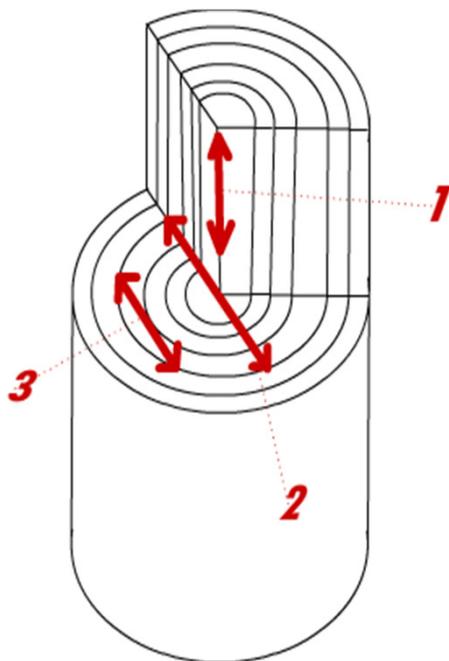
3

Movimentação da água na madeira

Movimentação

- Das zonas alta umidade para zonas de baixa umidade.
 - No momento do abate da árvore, a umidade contida nela é uniforme ao longo da madeira.
 - Uma vez derruba, inicia-se a perda de água, criando zonas menos úmidas nas áreas periféricas da madeira.
 - Assim, a parte mais interna da madeira estará mais úmida que a parte mais externa.

- A água movimenta-se por vários tipos de passagens, principalmente vasos, dentro de fibras, pontuações e pela parede celular.
 - Desloca-se transversal e longitudinalmente, sendo esta ultima mais rápida.
 - O deslocamento no sentido radial e' mais rápido do que no sentido tangencial.



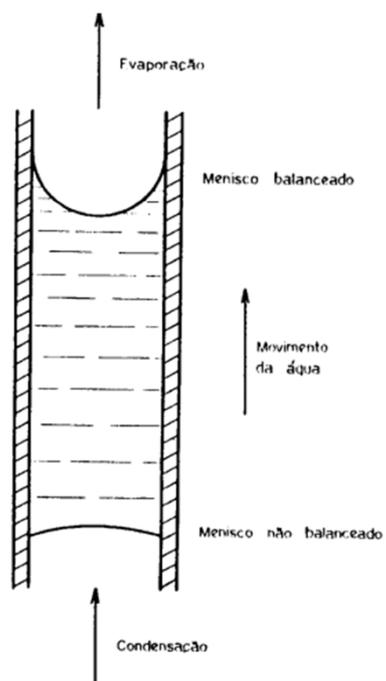
Movimentação da água dentro da árvore: a água transloca-se com maior velocidade no sentido longitudinal (1), seguido pelo sentido radial (2); no sentido tangencial (3) a movimentação é mais lenta.

- Dois movimentos podem ser distinguidos:
 - Movimento capilar, que ocorre acima do PSF;
 - Movimento de difusão, que ocorre abaixo do PSF

Movimento capilar

- A força capilar atua na remoção da água de capilaridade;
- Essa força diminui a medida em que o teor de umidade das células se aproximam-se do PSF.
- Esse movimento é altamente dependente de:
 - Temperatura
 - Presença de ar
 - Abertura da pontuação

- O fluxo através dos capilares mantém correlação com raio capilar elevado a quarta potencia.
- Quanto maior o raio, menor a tração da coluna do capilar e, conseqüentemente, menor o fluxo.



Movimento de difusão

- As moléculas de água se movem da parede celular para a cavidade celular e novamente para a parede celular.
 - Nessa seqüência, as moléculas de água atingem a superfície da madeira, de onde são liberadas para a atmosfera.
 - Essa liberação garante a formação de um gradiente de umidade na parede celular que irá ditar o ritmo dessa difusão.

Transferência de massa

- Por meio das movimentações observadas, a massa de água percorre o interior da madeira, alcança a superfície e passa para o ar.
- A passagem da água da madeira para o ar é dependente das condições ambientais, principalmente umidade relativa e temperatura.

- O processo de secagem é mais rápido quanto:
 - mais alta for a temperatura ambiente;
 - menor for a umidade relativa do ar;
 - maior for a velocidade do ar que circula a madeira.

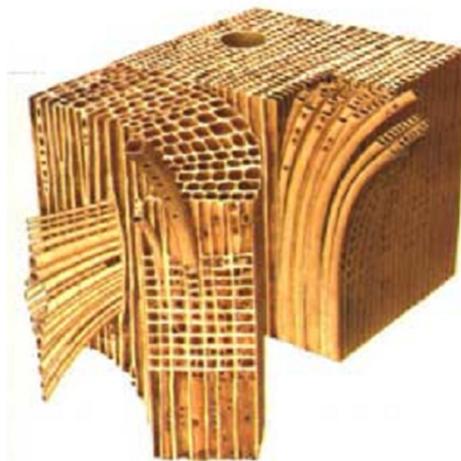
4

Fatores inerentes à madeira que afetam a secagem

ASPECTOS ANATOMICOS

- A madeira possui células de diversas formas e funções, principalmente na angiospermas (folhosas).
- Destacam-se as funções de sustentação e de condução.

- As coníferas (gimnospermas) possui uma estrutura anatômica mais simplificada, onde os traqueóides assumem as funções de condução e sustentação.

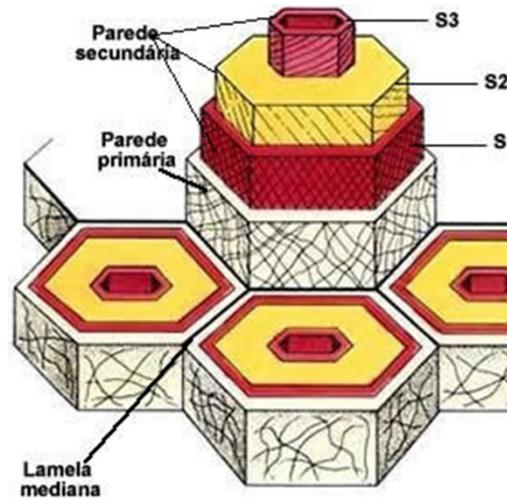


- Nas folhosas, a estrutura anatômica é mais complexa devido a células especializadas em diversas funções:



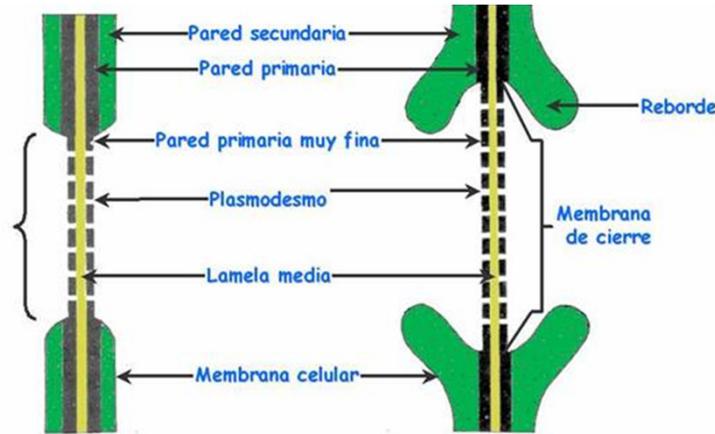
- Vasos – condução
- Parênquima – reserva
- Traqueóides – sustentação e condução

- nas células da madeira, a condução de líquidos se dá pelo seu interior, no espaço denominado “lúmen”.



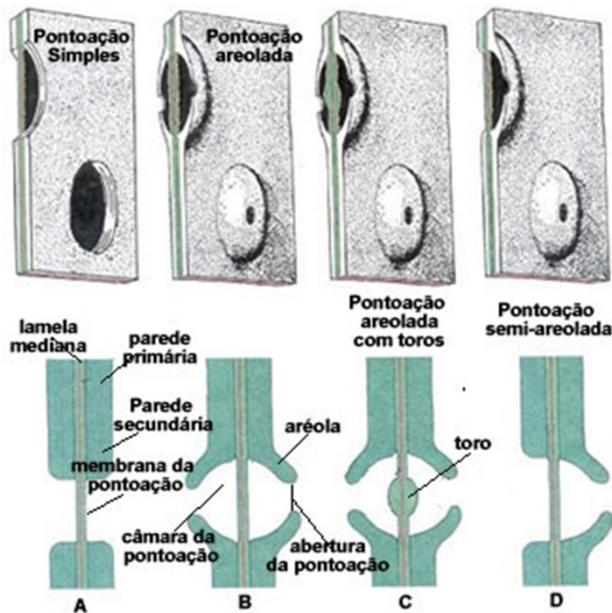
- Os traqueóides, assumem uma forma afilada (extremidades pontiagudas) e o meio de transferência de líquidos se dá por pequenas interrupções da parede celular (pontoações).
- Os vasos possuem forma cilíndrica e comprimento variável; suas extremidades são na forma reta ou em bisel, acompanhadas de uma membrana permeável (placas de perfuração)

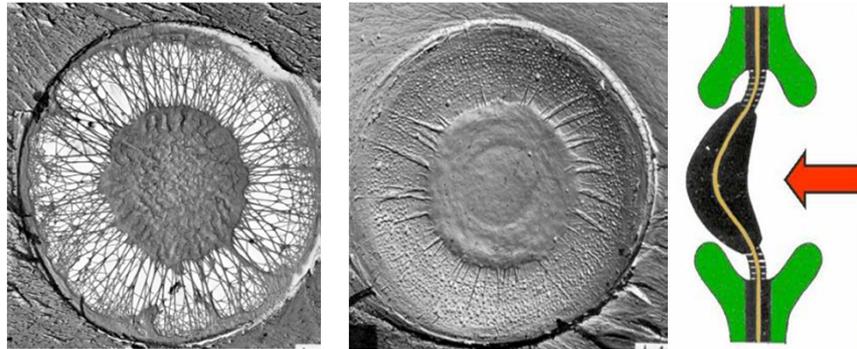
Pontoação



Simple

Areolada



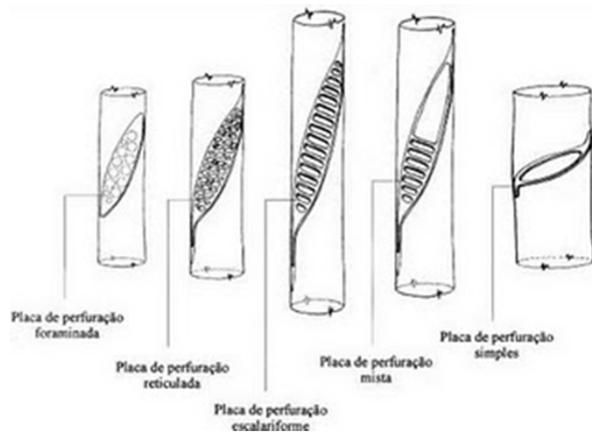


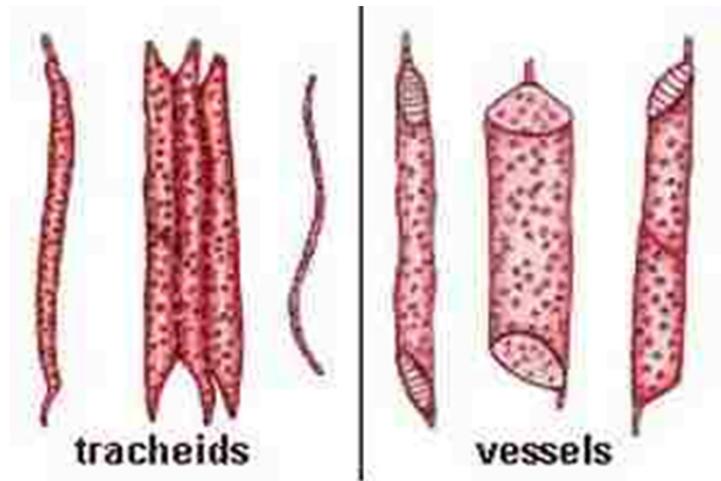
Pontoação não aspirada

Pontoação aspirada

Placas de perfuração

- XXXXX





DENSIDADE DA MADEIRA

- A densidade da madeira está relacionada com a espessura da parede celular.
- Quanto mais espessa a parede celular, menor é o lúmen e, conseqüentemente, maior a densidade da madeira.
- Quanto mais densa, maior a dificuldade de retirada da água, pois existe maior quantidade de água higroscópica.

5

Fatores externos que afetam a secagem da madeira

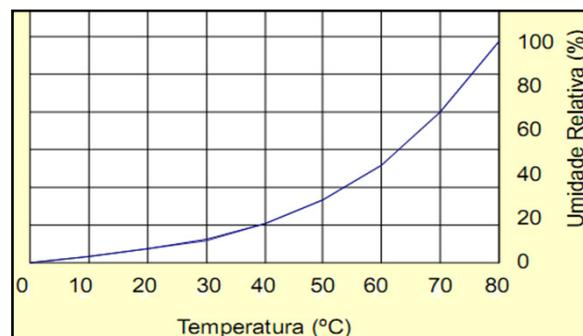
- A água é removida da superfície da madeira por evaporação.
- A velocidade de evaporação é controlada pela:
 - temperatura,
 - umidade relativa do ar e
 - velocidade do ar.

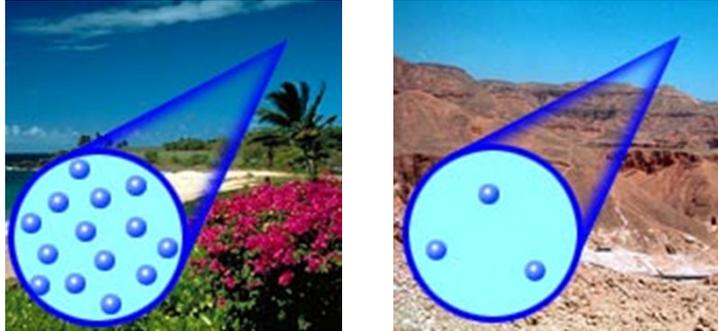
Temperatura

- Quanto maior a temperatura, maior a taxa de saída de umidade do interior da madeira.
- No interior da madeira aumenta a circulação das moléculas de água.

Umidade Relativa

- A umidade relativa determina a capacidade de secagem do ar - Ar seco tem alta capacidade de secagem;
- Aumento da temperatura, aumenta a capacidade do ar, pois diminui a umidade relativa.



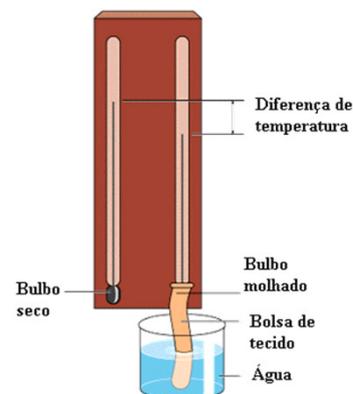


Psicrometro

- Aparelho dotado de dois termômetros:
 - Termômetro de bulbo seco – tbs
 - Termômetro de bulbo úmido - tbu

O tbs registra a temperatura ambiente

O tbu simula a temperatura em condição de saturação do ar



- Se a temperatura no tbs e' igual a temperatura no tbu, significa que o ar local esta saturado (UR = 100%)
- A medida em que as temperaturas do tbs e do tbu se afastam, diminui a umidade relativa.

$$UR = \left[\frac{\text{EXP}\left(9,1466 - \frac{2316}{273 + tbu}\right) - 0,5 \times (tbs - tbu)}{\text{EXP}\left(9,1466 - \frac{2316}{273 + tbs}\right)} \right] \times 100$$

Exemplo

- $T_{bs} = 100.C$ e $T_{bu} = 82.C$

$$UR = \left[\frac{EXP\left(9,1466 - \frac{2316}{273+82}\right) - 0,5 \times (100 - 82)}{EXP\left(9,1466 - \frac{2316}{273+100}\right)} \right] \times 100$$

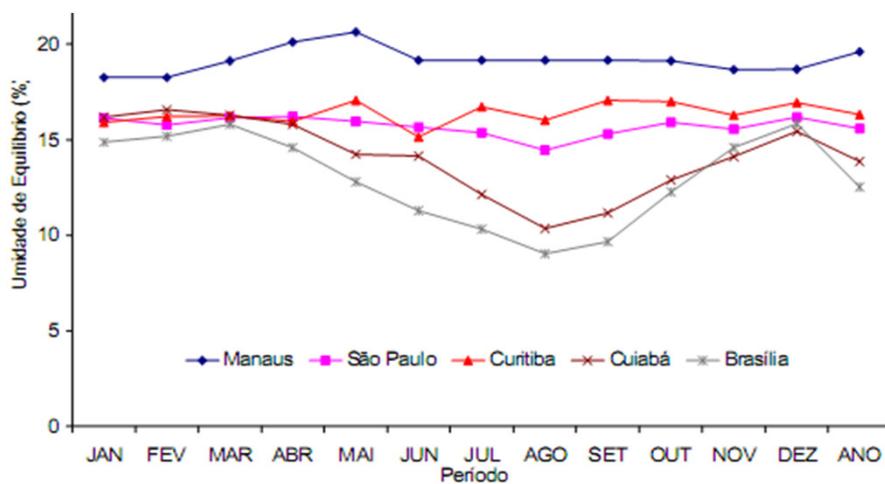
$$UR = \left[\frac{EXP(2,6227) - 9}{EXP(2,9375)} \right] \times 100$$

$$UR = \left[\frac{13,7722 - 9}{18,8683} \right] \times 100$$

$$UR = 25,29\%$$

Umidade de equilíbrio

- A madeira é um material higroscópico – perda ou ganha umidade do ambiente.
- Existe um momento em que a madeira deixa de ganhar/perder umidade
 - Equilíbrio higroscópico da madeira
 - Umidade de equilíbrio
 - Umidade relativa e temperatura



$$UE = \left(\frac{K_1 \times K_2 \times h}{1 + K_1 \times K_2 \times h} + \frac{K_2 \times h}{1 + K_2 \times h} \right) \times \frac{1800}{W}$$

$$K_1 = 4,737 + 0,04773 \times tbs - 0,00050123 \times tbs^2$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698 \times tbs - 0,000005553 \times tbs^2$$

$$W = 223,374 + 0,69309 \times tbs + 0,01850 \times tbs^2$$

$$h = UR/100$$

Exemplo

- Calcular a umidade de equilíbrio para a cidade de Fortaleza: UR = 80,2%; Temperatura = 26,5.C.

$$K_1 = 4,737 + 0,04773 \times 26,5 - 0,00050123 \times 26,5^2$$

$$K_1 = 4,737 + 1,2648 - 0,3520$$

$$K_1 = 5,6498$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698 \times 26,5 - 0,000005553 \times tbs^2$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,0450 - 0,0036$$

$$K_2 = 0,7473$$

$$W = 223,374 + 0,69309 \times 26,5 + 0,01850 \times 26,5^2$$

$$W = 223,374 + 18,3669 + 12,9916$$

$$W = 254,7325$$

$$UE = \left(\frac{5,6498 \times 0,7473 \times 0,802}{1 + 5,6498 \times 0,7473 \times 0,802} + \frac{0,7473 \times 0,802}{1 + 0,7473 \times 0,802} \right) \times \frac{1800}{254,7325}$$

$$UE = \left(\frac{3,3861}{4,3861} + \frac{0,5993}{1,5993} \right) \times 7,0662$$

$$UE = (0,7720 + 0,3747) \times 7,0662$$

$$UE = 8,1028\%$$

6

Secagem ao ar livre ou natural

- Consiste na exposição da madeira aos fatores climáticos de um determinado local.
 - Temperatura
 - Umidade relativa
 - Circulação de ar
 - Insolação
 - outros

Vantagens

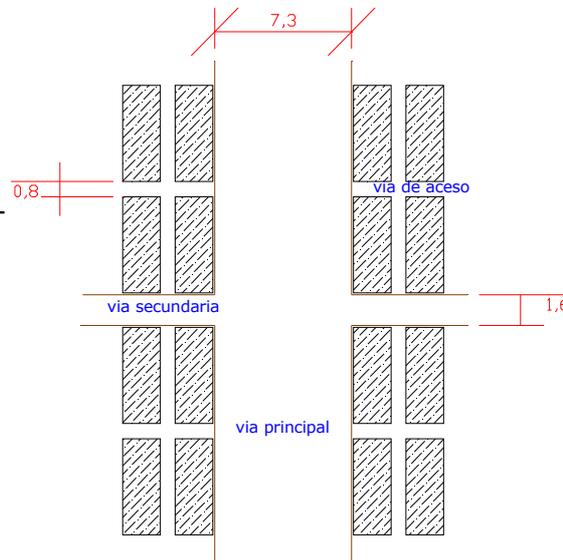
- Redução da umidade inicial da madeira
- Aproveitamento das condições ambientais
- Baixo requerimento de energia

Desvantagens

- Necessidade de grandes áreas para empilhamento.
- Impossibilidade de controle das condições ambientais.
- Tempo de secagem elevado.
- Teor de umidade final muito alto

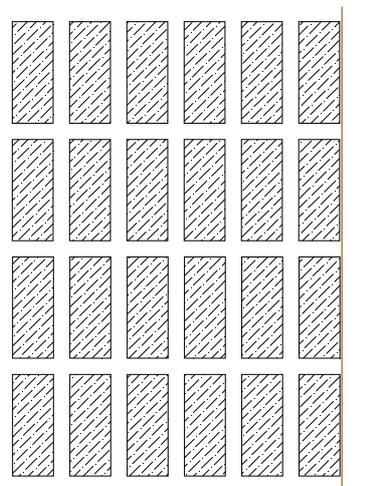
Organização do pátio

- **Vias principais** – circulação de ar; prevenção contra incêndios.
- **Vias secundarias** – tráfego para movimentação de carga.
- **Vias de acesso** – inspeção e manutenção.



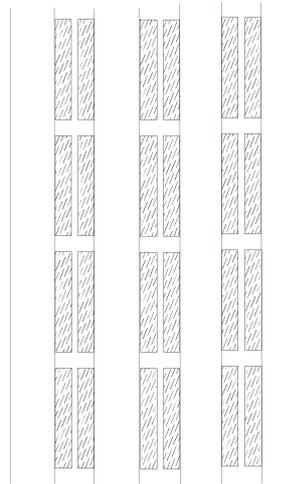
Arranjo das pilhas de madeira

- **Arranjo em fileiras**
 - Pilhas paralelas as vias secundarias;
 - Espaçamento lateral de 60 cm;
 - Ocupação do terreno de $0,3\text{m}^3/\text{m}^2$



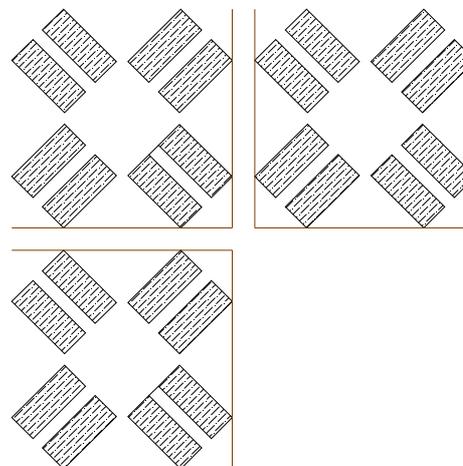
- Arranjo em linhas

- Secagem rápida;
- Grande área do pátio ocupado por passagens;
- Ocupação do terreno de $0,2\text{m}^3/\text{m}^2$



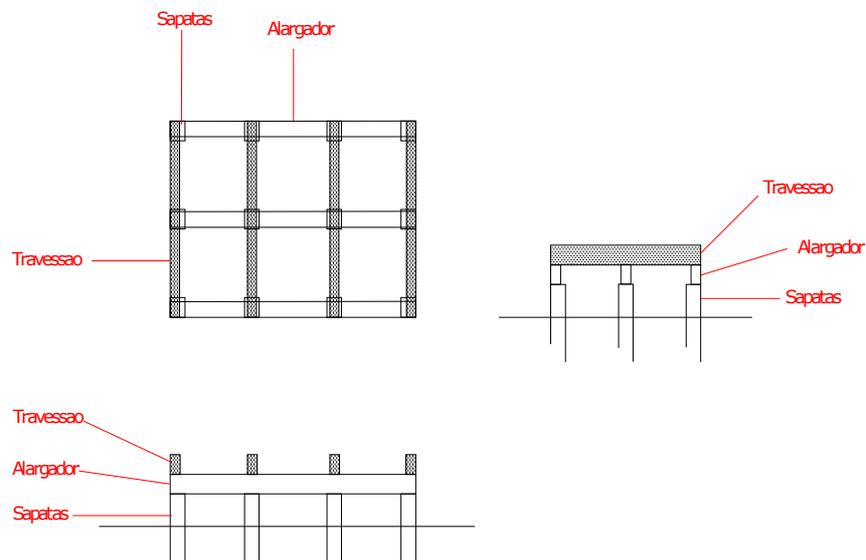
- Arranjo em espinha de peixe

- Secagem rápida;
- Espécies de fácil secagem;
- Ocupação do terreno de $0,1\text{m}^3/\text{m}^2$



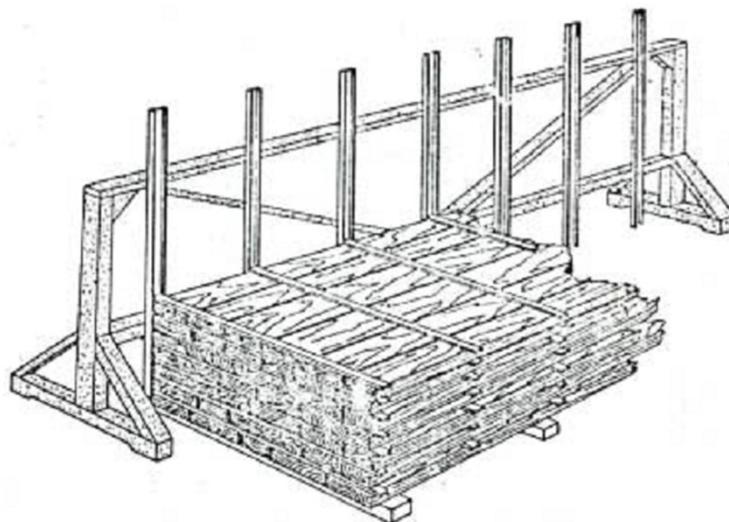
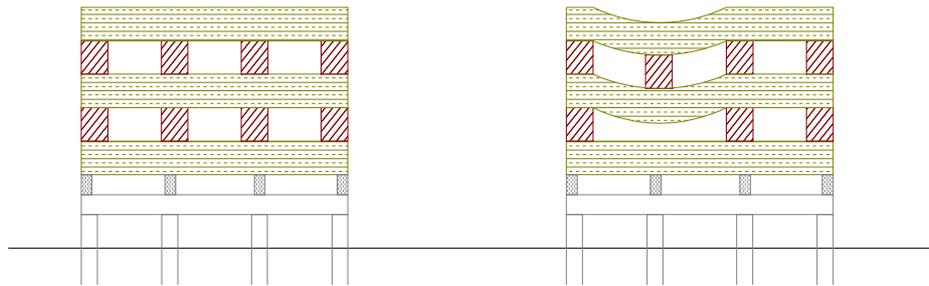
Pilhas de secagem de madeira

- As pilhas são formadas por camadas de peças de madeira sobrepostas e espaçadas – lastros
 - O comprimento da pilha é o mesmo da peça de madeira
 - A altura pode ser de 5 a 7 metros, para carregamento mecanizado, ou 3 metros para carregamento manual.
 - Largura em torno de 2 metros.
-
- A base da pilha deve conferir estabilidade e resistência.
 - Sapatas – base da pilha da madeira; fabricada em alvenaria ou madeira tratada de alta densidade.
 - Alargadores – nem sempre verificados; utilizados para aumentar ou reduzir a circulação de ar.
 - Travessões – onde a madeira começa a ser empilhada.



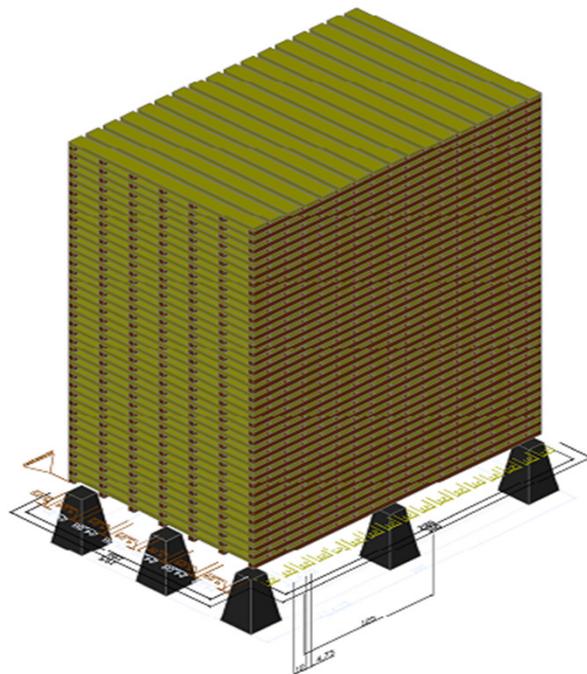
Tabicamento

- Tabiques (ou separadores) são peças utilizadas para separar as camadas de madeira a serem secas.
- Devem estar bem alinhados, vertical e horizontalmente.
- Tabiques externos devem coincidir com o topo das tabuas.
- Geralmente são confeccionados em madeira:
 - Cerne
 - Tratados
 - Ausência de defeitos
 - secos

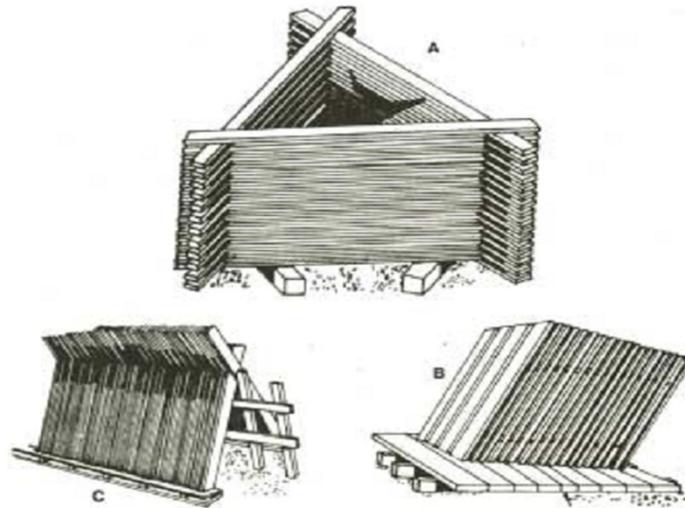


Características dos tabiques

Espessura das tábuas (mm)	Espessura dos separadores (mm)	Distancia entre os separadores (mm)
Menos de 20	20	300 – 400
20 – 30	25	400 – 500
30– 40	30	500 – 600
40 – 50	35	700 – 800
50 – 60	40	900
Mais de 60	45	1000



Outros tipos de pilhas



Volume efetivo de madeira

- O volume efetivo de madeira a ser empilhada retrata o estoque de matéria-prima;
- Consequentemente, traduz a capacidade de abastecimento do mercado pela serraria.
- O volume efetivo, refere-se ao volume quando a madeira for recém desdobrada;
- A medida que a madeira seca, suas dimensões vão alterando, interferindo no volume final.

Dados iniciais

- a) Largura da pilha _____ 3,00 m
- b) Altura da pilha _____ 3,50 m
- c) Comprimento da pilha _____ 5,00 m
- d) Espessura dos separadores _____ 0,025 m
- e) Espaço frontal (anterior e posterior) _____ 0,15 m
- f) Espaço entre pilhas _____ 0,15 m
- g) Fator de ocupação lateral _____ 0,95
- h) Espessura da tábua _____ 0,035 m

Numero de tabuas na vertical (lastro)

$$N_{tb} = \frac{b}{h + d}$$

$$N_{tb} = \frac{3,50}{0,0035 + 0,025}$$

$$N_{tb} = 58,33 \approx 58$$

Volume de tabuas por pilha

$$V_{tb} = a \times g \times h \times c \times N_{tb}$$

$$V_{tb} = 3,0 \times 0,95 \times 0,035 \times 5,0 \times 58$$

$$V_{tb} = 28,9275$$

7

Amostras controladoras de secagem

- São amostras representativas, removidas periodicamente durante o processo de secagem.
- Principais vantagens:
 - controle do teor de umidade;
 - base para desenvolver programas de secagem baseados no tempo.

Para controle eficiente, recomenda-se o uso mínimo de:

- 04 amostras para cargas de até 20m³;
- 10 amostras para cargas até 100m³;
- 20 amostras para cargas acima de 100m³.

Operacionalização

Durante o tabicamento, as peças das quais serão retiradas as amostras devem ser separadas.

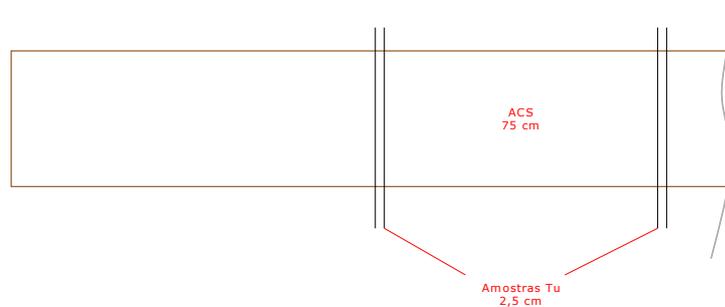
Estas peças devem ser representativas da pilha de secagem.

Será retirada uma amostra por tabua, sendo que nos, casca, medulas e outra injurias devem ser descartadas.

A tabua selecionada devera ter suas extremidades descartadas, no mínimo a 1 metro do topo.

Da parte restante serão retiradas:

- Duas amostras para teor de umidade, com 2,5cm de comprimento e largura igual a da tabua;
- Uma amostra controladora de secagem (ACS) de 75 cm de comprimento e com extremidades seladas com parafina.



Desta maneira, determina-se o teor de umidade:

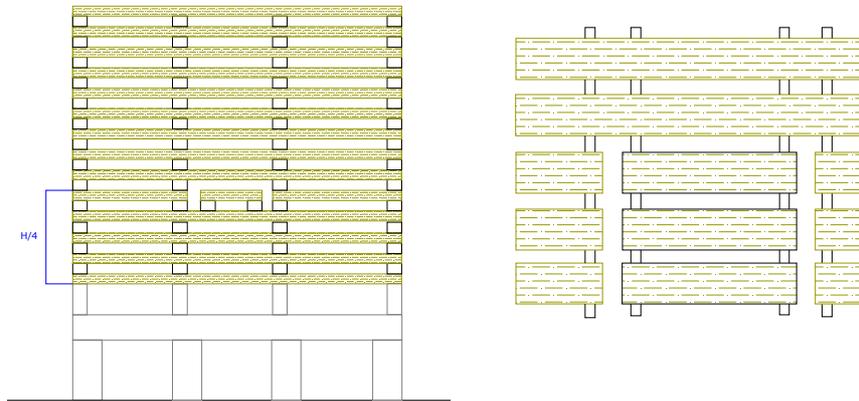
$$Tu = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$$

E a massa seca:

$$Msc = \frac{\textit{massa_seca_corrente}}{\frac{Tu}{100} + 1}$$

Logo após, retornar as amostras ao compartimento da pilha, de onde serão retiradas periodicamente, para novas medições.

As amostras deverão ficar, preferencialmente a $\frac{1}{4}$ da altura da pilha e abranger quantas tabuas forem necessárias para amostrar desde a borda até o centro da pilha.



Para determinação do teor de umidade corrente, duas massas são requeridas:

- Massa corrente (M_c)
- Massa seca calculada (M_{sc})

$$U_c = \frac{M_c - M_{sc}}{M_{sc}} \times 100$$

Exemplo

Massa úmida:

Amostra 1: 98,55g

Amostra 2: 86,92g

Massa seca:

Amostra 1: 59,20g

Amostra 2: 55,02g

Amostra controladora

Leitura 1: 2025g

Leitura 2: 1880g

Leitura 3: 1748g

Teor de umidade

$$Tu_1 = \frac{98,55 - 59,20}{59,20} \times 100 = 66,50\%$$

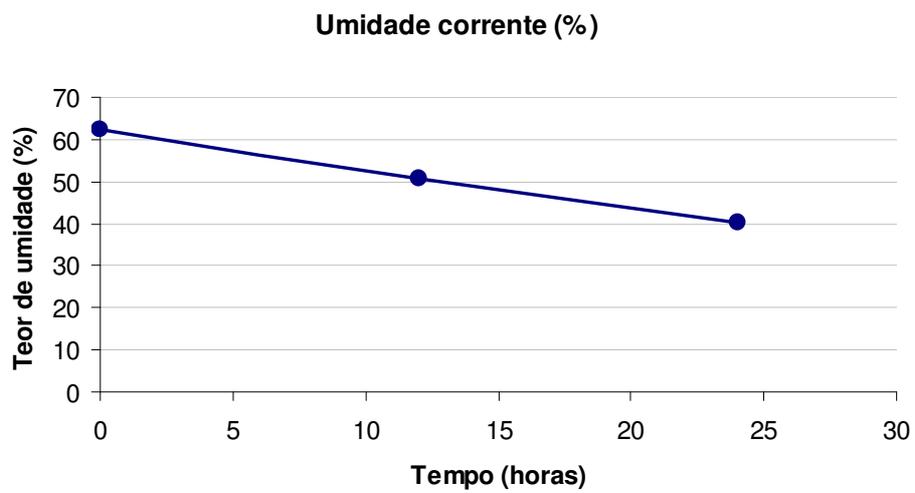
$$Tu_2 = \frac{86,92 - 55,02}{55,02} \times 100 = 57,80\%$$

$$Tu_M = \frac{66,50 + 57,80}{2} = 62,20\%$$

Leitura 1 → $M_{sc} = \frac{2025}{\frac{62,20}{100} + 1} = 1248g$

Leitura 2 → $U_c = \frac{1880 - 1248}{1248} \times 100 = 50,6\%$

Leitura 3 → $U_c = \frac{1748 - 1248}{1248} \times 100 = 40,10\%$



8

Defeitos de secagem

- Os defeitos estão relacionados com o mecanismo adotado para equilibrar a umidade da madeira.
- Toda madeira apresenta índices de umidade irregulares.
 - Empenamentos
 - Rachaduras
 - Encruamento
 - Rachadura em favos
 - Colapso

Empenamentos

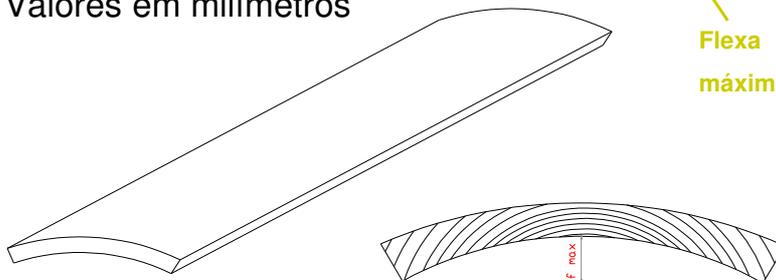
- Qualquer distorção da peça de madeira em relação aos planos originais de sua superfície.
 - Encanoamento
 - Empenamento longitudinal
 - Encurvamento
 - Arqueamento

Encanoamento

- Quando as margens da peça permanecem aproximadamente paralelas.
- Valores em milímetros

$$Ec = f_{MAX}$$

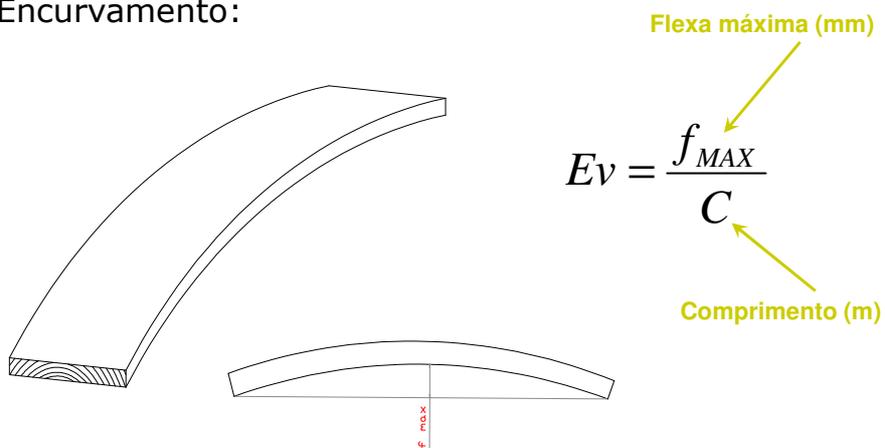
Flexa
máxima (mm)



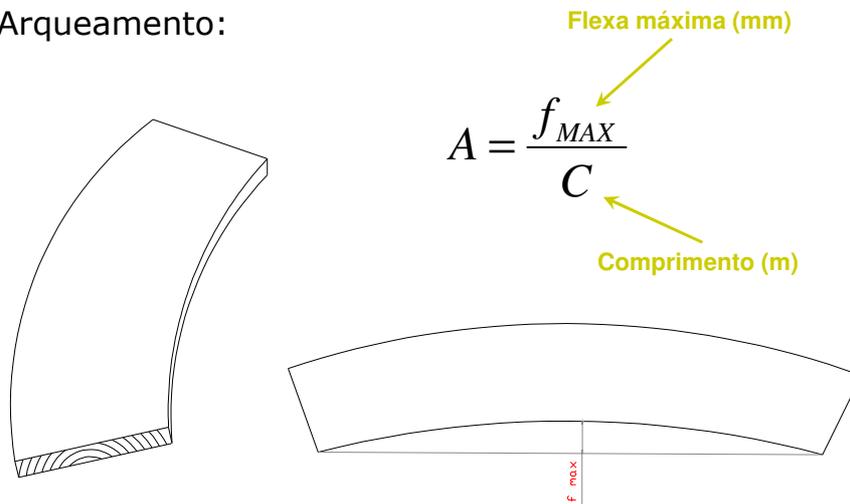
Empenamento longitudinal

- Afastamento de uma face em relação ao plano que une uma extremidade a outra da peça.
- Devido a:
 - Irregularidade da grã;
 - Tensão de crescimento

Encurvamento:



Arqueamento:



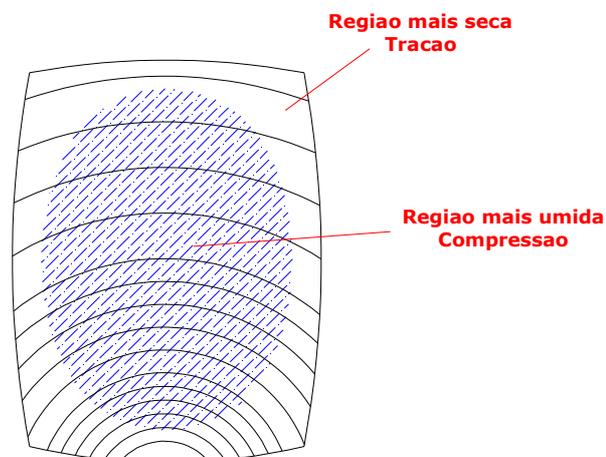
Rachaduras

- Conseqüência de:
 - Diferença da retração tangencial e retração radial
 - Diferença de umidade em regiões contíguas da peça

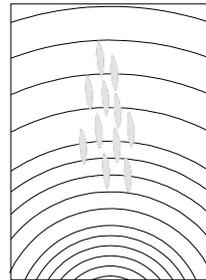
Encruamento ou endurecimento superficial

- Conseqüência de:
 - Secagem muito rápida ou desuniforme;
- Camadas externas da madeira atingem rapidamente baixo teor de umidade;
 - Aspiração das pontoações
 - Retenção da umidade mais interna

- Parte externa (seca) recebe esforços de tração;
- Parte interna (úmida) recebe esforços de compressão



- A partir do momento em que a parte interna perde umidade e retrai
 - Parte externa (seca) recebe esforços de contração;
 - Parte interna (úmida) recebe esforços de tração
- Ate atingir estabilidade
- Aparecimento de rachadura em favos



Colapso

- Ondulações na superfície da peça
- Ocasionado por forcas geradas durante a movimentação da água capilar
- Tensão desenvolvida durante a saída da água for maior que a resistência da madeira
 - Pequeno diâmetro dos capilares;
 - Altas temperaturas no início da secagem;
 - Baixa densidade da madeira;

9

Programas de secagem

Programas de temperatura para secagem em estufa

Etapa de temperatura N.	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura de bulbo seco (.C) para o programa n.													
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
1	acima de 30	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

Programas de depressão do bulbo úmido para secagem de madeira em estufa

Etapa de depressão N.	Teor de umidade no início de cada etapa para diferentes níveis de teor de umidades inicial (%)						Depressões de bulbo úmido(.C) para o programa n.							
	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8
1	ac. 30	ac. 35	ac. 40	ac. 50	ac. 60	ac. 70	1,7	2,2	2,8	3,9	5,6	8,3	11,1	14
2	30	35	40	50	60	70	2,2	2,8	3,9	5,6	7,8	11,1	16,7	19
3	25	30	35	40	50	60	3,3	4,4	6,1	8,3	11,1	16,1	22,2	28
4	20	25	30	35	40	50	5,6	7,8	10,6	13,9	19,4	27,8	27,8	28
5	15	20	25	30	35	40	13,9	16,7	19,4	22,2	27,8	27,8	27,8	28
6	10	15	20	25	30	35	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	28

Nome vulgar	Nome científico	Espessura da peça (mm)	Código do programa
Angico preto	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	25	T8 B3
		50	T5 B1
Pinheiro do paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	25	T3 D2
		50	T3 D1
Peroba rosa	<i>Aspidosperma polyneuron</i>	25	T6 D2
		50	T3 D1
Pau-marfim	<i>Balfourodendron riedelianum</i>	25	T6 C3
		50	T5 C2
Jacareúba	<i>Calophyllum brasiliense</i>	25	T2 D4
		50	T2 D3
Andiroba	<i>Carapa guianensis</i>	25	T2 C2
		50	T3 C1
Jequitibá rosa	<i>Cariniana legalis</i>	25	T3 D2
		50	T2 D1
Imbaúba	<i>Cecropia peltata</i>	25	T7 B6
		50	T5 B5
Louro pardo	<i>Cordia Trichotoma</i>	25	T6 D1
		50	T3 D1
Jacarandá da bahia	<i>Dalbergia nigra</i>	25	T3 C2
		50	T3 C1
Açacu	<i>Hura crepitans</i>	25	T6 D2
		50	T3 D1
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	25	T3 C2
		50	T3 C1
Imbúia	<i>Ocotea porosa</i>	25	T6 D2
		50	T3 D1
Cambará	<i>Quelea spp.</i>	25	T3 D2
		50	T3 D1
Mogno	<i>Swietenia macrophylla</i>	25	T6 D4
		50	T3 D3

Sugestões de programas de secagem

Montando um programa de secagem

Utilizando um formulário como o apresentado, monta-se um programa seguindo os passos descritos abaixo:

Programa:					
1	2	3	4	5	6
Etapa de temperatura n.	Etapa de depressão de bulbo úmido (%)	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura do bulbo seco (°C)	Depressão do bulbo úmido (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)

Encontrar o código do programa para o material a ser seco.
Exemplo: Swietenia macrophylla (25mm) – T6 D4.

Como a primeira mudança nas condições de secagem envolve a depressão do bulbo úmido, escrever na coluna 2 os passos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Programa: T6 D4					
1	2	3	4	5	6
Etapa de temperatura n.	Etapa de depressão de bulbo úmido (%)	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura do bulbo seco (°C)	Depressão do bulbo úmido (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				

Escrever na coluna 3 do formulário os valores de teor de umidade correspondentes a esses passos, a partir das classes de teor de umidade da tabela 6.

Exemplo: Classe "D" – 50, 50, 40, 35, 30 e 25.

Escrever na coluna 5 do formulário os valores correspondentes à depressões de bulbo úmido indicadas em cada etapa, de acordo com o código do programa da tabela 5.

Exemplo: Número "4" – 3,9; 5,6; 8,3; 13,9; 22,2 e 27,8.

Programa: T6 D4					
1	2	3	4	5	6
Etapa de temperatura n.	Etapa de depressão de bulbo úmido (%)	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura do bulbo seco (°C)	Depressão do bulbo úmido (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)
	1	50		3,9	
	2	50		5,6	
	3	40		8,3	
	4	35		13,9	
	5	30		22,2	
	6	25		27,8	

Escrever os números das etapas de temperatura na coluna 1 do formulário. Desde que as mudanças na temperatura do bulbo seco não são feitas até que a umidade média das amostras controladoras atinjam 30%, repetir a etapa 1, quantas vezes necessário.

Exemplo: é repetido três vezes pois somente na etapa 5 de depressão do bulbo úmido, o teor de umidade atinge 30%.

O teor de umidade no início da etapa de temperatura 5 é de 15%, conforme tabela 4; assim repete-se a etapa 6 de depressão de bulbo úmido, até que o teor de umidade atinja o indicado (15%).

Programa: T6 D4					
1	2	3	4	5	6
Etapa de temperatura n.	Etapa de depressão de bulbo úmido (%)	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura do bulbo seco (°C)	Depressão do bulbo úmido (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)
1	1	50		3,9	
1	2	50		5,6	
1	3	40		8,3	
1	4	35		13,9	
2	5	30		22,2	
3	6	25		27,8	
4	6	20			
5	6	15			

Preencher na coluna 4 do formulário a temperatura do bulbo seco correspondente ao número de etapas das tabelas 4 e 5. Se o passo 1 é repetido, a temperatura inicial do bulbo seco deve ser repetida.

Repetir a última depressão do bulbo úmido até o final do programa.

Subtrair a depressão do bulbo úmido da temperatura do bulbo seco em cada etapa, para se obter as temperaturas do bulbo úmido correspondentes.

Programa: T6 D4					
1	2	3	4	5	6
Etapa de temperatura n.	Etapa de depressão de bulbo úmido (%)	Teor de umidade no início de cada etapa (%)	Temperatura do bulbo seco (°C)	Depressão do bulbo úmido (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)
1	1	50	49	3,9	45,1
1	2	50	49	5,6	43,4
1	3	40	49	8,3	40,7
1	4	35	49	13,9	35,1
2	5	30	54	22,2	31,8
3	6	25	60	27,8	32,2
4	6	20	66	27,8	38,2
5	6	15	82	27,8	54,2

10

Programas de secagem baseados no potencial de secagem

Potencial de secagem

- Potencial de secagem corresponde a uma relação entre teor de umidade da madeira e a umidade de equilíbrio.
- Apresenta uma relação direta com a taxa de secagem.
- Nesse tipo de programação, o potencial de secagem é pré-estabelecido para todo o processo de secagem ou para cada fase.

$$PS = \frac{tu}{UE}$$

Onde:

PS – Potencial de secagem
tu – Umidade da madeira (%)
UE – Umidade de equilíbrio (%)

Quanto maior o potencial, menor é o tempo de secagem e pior a qualidade da madeira.

Programa de secagem

Inicialmente devem-se definir os níveis de temperatura e o potencial de secagem.

Dificuldade de secagem	Densidade	Faixa de temperatura	Potencial
Muito difícil	> 1,00	Até 50 °C	Até 1,5
Difícil	0,70 a 1,00	50 °C a 70 °C	1,5 a 2,5
Média	0,57 a 0,69	60 °C a 90 °C	2,5 a 3,5
Fácil	0,30 a 0,59	70 °C a 100 °C	3,5 a 4,5
Muito fácil	< 0,30	Acima de 100 °C	Acima de 4,5

Os valores referenciais do potencial de secagem podem ser assim definidos:

- $PS = 1$ → equilíbrio: a umidade da madeira permanece a mesma, não havendo perdas ou ganhos, apenas é possível a movimentação dessa umidade dos locais de maior concentração para os de menor concentração.
- $PS < 1$ → aquisição de umidade: nesta situação, a umidade de equilíbrio é superior ao teor de umidade da madeira, o que proporciona a entrada de umidade na madeira.
- $PS > 1$ → perda de umidade: o teor de umidade da madeira é superior à umidade de equilíbrio.

Exemplo – Espécie de fácil secagem

- Preencher a coluna Tbs com a faixa de temperatura indicada. Os valores intermediários deverão ser distribuídos, preferencialmente, de forma eqüitativa.
- Preencher a coluna de potencial de secagem de com o valor indicado.
- Na Equalização, repetir a última temperatura tbs e definir o potencial de secagem em 1,0.

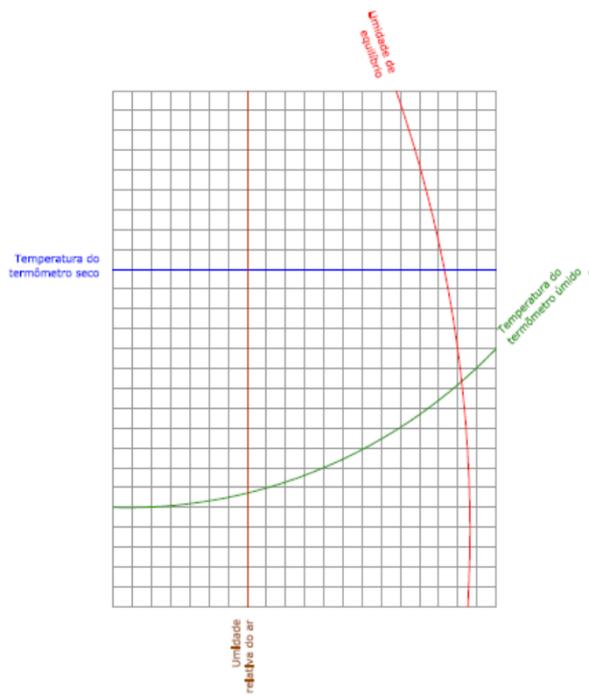
- Definir a umidade de equilíbrio em cada etapa.

$$PS = \frac{tu}{UE} \Rightarrow EU = \frac{tu}{PS}$$

$$EU = \frac{60}{4} = 15$$

$$EU = \frac{40}{4} = 10$$

- Determinar a umidade relativa e temperatura no Tbu, utilizando o gráfico.



Teor de umidade		Temperatura (°C)		Umidade relativa	Umidade de equilíbrio	Potencial de secagem
(%)		Tbs	Tbu	(%)	(%)	
	60	70	67,5	92,5	15,0	4,0
60	40	80	75,0	74,0	10,0	4,0
40	30	90	78,0	63,0	7,5	4,0
30	20	95	76,0	47,0	5,0	4,0
20	10	100	65,0	24,0	2,5	4,0
Equalização		100	95,0	80,0	10	1,0

EXEMPLOS DE PARÂMETROS DE SECAGEM

Espécie	Temp. inicial	Temp. Final	Potencial	Fonte
Eucalipto	42,0	66,0	2,20	(2)
Eucalipto	38,0	66,0	2,5 a 4,9	(2)
Eucalipto	45,0	60,0	2,3 a 3,2	(2)
Eucalipto	50,0	70,0	1,5 a 3,6	(2)
Eucalyptus grandis	41,7	65,7	2,17	(1)
Eucalyptus grandis	40,0	65,0	2,00	(2)
Eucalyptus grandis	40,5	64,9	2,10	(3)
Eucalyptus tereticornis	39,0	62,7	2,01	(1)
Eucalyptus urophylla	40,3	65,5	2,11	(3)
Freijó	36,8	61,1	1,88	(1)
Imbuia	42,4	68,3	1,95	(1)
Itaúba	44,4	67,7	2,05	(1)
Jatobá	39,0	63,8	2,03	(1)
Jutai-cica	39,0	64,3	2,00	(1)
Mandioqueira	47,6	70,1	2,59	(1)
Pau-marfim	40,5	65,6	2,12	(1)
Peroba-mica	43,3	67,6	2,32	(1)
Pinus caribea	56,8	77,9	3,45	(1)
Tamboril	40,2	62,3	2,11	(1)
Tauri	42,2	64,5	2,15	(1)

- (1) Andrade, Jankowsky e Ducati (2001)
- (2) Jankowsky, Santo e Andrade (2000)
- (3) Barbosa, Lima, Rosado e Trugilho (2005)

ATIVIDADE - Tomando o exemplo exposto, estabeleça programas de secagem para os demais níveis de dificuldade de secagem:

Muito difícil

Teor de umidade		Temperatura (°C)		Umidade relativa	Umidade de equilíbrio	Potencial de secagem
(%)		Tbs	Tbu	(%)	(%)	
	60					
60	40					
40	30					
30	20					
20	10					
Equalização						

Difícil

Teor de umidade		Temperatura (°C)		Umidade relativa	Umidade de equilíbrio	Potencial de secagem
(%)		Tbs	Tbu	(%)	(%)	
	60					
60	40					
40	30					
30	20					
20	10					
Equalização						

Médio

Teor de umidade		Temperatura (°C)		Umidade relativa	Umidade de equilíbrio	Potencial de secagem
(%)		Tbs	Tbu	(%)	(%)	
	60					
60	40					
40	30					
30	20					
20	10					
Equalização						

Muito fácil

Teor de umidade		Temperatura (°C)		Umidade relativa	Umidade de equilíbrio	Potencial de secagem
(%)		Tbs	Tbu	(%)	(%)	
	60					
60	40					
40	30					
30	20					
20	10					
Equalização						

11

Dimensionamento de secadores

Determinação do tempo de secagem

Dados iniciais:

- a) Teor de umidade inicial.....80%
- b) Teor de umidade final.....8%
- c) Espessura das tábuas.....35 mm
- d) Densidade básica.....0,49 g/cm³
- e) Fator de contração volumétrica.....0,12

$$t = \frac{1}{k} \times \ln\left(\frac{ui}{uf}\right) \times \left(\frac{e}{25}\right)^{1,5} \times \left(\frac{65}{T}\right) \times \left(\frac{D}{0,65}\right)^{1,5}$$

k = 0,0265 (coníferas)

$$D = Db \times \left[\frac{(1+tu)}{1+\alpha Vol} \right]$$

Para a primeira fase do programa de secagem:

$$t = \frac{1}{0,0265} \times \ln\left(\frac{80}{40}\right) \times \left(\frac{35}{25}\right)^{1,5} \times \left(\frac{65}{60}\right) \times \left(\frac{0,79}{0,65}\right)^{1,5} = 62,59 \text{ _horas}$$

Para a segunda fase do programa de secagem:

$$t = \frac{1}{0,0265} \times \ln\left(\frac{40}{30}\right) \times \left(\frac{35}{25}\right)^{1,5} \times \left(\frac{65}{65}\right) \times \left(\frac{0,61}{0,65}\right)^{1,5} = 16,45 \text{ _horas}$$

Fase	Faixa de umidade		Tbs	Densidade	Tempo
I	80	40	60	0,79	62,59
II	40	30	65	0,61	16,45
III	30	20	70	0,57	19,26
IV	20	15	75	0,53	11,31
V	15	8	80	0,50	21,74
					131,36

131,36 horas ou 5,5 dias

Determinação do número de secadores

Dados iniciais

- a) Volume de tábuas por pilha.....28,9275 m³
- b) Quantidade de pilhas por secador.....03 unidades
- c) Demanda de madeira seca.....500 m³/mês
- d) Tempo de secagem.....5,5 dias

Volume por secador:

$$V_{cam} = 3 \times V_{tb} \Rightarrow 3 \times 28,9275 = 86,7825$$

Ciclos de secagem por mês:

$$C_i = \frac{30 \text{ dias / mês}}{5,5 \text{ dias de secagem}} = 5,45 \approx 5$$

Volume mensal:

$$V_m = 5 \text{ ciclos} \times 57,8550 \text{ m}^3 = 289,2750 \text{ m}^3$$

Secadores necessários:

$$Ca = \frac{500}{289,2750} = 1,7285 \approx 2 \text{ câmaras}$$

Exemplo:

SOBRE A ESPÉCIE	
Teor de umidade inicial	92 %
Teor de umidade final	12 %
Espessura das tábuas	38,1 mm
Densidade básica	0,79 g/cm ³
Fator de contração volumétrica	0,13
SOBRE A CARGA	
Largura da pilha	2,000 m
Altura da pilha	3,600 m
Comprimento da pilha	3,000 m
Espessura dos separadores	0,033 m
Espaço frontal (anterior e posterior)	0,150 m
Espaço entre pilhas	0,150 m
Fator de ocupação lateral	0,950 %
Espessura da tábua	0,038 m
Demanda mensal	5000 m ³

PROGRAMA DE SECAGEM

Fase	Faixa de Umidade		Tbs	Tbu	U.R.	E.U.	P.S.	Densidade (g/cm³)	Tempo de secagem	
I	92	62	70	55	80	55	2,5	1,34	77,21	
II	62	50	85	55	48	43	2,5	1,13	26,86	
III	50	30	90	50	32	33	2,5	1,05	53,67	
IV	30	23	95	50	19	25	2,5	0,91	21,34	
V	23	12	100	40	12	8	2,5	0,86	45,68	
Equal	12	12	80	80	100	8	1	-	0,70	
									Total de horas	224,77
									Total de dias	9,4

PILHAS

Número de tábuas na vertical	50 unidades
Volume de tábuas por pilha	10,8585 m³
Número de pilhas por câmara	40 unidades
Volume efetivo de madeira por câmara	434,3400 m³

CÂMARAS DE SECAGEM

Ciclos aproximados	4 ciclos
Tempo de carga e descarga por ciclo	2 horas
Ciclos de secagem por mês	4 ciclos/mês
Capacidade unitária	1737,36 m³
Número de câmaras de secagem	3 unidades

A determinação da massa de madeira seca (Msc) utiliza-se de sua densidade básica (Db) e do volume efetivo de madeira (Ve).

$$Msc = Db \times Ve$$

Exemplo:

Densidade básica = 0,49 g/cm³

Volume efetivo = 87 m³

$$Msc = 490 \times 87$$

$$Msc = 42.630 \text{ kg}$$

A determinação da massa total da carga (Mt), ou seja, madeira seca + água, depende da massa seca (Msc) e do teor de umidade da madeira (tu) no início do processo de secagem.

$$Mt = \frac{Msc \times (tu + 100)}{100}$$

Exemplo:

Teor de umidade = 80%

$$Mt = \frac{42.630 \times (80 + 100)}{100} = 76.734 \text{ kg}$$

A determinação da massa de água (M_{ag}) é a diferença entre a massa total (M_t) e a massa seca (M_{sc}).

$$M_{ag} = M_t - M_{sc}$$

Exemplo:

$$M_{ag} = 76.734 - 46040$$

$$M_{ag} = 30.693\text{kg}$$

Assim:

- Temos uma carga de madeira que contém 30.693 kg de água.
- O teor de umidade inicial é de 80%.
- Precisamos fazer com que parte dessa água saia da madeira, de acordo com o programa de secagem estabelecido.

Considere o seguinte programa de secagem:

Fase	Faixa de	Tbs
	umidade	
I	80 - 40	60
II	40 - 30	65
III	30 - 20	70
IV	20 - 15	75
V	15. - 8	80

- A redução da umidade da madeira é de 72% (de 80% até 8%)
- Essa redução de umidade está distribuída entre as cinco fases.
- Verificamos qual o percentual de perda em cada fase, conseqüentemente, a quantidade de massa de água correspondente.

Fase	Faixa de umidade		Tbs	Diferença tu	% água	Massa de água
I	80	40	60	40	55,6	17051,67
II	40	30	65	10	13,9	4262,92
III	30	20	70	10	13,9	4262,92
IV	20	15	75	5	6,9	2131,46
V	15	8	80	7	9,7	2984,04

Neste ponto, temos uma nova variável: temperatura externa (ambiente), que adotaremos 15C como exemplo.

Aplicando a equação da energia para cada fase de secagem:

$$Q = m \times c \times \Delta t$$

$$Q = 17.051,67 \times 1 \times (60 - 15) = 767.325,00kcal$$

$$Q = 4.262,92 \times 1 \times (65 - 60) = 21.314,58kcal$$

Fase	Faixa de umidade		Tbs	Diferença tu	% água	Massa de água	Q
I	80	40	60	40	55,6	17051,67	767325,00
II	40	30	65	10	13,9	4262,92	21314,58
III	30	20	70	10	13,9	4262,92	21314,58
IV	20	15	75	5	6,9	2131,46	10657,29
V	15	8	80	7	9,7	2984,04	14920,21
					100,0	30693,00	835531,67

ESTRUTURA FÍSICA

□ Porta

- Altura.....4,00 m
- Largura.....3,40 m
- Espessura.....0,02 m
- Espessura do isolante.....0,075 m
- Densidade do material.....10,72 kg/m³

- Superfície de aquecimento _____ $4,0 \times 3,4 = 13,6 \text{ m}^2$
- Volume de aquecimento _____ $13,6 \times 0,02 = 0,272 \text{ m}^3$
- Massa de aquecimento _____ $0,272 \times 10,72 = 2,9158 \text{ kg}$

□ Paredes

- Laterais..... $(5 \times 16 \times 0,25) \times 2$40,00 m³
- Fundo..... $5 \times 6 \times 0,25$7,50 m³
- Fronte..... $7,5 - (4 \times 3,5 \times 0,25)$4,10 m³
- Volume total.....51,60 m³
- Argamassa (15%).....7,74 m³

Densidades e massas

- Tijolo..... $1.500 \text{ kg/m}^3 \times 51,60 = 77.400 \text{ kg}$
- Argamassa..... $1.850 \text{ kg/m}^3 \times 7,74 = 14.319,00 \text{ kg}$

□ Piso

- Largura.....6,00 m
- Comprimento.....16,00 m
- Espessura.....0,12 m
- Densidade.....2.000,00 kg/m²

- Volume.....6 x 16 x 0,12.....11,52 m³
- Massa.....11,52 x 2.000.....23.040,00 kg

□ Teto

- Largura.....6,00 m
- Comprimento.....16,00 m
- Espessura.....0,10 m
- Densidade.....1.500,00 kg/m²

Densidades e massas

- Volume.....6 x 16 x 0,10.....9,60 m³
- Massa.....9,6 x 1.500,00.....14.400,00 kg

- Argamassa (15%).....1.850 kg/m³ x 1,44 = 2.664,00 kg

□ Componentes metálicos

- Trocadores de calor.....500 kg
- Teto falso.....572 kg
- Carros de transporte.....258 kg
- Trilhos..... 372 kg
- Ventiladores.....318 kg
- Outros.....0 kg

- Total.....2.020 kg

AR & VAPOR

□ Umidade específica intra-câmara

$$G = \frac{UR \times Pv}{1,608 \times (Pat - UR \times Pv)}$$

- G – umidade específica do ar (kg de vapor / kg de ar seco)
- UR – umidade relativa do ar (%)
- Pv – pressão de vapor d'água (kg / cm²) – tabelado
- Pat – pressão atmosférica normal (kg / cm²) – 1,0335129

$$G = \frac{80 \times 0,3178}{1,608 \times (1,0335129 - 80 \times 0,3178)} \rightarrow G = 0,2038$$

Fase	UR	tbs	Pressão parcial de vapor	Umidade específica
I	80	70	0,3178	0,2038
II	48	85	0,5895	0,2356
III	32	90	0,7150	0,1776
IV	19	95	0,8620	0,1176
V	12	100	1,0332	0,0851
Equal	100	80	0,4030	0,3997

□ Volume de ar seco

$$V_{ar} = 22,414 \times \frac{T_{bs} + 273,1}{273,1} \times \frac{1}{28,97}$$

□ Volume de vapor d'água

$$V_{vp} = 22,414 \times \frac{T_{bs} + 273,1}{273,1} \times \frac{G}{18,02}$$

- Var - Volume de ar seco (m³/kg)
- Tbs - Temperatura do bulbo seco (°C)
- G - Umidade específica do ar (kg de vapor / kg de ar seco)

$$V_{ar} = 22,414 \times \frac{70 + 273,1}{273,1} \times \frac{1}{28,97} \rightarrow V_{ar} = 0,9720$$

$$V_{vp} = 22,414 \times \frac{70 + 273,1}{273,1} \times \frac{0,2038}{18,02} \rightarrow V_{vp} = 0,3185$$

Fase	Volume (m³/kg)		
	ar seco	vapor	Total
I	0,9720	0,3185	1,2905
II	1,0145	0,3842	1,3987
III	1,0287	0,2937	1,3224
IV	1,0428	0,1971	1,2400
V	1,0570	0,1446	1,2016
Equal	1,0003	0,6428	1,6432

☐ **Massa total de ar seco e vapor** $M_t = \frac{1 + G}{V_t}$

☐ **Massa de ar seco** $M_{ar} = \left(\frac{1}{1 + G} \right) \times M_t$

☐ **Massa de vapor** $M_{vp} = \left(\frac{G}{1 + G} \right) \times M_t$

- G - Umidade específica do ar (kg de vapor / kg de ar seco)
- V_t - Volume total de ar seco e vapor (m³/kg)
- M_t - Massa total de ar seco e vapor (kg / m³)

$$Mt = \frac{1 + 0,2038}{1,2905} \rightarrow Mt = 0,9328$$

$$Mar = \left(\frac{1}{1 + 0,2038} \right) \times 0,9328 \rightarrow Mar = 0,7749$$

$$Mvp = \left(\frac{0,2038}{1 + 0,2038} \right) \times 0,9328 \rightarrow Mvp = 0,1579$$

Fase	Massa (kg/m³)		
	Total	ar seco	vapor
I	0,9328	0,7749	0,1579
II	0,8834	0,7150	0,1684
III	0,8905	0,7562	0,1343
IV	0,9013	0,8065	0,0948
V	0,9030	0,8322	0,0708
Equal	0,8518	0,6086	0,2433

Energia contida no ar seco $Mar \times 0,24$

Energia contida no vapor $Mvp \times 0,45$

Fase	Energia		
	ar seco	vapor	total
I	0,1860	0,0711	0,2570
II	0,1716	0,0758	0,2474
III	0,1815	0,0604	0,2419
IV	0,1936	0,0427	0,2362
V	0,1997	0,0319	0,2316
Equal	0,1461	0,1095	0,2555

Volume total $V_{tot} = \frac{Q_{lat}}{Q_{tot}}$

Volume efetivo $V_{ef} = \frac{V_{tot}}{dT} \times Mag$

Tabela de queda de temperatura

Teor de umidade	Queda de temperatura
acima do PSF	4,0
PSF -> 15%	3,0
15% -> 5%	2,5
abaixo de 5%	2,0

$$V_{tot} = \frac{557,28}{0,2570} \rightarrow V_{tot} = 2168,0264$$

$$V_{ef} = \frac{2168,0264}{4} \times 109.303,6155 \rightarrow V_{ef} = 59.243.281,6977$$

Fase	Calor latente	queda de temperatura	Massa de agua a retirar	Volume total m³	Volume efetivo m³	Vazão m³/h
I	557,2800	4	109303,6155	2168,0264	59243281,6977	767309,7460
II	548,2700	4	43721,4462	2216,3550	24225561,9062	901901,2888
III	545,2100	4	72869,0770	2253,6014	41054462,8115	764883,7788
IV	542,1200	3	25504,1770	2294,9155	19509976,9290	914262,1358
V	538,9800	2,5	40077,9924	2327,1799	37307479,6545	816647,4584
Equal	551,3100	2,5	0,0000	2157,5419	0,0000	0,0000

VENTILAÇÃO

Área de passagem de ar

espessura dos tabiques	0,0330 m
espessura das tábuas	0,0381 m
comprimento das pilhas	3,0000 m
pilhas por câmara	40 unid
altura das pilhas	3,6 m
fator de espaço livre	0,3
área	583,00 m²

$$A = \left(\frac{d}{d+h} \right) \times a \times b \times c$$

Velocidade do ar

Fase	Vazão (m³/h)	Velocidade (m/s)
I	767309,7460	0,3656
II	901901,2888	0,4297
III	764883,7788	0,3644
IV	914262,1358	0,4356
V	816647,4584	0,3891
Equal	0,0000	0,0000

$$Vel = \frac{Vz}{A \times 3600}$$

Potencia dos ventiladores

Fase	Potência (CV)
I	71,0472
II	83,5094
III	70,8226
IV	84,6539
V	75,6155
Equal	0,0000

$$Pot = \frac{Vz \times Pe}{ef \times 75 \times 3600}$$

Maior potência requerida	84,6539
Potência nominal do equipamento	12,0
Total de unidades	8,0

TROCA DE AR

$$G = \frac{UR \times Pv}{1,608 \times (Pat - UR \times Pv)}$$

$$Var = 22,414 \times \frac{Tbs + 273,1}{273,1} \times \frac{1}{28,97}$$

$$Vvp = 22,414 \times \frac{Tbs + 273,1}{273,1} \times \frac{G}{18,02}$$

- G – umidade específica do ar extra-câmara (kg de vapor / kg de ar seco)
- UR – umidade relativa do ar (%)
- Pv – pressão de vapor d'água (kg / cm²) – tabelado
- Pat – pressão atmosférica normal (kg / cm²) – 1,0335129
- Var - Volume de ar seco (m³/kg)
- Tbs - Temperatura do bulbo seco (°C)

Umidade específica extra-câmara		
Temperatura externa	20	
Umidade relativa do ar	60	
Pressão parcial de vapor	0,3178	
Umidade específica extra-câmara	0,1413	
Volume do ar extra-câmara	0,8304	m ³
Volume de vapor extra-câmara	0,1886	m ³
Volume total	1,0190	m ³

$$V_i = G - G_e$$

$$Q_{ar} = \frac{(Ts)}{60}$$

$$V_{a/v} = \frac{(V_t \times Q_{ar})}{60}$$

$$Ab = \frac{V_{a/v}}{Vel \times n}$$

- G – umidade específica do ar (kg de vapor / kg de ar seco)
- Ge – umidade específica do ar extra-câmara (kg de vapor / kg de ar seco)
- Qar – quantidade de ar (kg/min)
- Va/v – volume de ar / vapor d'água (m³ / s)
- Vt – volume total extra-câmara
- Vel - velocidade
- n -

Fase	Umidade	Introdução	taxa de	Introdução
	específica	de vapor	secagem	de ar seco (kg/min)
I	0,2038	0,0625	1415,68	377,34
II	0,2356	0,0943	1627,72	287,77
III	0,1776	0,0363	1357,62	623,15
IV	0,1176	-0,0237	1195,16	-840,48
V	0,0851	-0,0562	877,29	-260,26
Equal	0,3997	0,2584	0,00	0,00

Fase	Introdução de ar / vapor (m³/s)	Aberturas	
		m²	diâmetro
I	6,408273969	2,92	1,51
II	4,887056727	1,90	1,22
III	10,58273293	4,84	1,95
IV	-14,27357167	-5,46	2,07
V	-4,419897348	-1,89	1,22
Equal	0		