
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
DE PRÉ-SECAGEM DE PARTÍCULAS DE PINUS E DE
EUCALIPTO, PARA A PRODUÇÃO DE CHAPAS DE
MADEIRA AGLOMERADA

CARLOS EDUARDO C. DE ALBUQUERQUE
Prof. Assist., M.Sc., DPF-IF-UFRRJ
Doutorando em Eng. Florestal, UFPR

R E S U M O

*E*ste trabalho teve o propósito de desenvolver um equipamento destinado à pré-secagem de partículas de madeira, utilizadas na produção de chapas de madeira aglomerada, onde foram analisados os efeitos dos parâmetros de secagem, tais como a granulometria das partículas, o tempo de pré-secagem e a velocidade do ar, sobre a quantidade de água evaporada. O equipamento de pré-secagem mostrou-se viável e eficiente, sendo indicada a adoção deste sistema de pré-secagem pelas indústrias de chapas de partículas.

Palavras chaves: pré-secagem, partículas de madeira, circulação forçada de ar ambiente.

A B S T R A C T

DEVELOPMENT OF PRE-DRYING SYSTEM
OF PINUS AND EUCALIPTUS PARTICLES
TO PARTICLEBOARD PRODUCTION

This work has the main purpose of developing an equipment destined to the pre-drying of wood particles used in the production of particleboards. The drying effects have been analysed, such as particle geometry, pre-drying time, air velocity, above the evaporated water quantity. The equipment of pre-drying showed to be accomplishable by the points of view of efficiency, being indicated the adoption of this pre-drying system by the particleboard industries.

Key words: pre-drying, wood particles, forced circulation air.

I N T R O D U Ç Ã O

Há aproximadamente 3000 anos a.C., o homem passou a conhecer e a trabalhar com materiais bastante versáteis à base de madeira, tais como os laminados e os compensados, que surgiram no Antigo Egito; as chapas de fibras, utilizadas

a partir do século VI a.C., no Japão; e as chapas de partículas de madeira e os briquetes, que remontam ao início deste século (KOLLMANN, 1975; TSOUJIS, 1991).

O uso de chapas de composição, à base de madeira, tem aumentado significativamente no

mundo, principalmente pelas indústrias do setor moveleiro e da construção civil, que se encontram em plena evolução tecnológica.

Além disso, desde o surgimento das crises energéticas, alguns subprodutos da indústria florestal passaram a representar uma promissora fonte de energia (JENKINS, 1977) a exemplo da briquetagem (ANTUNES, 1982).

Com relação à produção de chapas de composição, em 1991, a produção nacional de chapas de partículas de madeira foi de 660 mil m³ (FAO, 1993), passando para 1150 mil m³ em 1996, com previsão de alcançar 1630 mil m³ em 2001. Outrossim, novas unidades industriais se instalam no país, a exemplo da recente entrada em operação das unidades da Tafisa e da Duratex, na produção de chapas MDF, além da previsão para, a partir de 2001, iniciar-se a produção de chapas OSB (TOMASELLI e DELESPINASSE, 1997).

Deve-se ressaltar que a secagem das partículas de madeira é uma importante operação, que pode limitar a capacidade produtiva das indústrias. A baixa eficiência dos secadores pode causar o “estrangulamento” da produção de chapas de partículas, além de provocar aumentos no consumo energético final.

Em uma pré-secagem, por circulação forçada de ar ambiente, pode-se eliminar a água de capilaridade de forma econômica, reduzindo o tempo de secagem nos tambores rotativos (HARRIS, 1989).

Este trabalho visou ao desenvolvimento de um sistema de pré-secagem de partículas de madeira, através da circulação forçada do ar ambiente, com a finalidade de eliminar-se a água de capilaridade, reduzindo o tempo de permanência das partículas nos secadores convencionais. Partiu-se da premissa de que isto proporcionaria a redução do tempo de secagem e da energia dispendida, além de que minimizaria os defeitos da secagem, que normalmente ocorrem durante a retirada da água de capilaridade, sob condições que utilizam altas temperaturas.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Preparação do material lenhoso

O material lenhoso, utilizado no presente estudo, constituiu de duas misturas de partículas de madeira, sendo uma de *Eucalyptus saligna* Smith. e *Pinus elliottii* Engelm. (A) e outra de *P. elliottii* Engelm. e *P. taeda* L. (B). Esse material foi doado por duas indústrias de chapas de aglomerado, sendo, cada porção, proveniente das respectivas linhas de produção, após os processos de classificação e de secagem, não apresentando resíduos. Em relação à mistura de *E. saligna* Smith. e *P. elliottii* Engelm., não houve condições de se verificar as proporções exatas relativas a cada espécie, uma vez que as mesmas são variáveis na empresa cedente, o mesmo ocorrendo com as procedências dos povoamentos florestais que originaram a mistura. A mistura formada por partículas de madeira de *P. elliottii* Engelm. e de *P. taeda* L., em proporções não definidas pela empresa cedente, originou-se de árvores com idades entre 10 a 12 anos.

O material lenhoso foi acondicionado em sacos plásticos devidamente identificados e, posteriormente, conduzido ao Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira do Instituto de Florestas, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Realizou-se a completa saturação das partículas de madeira, por meio da imersão em água, em um tanque com a capacidade de 1000 litros, para que fossem iniciadas as análises.

2. Montagem do equipamento de pré-secagem

O equipamento projetado para a pré-secagem das partículas de madeira constou, basicamente, de duas estruturas de madeira, além de um conjunto motor-exaustor. A primeira estrutura, aberta em sua porção superior, foi planejada para acondicionar 5 bandejas com fundos de tela de 0,64 mm, através das quais fluía o ar, depois de atravessar uma camada

de partículas de madeira com, aproximadamente 2 centímetros de espessura. Um duto flexível, com 12 centímetros de diâmetro, permitiu interligá-la à segunda estrutura, através de um orifício aberto em uma das suas extremidades. A velocidade do ar, ao passar através da segunda estrutura de madeira, era medida por um anemômetro instalado no interior da mesma. Um conjunto motor-ventoinha, de 1 HP e 220 volts, foi instalado no sistema de pré-secagem, com o objetivo de promover o fluxo do ar, por exaustão. Para tanto, interligou-se a segunda estrutura de madeira ao mesmo, em série, por meio de um duto flexível com 12 centímetros de diâmetro (Figura 1).

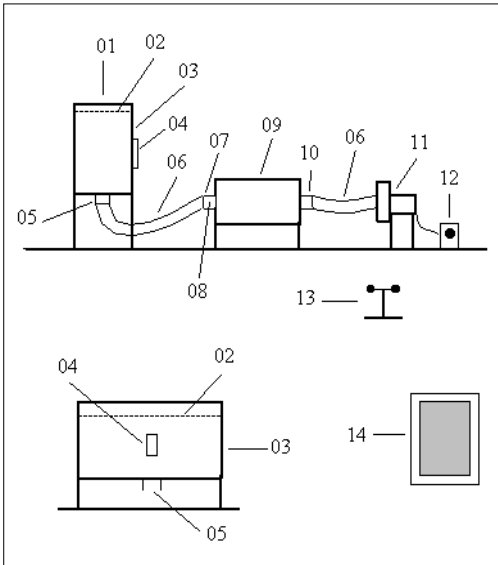


Figura 1 - Esquema do equipamento desenvolvido para pré-secagem das partículas, onde: 01-Área de captura de ar; 02-Localização das bandejas; 03-Estrutura de captura de ar; 04-Conjunto psicométrico; 05-Saída de ar; 06-Duto flexível condutor do ar; 07-Entrada de ar; 08-Localização do anemômetro; 09-Estrutura para monitoramento e instalação do anemômetro; 10-Saída de ar; 11-Conjunto motor-ventoinha; 12-Wattímetro; 13-Anemômetro; 14-Bandeja com fundo de tela.

3. Gerenciamento das condições ambientais

A temperatura e a umidade relativa do ar foram acompanhadas, de forma intensiva, no decorrer dos trabalhos de pré-secagem. Para tanto, utilizou-se um conjunto psicométrico, instalado do lado de fora da estrutura de captação do ar (Figura 1).

4. Pré-secagem das partículas

As misturas de partículas, depois de saturadas, tiveram as suas respectivas umidades determinadas pela norma ABCP M2/71 e, em seguida, foram acondicionadas, em camadas com 2 centímetros de espessura, no interior de bandejas com fundos de tela de 0,64 mm e área útil de 0,05 m². As bandejas foram encaixadas no pré-secador, no ponto de captação do ar (Figura 1).

Para cada mistura de partículas de madeira foram analisados três tempos de pré-secagem, três granulometrias das partículas e três velocidades do ar, obtidas por meio da utilização de somente uma, de três ou das cinco bandejas, colocadas simultaneamente no equipamento (Tabela 1). A combinação das variáveis estudadas, com um número de cinco repetições por tratamento, fez um total de 270 análises, cuja seqüência foi conseguida por meio de artifícios de aleatorização.

5. Análises dos dados

A partir das experimentações foi possível a geração das seguintes variáveis dependentes: água evaporada (g), relação água evaporada por área útil de bandeja (g/m²).

Os valores observados foram analisados por meio de análise de variância, de testes de correlação e de

Tabela 1. Tempos de pré-secagem (min), granulometria das partículas (mm), número de bandejas em teste com as áreas correspondentes (m²) e velocidade do ar (m/seg)

Tempos (minutos)	Granulometrias (mm)	Bandejas em teste	Áreas (m ²)	Velocidades do ar (m/seg)
20	2,80	1	0,05	2,52
40	4,75	3	0,15	0,84
60	6,30	5	0,25	0,50

comparações entre as médias dos tratamentos, através do teste de Tukey, adotando-se o nível de 95% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Pré-secagem das misturas de partículas de madeira

Como o processo utilizado foi o de pré-secagem por circulação forçada de ar à temperatura ambiente, ou seja, sem promover qualquer aquecimento, praticamente se eliminou o gradiente de temperatura, evitando o colapso das partículas de *E. saligna*, espécie suscetível a este problema de secagem, que ocorre durante a eliminação da água de capilaridade.

As misturas de partículas foram analisadas separadamente, sendo que os resultados observados não variaram significativamente entre os materiais estudados. Uma pequena diferença foi verificada, observando-se menores teores médios de água evaporada, reduções no ritmo de secagem e acréscimos no consumo de energia, quando da análise da mistura composta por *E. saligna* Smith e *P. elliotii* Engelm. Este resultado, em parte, deve-se à presença das partículas de eucalipto, madeira cuja densidade básica média é igual a 0,69 g/cm³ (CORRÊA, 1931; ALFONSO, 1982; RESENDE et al, 1993; BRITO, 1993), superior àquelas apresentadas pelos *P. taeda* L. e *P. elliotii* Engelm., de 0,44 e 0,47 g/cm³,

respectivamente (BRITO, 1984). Isto, provavelmente, contribuiu para dificultar a evaporação da água de capilaridade, já que a densidade relaciona-se com a permeabilidade da madeira. Madeiras mais densas, normalmente, secam mais lentamente que as mais leves, por serem as primeiras, geralmente, menos permeáveis à passagem de líquidos (PONCE e WATAI, 1985; MARTINS, 1988). Desta forma, as folhosas, normalmente com maior densidade que as coníferas, necessitam de um tempo maior para a secagem do que as mesmas (MARTINS, 1988).

A mistura com partículas de *E. saligna* apresentou menores ritmos de secagem (g/min) e quantidade de água evaporada (g) que a mistura de *P. taeda* e *P. elliotii*. O eucalipto em questão, de acordo com a literatura, possui uma maior densidade, fato que determinou a sua menor capacidade de absorver umidade, durante a saturação das partículas, quando comparado com as espécies de *Pinus* de densidade inferiores. A madeira mais densa apresenta um volume relativo de espaços vazios menor, o que levou a mistura contendo partículas de eucalipto a apresentar teores de umidade inicial menores, quando comparada com a de partículas de *Pinus*. Dessa forma, apesar da redução do ritmo de secagem e da quantidade de umidade evaporada, o ponto de saturação das fibras foi atingido num menor tempo de secagem.

2. Pré-secagem das partículas em função da velocidade do ar

O equipamento utilizado apresentou uma capacidade de ventilação de cerca de 0,12 m³ de ar por segundo, com valores para a velocidade do ar de 2,52; 0,84 e 0,50 m/seg, utilizando-se uma, três e cinco bandejas, respectivamente.

O estabelecimento das três velocidades do ar permitiu a análise da influência dessa variável sobre a pré-secagem das partículas e, em relação à energia consumida. Determinou-se para cada velocidade do ar um consumo energético específico, em kcal por minuto, em relação à uma determinada área de secagem. Para uma melhor compreensão e interpretação dos resultados, os valores obtidos com a área de sucção de uma bandeja foram convertidos para 1 m².

3. Redução da umidade das partículas de madeira

Foram registradas reduções mais acentuadas da porcentagem de umidade, em função do tempo de pré-secagem, utilizando-se o tempo de 20 minutos. Este resultado deve-se, em parte, ao fato de que, na fase inicial da pré-secagem, retirou-se a água de capilaridade que se encontrava mais próxima à superfície das partículas de madeira e, com o transcorrer do processo, esta umidade foi toda eliminada, atingindo-se o ponto de saturação das fibras,

quando se iniciou o processo de eliminação da água de impregnação, de retirada mais difícil.

As médias das umidades inicial e final das partículas de madeira (%), e as respectivas reduções das umidades (%), em função do tempo de pré-secagem (min), são apresentadas no Tabela 2.

Após análise pelo teste de Tukey (Tabela 3), verificou-se que ocorreram variações nas quantidades de água evaporada (%), em função dos tempos de pré-secagem adotados. Na mistura com as partículas de *E. saligna*, a diferença entre as reduções de umidade foi, em termos absolutos, menor entre os tempos de pré-secagem de 40 e de 60 minutos, quando comparada com a diferença observada nos mesmos tempos, na segunda mistura (5,69% e 18,50%, respectivamente). A alteração no tempo de pré-secagem de 40 para 60 minutos não foi suficiente para alterar a taxa média de redução de umidade na mistura de partículas de *E. saligna* e *P. elliotii*. Isto deve-se, em parte, ao fato de que a madeira de *E. saligna* apresentar densidade superior àquelas dos pinus estudados. Desta propriedade resultou uma menor capacidade de absorção de água durante o processo de saturação, o que levou a mistura com partículas de *E. saligna* a atingir a umidade de saturação das fibras antes dos 40 minutos de pré-secagem. Ao ser atingido o

Tabela 2 .Médias das umidades inicial e final das partículas de madeira (%), com as respectivas reduções das umidades (%), em função do tempo de pré-secagem (min)*

Mistura**	Tempo de pré-secagem (min)	Umidade média (%)	Umidade inicial (%)	Umidade final média (%)	Redução da umidade (%)
A	20	144,41	56,59		87,82
	40	151,27	26,01		125,26
	60	150,10	19,15		130,95
B	20	163,11	73,56		89,55
	40	163,96	39,59		124,37
	60	166,25	23,38		142,87

* Área de captação do ar = 0,05 m²; ** Mistura A: *E. saligna* e *P. elliotii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliotii*

ponto de saturação das fibras, foi iniciada a retirada da água de impregnação, de difícil evaporação à temperatura ambiente, o que aproximou as médias das reduções de umidade (%), tornando-as estatisticamente iguais. Pelo exposto, verifica-se que, para a mistura de partículas de *E. saligna* e *P. elliotii*, o tempo de pré-secagem recomendável, dentre os estudados, seria o de 40 minutos. Já para a mistura de *P. taeda* e *P. elliotii*, o tempo de pré-secagem recomendável seria de 60 minutos, uma vez que todas as médias das reduções de umidade (%) diferiram entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Através da Correlação de Pearson, entre a redução de umidade (%) e o tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas, verificou-se a existência de correlações significativas entre a redução de umidade (%) e o tempo de pré-secagem (min) para as misturas estudadas (Tabela 4).

Pela observação do Tabela 4 e das Figuras 2 e 3, verifica-se a existência de correlações significativas entre a redução de umidade (%) e o tempo de pré-secagem (min), para as misturas estudadas.

Tabela 3. Comparações entre as médias das reduções de umidade (%), em função do tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Mistura*	Tempo de pré-secagem (min)	Observação	Redução de umidade (%)	Teste Tukey**
A	60	45	130,95	a
	40	45	125,26	a
	20	45	87,82	b
B	60	45	142,87	a
	40	45	124,37	b
	20	45	89,55	c

* Mistura A: *E. saligna* e *P. elliotii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliotii*; ** Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 4 . Correlação de Pearson entre a redução de umidade (%) e o tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Mistura de partículas*	Observação	Correlação	T	Significância
A	135	0,5549	7,6932	0,0001
B	135	0,5906	8,4394	0,0001

* Mistura A: *E. saligna* e *P. elliotii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliotii*.

Segundo as empresas fornecedoras do material da pesquisa, as partículas de madeira, após passarem pelo processo de picagem e seleção, entram no processo de secagem com um teor de umidade na faixa de 60 a 100%. A utilização de um sistema de pré-secagem por circulação forçada do ar ambiente pode retirar a água de capilaridade das partículas, dependendo das condições ambientais, num período de funcionamento abaixo de 20 minutos. Na presente experimentação, foram observadas reduções significativas de umidade conforme apresentado no Tabela 3, nos valores médios de 87,82 e 130,95% e de 89,55 e 142,87%, respectivamente, nas misturas de partículas de *E. saligna* e *P. elliotii* e de *P. taeda* e *P. elliotii*, em períodos de pré-secagem de 20 e 60 minutos, num ambiente com temperatura média de 28°C e umidade relativa média de 69%.

4. Massa de água evaporada

4.1. Massa de água evaporada em função da velocidade do ar e do tempo de pré-secagem

Comparações realizadas entre as médias de massa de água evaporada (g/m² de tela), em função da velocidade do ar (m/seg), dentro e entre os tempos de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas, resultaram em alterações significativas nas quantidades de água evaporada (g/m² de tela), para as duas misturas de partículas. A velocidade do ar de 2,52 m/seg proporcionou condições à evaporação das maiores massas de água, sendo seguida, em escala decrescente, pelas velocidades de 0,84 e de 0,50 m/seg, fato comprovado estatisticamente, para as duas misturas de partículas.

O Tabela 5 apresenta as comparações entre as médias de

massa de água evaporada (g/m² de tela), em função da velocidade do ar (m/seg), dentro e entre os tempos de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Quando analisados separadamente, resultados estatisticamente iguais foram observados em relação à massa de água evaporada, nos tempos de pré-secagem de 40 e de 60 minutos, para as duas misturas de partículas, dentro das respectivas velocidades do ar. Desta forma, não levando-se em consideração o consumo energético do equipamento de pré-secagem e, com vistas à evaporação de maiores massas de água, parece ser recomendável a adoção do tempo de pré-secagem de 40 minutos com a velocidade do ar de 2,52 m/seg, para as duas misturas de partículas.

4.2. Massa de água evaporada em função da velocidade do ar e da granulometria das partículas

A Tabela 6 apresenta as comparações entre as médias de água evaporada (g/m² de tela), em função da velocidade do ar (m/seg), dentro e entre as granulometrias das partículas (mm), para as duas misturas de partículas.

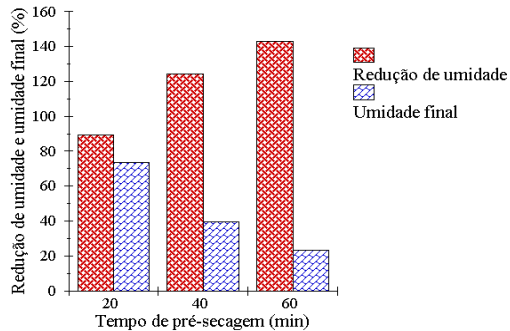


Figura 3. Médias da redução de umidade (%) e umidade final (%) da mistura de partículas de *Pinus taeda* e *Pinus elliotii*, em função dos tempos de pré-secagem (min).

Observa-se na Tabela 6, ao considerar-se o resultado médio das três granulometrias das partículas (mm) e as três velocidades do ar (m/seg), que as alterações nas quantidades de água evaporada (g/m² de tela) foram significativas, para as duas misturas de partículas. Nesse caso, a velocidade do ar de 2,52 m/seg proporcionou condições à evaporação das maiores massas de água, sendo seguida, em escala decrescente, pelas velocidades de 0,84 e de 0,50 m/seg, fato comprovado estatisticamente, para as duas misturas de partículas.

analisadas separadamente, observou-se que, para a mistura A, a granulometria das partículas de 2,80 mm, associada à velocidade do ar de 2,52 m/seg, proporcionou a evaporação da maior massa de água (g/m² de tela). Para a mistura B, resultados estatisticamente iguais foram observados entre as granulometrias de 2,80 e de 4,75 mm, associadas à velocidade do ar de 2,52 m/seg. Desta forma, sem levar-se em consideração o consumo energético do sistema de pré-secagem das partículas, a granulometria de 2,80 mm associada a velocidade do ar de 2,52 m/seg. seriam as condições ideais.

Quando as granulometrias das partículas foram

Tabela 5. Comparações entre as médias da água evaporada (g/m² de tela), em função da velocidade do ar (m/seg), dentro e entre os tempos de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Mistura de partículas*	Velocidade do ar (m/seg)	Água evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**	Tempo de pré-secagem (min)	Água evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**
A	2,52	2174,48	a	60	2405,62	a
				40	2230,25	a
				20	1887,55	b
	0,84	1944,22	b	60	2373,49	a
				40	2124,50	a
				20	1334,67	b
0,50	1557,34	c	60	1883,53	a	
			40	1670,68	a	
			20	1117,80	b	
B	2,52	2643,91	a	60	2995,98	a
				40	2809,91	ab
				20	2125,84	b
	0,84	2314,14	b	60	2840,70	a
				40	2516,73	a
				20	1585,01	b
0,50	1756,36	c	60	2258,37	a	
			40	1575,64	ab	
			20	1435,07	b	

*Mistura A: *E. saligna* e *P. elliottii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliottii*; ** Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

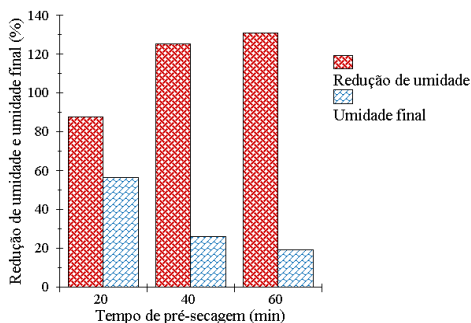


Figura 2 . Médias da redução de umidade (%) e da umidade final (%) da mistura de partículas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliptii*, em função dos tempos de pré-secagem (min).

Tabela 6 . Comparações entre as médias da água evaporada (g/m² de tela), em função da velocidade do ar (m/seg), dentro e entre as granulometrias das partículas (mm), para as duas misturas de partículas*

Mistura de partículas*	Velocidade do ar (m/seg)	Água evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**	Tempo de pré-secagem (min)	Água evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**
A	2,52	2174,48	a	2,80	2336,01	a
				4,75	2149,93	b
				6,30	2037,48	b
	0,84	1944,22	b	2,80	2037,48	a
				4,75	1957,16	a
				6,30	1838,02	b
0,50	1557,34	c	2,80	1716,20	a	
			4,75	1542,17	b	
			6,30	1413,66	b	
B	2,52	2643,91	a	2,80	2889,29	a
				4,75	2547,52	ab
				6,30	2394,91	b
	0,84	2314,14	b	2,80	2631,86	a
				4,75	2143,24	a
				6,30	2167,34	a
0,50	1756,36	c	2,80	1788,49	a	
			4,75	1751,00	a	
			6,30	1729,58	a	

* Mistura A: *E. saligna* e *P. elliptii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliptii*; ** Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quando as granulometrias das partículas foram analisadas separadamente, observou-se que, para a mistura A, a granulometria das partículas de 2,80 mm, associada à velocidade do ar de 2,52 m/seg, proporcionou a evaporação da maior massa de água (g/m^2 de tela). Para a mistura B, resultados estatisticamente iguais foram observados entre as granulometrias de 2,80 e de 4,75 mm, associadas à velocidade do ar de 2,52 m/seg. Desta forma, sem levar-se em consideração o consumo energético do sistema de pré-secagem das partículas, a granulometria de 2,80 mm associada a velocidade do ar de 2,52 m/seg. seriam as condições ideais.

4.3. Massa de água evaporada em função do tempo de pré-secagem

Como o processo de pré-secagem foi realizado a 20, 40 e 60 minutos, foi possível analisar o comportamento da evaporação da umidade das partículas de madeira, para cada tempo estudado.

A Tabela 7, bem como a Figura 4, apresentam as quantidades médias de água evaporada das partículas de madeira (g/m^2 de tela), em função do tempo de pré-secagem, para cada mistura de partículas. As variações ocorridas podem ser mais facilmente verificadas pela Figura 4, onde nota-se o aumento da quantidade de água evaporada (g/m^2) com o aumento do tempo de pré-secagem, dentro de cada uma das misturas de partículas de madeira. Entre as duas misturas, notou-se que um maior teor de umidade foi evaporado da mistura de *P. taeda* e *P. elliotii*, em função da ausência de partículas de *E. saligna* e pelos motivos expostos na discussão da Tabela 3.

A Tabela 8 apresenta a correlação de Pearson entre a água evaporada (g) e o tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas. Foram observadas correlações positivas significativas entre a quantidade de água evaporada (g) e o tempo de pré-secagem das partículas de madeira (min). As correlações

se mantiveram no mesmo nível para ambas as misturas de partículas de madeira estudadas. Porém, estas correlações poderiam ter sido mais altamente significativas se o ritmo de pré-secagem, verificado no intervalo de 20 para 40 minutos, também se mantivesse no intervalo de 40 para 60 minutos (Tabela 9). Os ritmos de pré-secagem se comportaram de forma irregular, dentro dos tempos de pré-secagem analisados. A Tabela 9 apresenta o incremento observado na quantidade de água evaporada (%), em função da variação no tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas de madeira.

Os dados apresentados na Tabela 9 mostram que, ao se aumentar o tempo de pré-secagem, o ritmo da secagem diminuiu. Este comportamento ocorreu devido ao fato de que, no início da pré-secagem, eliminou-se muita água de capilaridade. Quando o período de pré-secagem foi estendido, atingiu-se a umidade de saturação das fibras das partículas de madeira e iniciou-se a retirada da água de impregnação, de evaporação mais difícil.

No tempo de pré-secagem de 60 minutos isto foi verificado porque, a partir de 40 minutos, eliminou-se, principalmente, água de impregnação, além de uma pequena quantidade de água de capilaridade ainda presente nas partículas de madeira. No tempo de 40 minutos de pré-secagem foram retiradas água livre e água de impregnação. No tempo de 20 minutos de pré-secagem, eliminou-se, principalmente, água livre.

4.4. Massa de água evaporada em função da granulometria das partículas

A Tabela 10 apresenta as comparações entre as médias de água evaporada (g/m^2), considerando os resultados nas três velocidades do ar empregadas, em função da granulometria das partículas, para as duas misturas de partículas. As médias de água evaporada, em g/m^2 , não diferiram

estatisticamente entre si, quando da análise da mistura composta por partículas de *E. saligna* e *P. elliotii*, nas granulometrias de 2,80 e 4,75 mm, o mesmo ocorrendo quando foram comparadas entre si as granulometrias de 4,75 e 6,30 mm. Quando comparadas, as granulometrias de 2,80 e 6,30 mm foram estatisticamente diferentes, ou seja, a diferença entre essas duas granulometrias foi suficiente para alterar a quantidade de água evaporada, que apresentou um valor 15,14% superior na granulometria de 2,80 mm (Tabela 11). Nesta mistura de partículas, as variações nas quantidades de água evaporada, em g/m², em função da granulometria média das partículas, foram pequenas e relativamente homogêneas, sendo significativa quando comparadas as granulometrias de 2,80 e de 6,30 mm.

A mistura composta por partículas de *P. taeda* e *P. elliotii* apresentou médias de água evaporada, em g/m², estatisticamente iguais, quando da análise das granulometrias de 4,75 e 6,30 mm, sendo as referidas granulometrias estatisticamente diferentes da granulometria de 2,80 mm, que apresentou uma quantidade de água evaporada 17,77% superior àquela apresentada pela granulometria de 6,30 mm (Tabela 11).

As diferenças observadas entre as quantidades de água evaporada, em g/m², para as duas misturas de partículas de madeira, podem ser explicadas, em parte, pela presença do *E. saligna* em uma das misturas, que apresentou uma maior dificuldade de perda da umidade. Além disso, a redução da granulometria provoca um aumento da superfície de contato com o ar e da permeabilidade das partículas. Isto foi notado, de forma mais acentuada, na mistura composta por partículas de *P. taeda* e *P. elliotii*, na porção correspondente à granulometria de 2,80 mm.

A Tabela 11 e a Figura 5 apresentam os incrementos percentuais na quantidade de água evaporada, em g/m² de tela, em função das alterações na granulometria média das partículas de madeira.

As alterações observadas na mistura composta

por partículas de *E. saligna* e *P. elliotii* decorrem, em parte, das diferenças anatômicas entre as duas espécies. Isto ocasionou mudanças na permeabilidade das partículas de madeira, o que levou a mistura a apresentar quantidades de água evaporada, em g/m² de tela, de forma mais homogênea distribuída entre as granulometrias estudadas (Tabela 11). Para granulometrias distintas, supõe-se que os resultados sejam outros.

Um menor incremento na quantidade de água evaporada foi observado quando da alteração da granulometria de 6,30 para 4,75 mm, quando comparado ao incremento verificado após a alteração da granulometria de 4,75 para 2,80 mm, na mistura de *P. taeda* e *P. elliotii*. Isto pode ter ocorrido devido à similaridade anatômica das duas espécies. Na granulometria de 2,80 mm a saída da água foi facilitada por uma maior permeabilidade das partículas de madeira, em decorrência das menores dimensões e da maior superfície específica, quando comparada à granulometria de 6,30 mm (Tabela 11).

A Tabela 12 apresenta a correlação de Pearson entre a água evaporada (g) e a granulometria (mm), para as duas misturas de partículas de madeira (A e B). Foram observadas correlações negativas de significância relativamente baixa entre as variáveis. Isto indica uma pequena influência das granulometrias estudadas sobre a quantidade de água evaporada (g), para as duas misturas de partículas de madeira estudadas. O aumento da granulometria das partículas de madeira provoca a redução da quantidade de água evaporada, ou seja, reduz a eficiência do equipamento.

O Quadros 5 e 6 apresentam as comparações entre as médias de água evaporada (g/m²), em função da velocidade do ar (m/seg), para as duas misturas de partículas de madeira.

Os resultados das comparações entre as médias de água evaporada (g/m²) demonstram que esta variável é afetada pela velocidade do ar (m/seg). Resultados mais satisfatórios, em termos de retirada da umidade das partículas de madeira, são observados quando da

utilização da maior velocidade do ar, de 2,52 m/seg, para ambas as misturas estudadas (Tabelas 5 e 6).

A Tabela 13 apresenta a correlação de Pearson entre a quantidade de água evaporada (g) e a velocidade do ar (m/seg), para as duas misturas de partículas de madeira.

Os resultados apresentados na Tabela 13 evidenciam a existência de uma correlação positiva significativa, entre a quantidade de água evaporada (g) e a velocidade do ar (m/

seg), ou seja, quanto maior a velocidade do ar, maior será a quantidade de água evaporada. Entretanto, os incrementos na quantidade de água evaporada, apresentados nos quadros 5 e 6, não foram proporcionais aos correspondentes incrementos na velocidade do ar. Aumentos na velocidade do ar, de 0,84 para 2,52 m/seg, provocaram menores incrementos na quantidade de água evaporada do que aqueles observados quando da passagem de 0,50 para 0,84 m/seg.

A Tabela 14 e a Figura 6 apresentam os

Tabela 8. Correlação de Pearson entre a água evaporada (g) e o tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Mistura de Partículas*	Observação	Correlação	T	Significância
A	135	0,5815	8,2429	0,0001
B	135	0,5643	7,8838	0,0001

* Mistura A: partículas de *E. saligna* e *P. elliotii*; Mistura B: partículas de *P. taeda* e *P. elliotii*.

Tabela 9. Incremento na quantidade de água evaporada (%), em função da variação no tempo de pré-secagem (min), para as duas misturas de partículas.

Variação no Tempo de Pré-Secagem (min)	Mistura de Partículas*	Incremento na Evaporação (%)
20-40	A	38,83
	B	34,13
40-60	A	10,58
	B	17,28
20-60	A	53,52
	B	57,31

Mistura A: *E. saligna* e *P. elliotii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliotii*.

Tabela 7. Comparações entre as médias da água evaporada, (g/m² de tela), em função do tempo de pré-secagem (min).

Mistura*	Tempo de pré-secagem (min)	Observação	Água evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**
A	60	45	2220,88	a
	40	45	2008,48	b
	20	45	1446,68	c
B	60	45	2698,35	a
	40	45	2300,76	b
	20	45	1715,31	c

* Mistura A: *E. saligna* e *P. elliptii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliptii*; ** Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 10. Comparações entre as médias de água evaporada (g/m²), considerando as três velocidades do ar empregadas, em função da granulometria (mm), para as duas misturas de partículas*

Mistura*	Granulometria (mm)	Observação	Água Evaporada (g/m ² de tela)	Teste Tukey**
A	2,80	45	2029,90	a
	4,75	45	1883,09	ab
	6,30	45	1763,05	b
B	2,80	45	2469,88	a
	4,75	45	2147,26	b
	6,30	45	2097,28	b

* Mistura A: *E. saligna* e *P. elliptii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliptii*; ** Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 11. Incrementos percentuais na quantidade de água evaporada (g/m²), em função das variações na granulometria (mm), para as duas misturas de partículas*

Mistura**	Variação granulométrica (mm)			Incremento (%)
A	4,75	⊗	2,80	7,80
	6,30	⊗	4,75	6,81
	6,30	⊗	2,80	15,14
B	4,75	⊗	2,80	15,02
	6,30	⊗	4,75	2,38
	6,30	⊗	2,80	17,77

* Área de captação do ar = 0,05 m²; ** Mistura A: *E. saligna* e *P. elliptii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. elliptii*.

Tabela 12. Correlação de Pearson entre a água evaporada (g) e a granulometria (mm), para as duas misturas de partículas.

Mistura de Partículas*	Observação	Correlação	T	Significância
A	135	-0,2008	-2,3633	0,0091
B	135	-0,2194	-2,5933	0,0048

* Mistura A: *E. saligna* e *P. Elliottii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. Elliottii*.

Tabela 13. Correlação de Pearson entre a quantidade de água evaporada (g) e a velocidade do ar (m/seg), para as duas misturas de partículas.

Mistura de Partículas*	Observação	Correlação	T	Significância
A	135	0,4086	5,1623	0,0001
B	135	0,4488	5,7917	0,0001

* Mistura A: *E. saligna* e *P. Elliottii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. Elliottii*.

Tabela 14. Variação da velocidade do ar (m/seg) e os correspondentes incrementos na evaporação da água (%), para as duas misturas de partículas

Variação da Velocidade do Ar (m/seg)	Mistura de Partículas*	Incremento na Evaporação (%)
0,50 → 0,84	A	24,84
	B	31,76
0,84 → 2,52	A	11,84
	B	14,25
0,50 → 2,52	A	39,63
	B	50,53

* Mistura A: *E. saligna* e *P. Elliottii*; Mistura B: *P. taeda* e *P. Elliottii*.

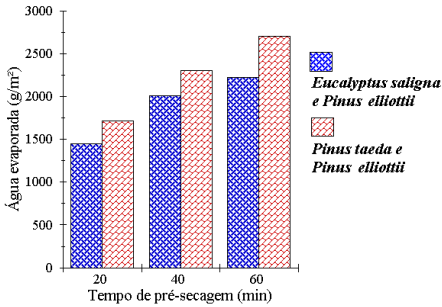


Figura 4. Água evaporada (g/m²), em função do tempo de pré-secagem (min), para cada mistura de partículas de madeira.

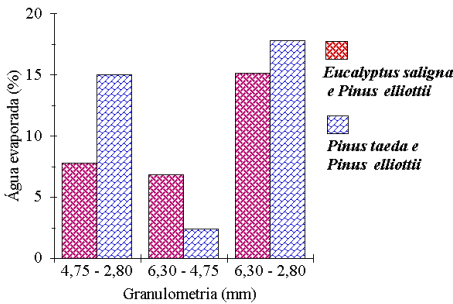


Figura 5. Variação na quantidade de água evaporada (%), para 0,05 m² de tela, em função da granulometria (mm), para as duas misturas de partículas.

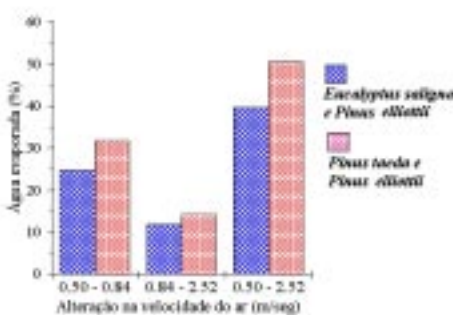


Figura 6. Incrementos percentuais na quantidade de água evaporada (g), em função das alterações na velocidade do ar (m/sec), para as duas misturas de partículas.

incrementos percentuais na quantidade de água evaporada (g), em função das alterações na velocidade do ar (m/seg), para as duas misturas de partículas de madeira.

Verificou-se que o aumento na velocidade do ar de 0,84 para 2,52 m/seg, proporcionou um aumento percentual menor na quantidade de água evaporada, quando comparado com aquele verificado na faixa de 0,50 para 0,84 m/seg. Há evidências de que os incrementos na quantidade de água evaporada não sejam diretamente proporcionais aos correspondentes incrementos na velocidade do ar.

Ao aumentar-se progressivamente a velocidade do ar, os correspondentes aumentos na quantidade de água evaporada tendem a ser relativamente menores. Este fato pode ser explicado, em parte, pelo fato de que o aumento na velocidade de passagem do ar ao redor das partículas de madeira, saturadas de umidade, aumente o ritmo de evaporação até um certo limite. A relação entre o aumento da velocidade do ar e o incremento da quantidade de água evaporada não é direta, ou seja, com o progressivo aumento da velocidade do ar, a taxa de evaporação da umidade das partículas aumenta até um certo ponto, quando, então, começa a decrescer. Vale lembrar que a velocidade de evaporação da umidade presente na madeira, principalmente a água de capilaridade, envolve vários outros fatores, tais como permeabilidade, densidade, espessura da camada de partículas, umidade relativa do ar, entre outros (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

CONCLUSÕES

Após os testes com o equipamento, projetado para a pré-secagem de partículas de madeira, sob diferentes condições de trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

- 1.O equipamento é eficiente na secagem de partículas de madeira, chegando às exigências para a produção de chapas;

2. O equipamento parece ser viável do ponto de vista econômico, principalmente quando são utilizados tempos de pré-secagem ao redor de 20 minutos, velocidade do ar de 0,50 m/seg. e granulometria das partículas abaixo de 6,30 mm.;

3. Como os testes foram realizados com as partículas da camada interna das chapas, espera-se que, com as partículas da camada externa, com granulometrias mais reduzidas, os resultados ainda sejam melhores;

4. Em função do tempo necessário para ser atingido o ponto de saturação das fibras (PSF), deve ser adotado o tempo de pré-secagem de 40 minutos para a mistura de *E. saligna* e *P. elliotii*. Para a mistura de *P. taeda* e *P. elliotii* deve ser utilizado tempo de pré-secagem em torno de 50 minutos;

5. A velocidade do ar tem uma influência significativa sobre a pré-secagem das partículas de madeira. Fixando-se as demais condições de pré-secagem, como a área de captação de ar, o tipo das partículas, o tempo de pré-secagem e as condições ambientais, a quantidade de água evaporada será superior, quanto mais elevada for a velocidade do ar, embora numa relação não diretamente proporcional;

RECOMENDAÇÕES

1. A adoção de exaustores de ar melhor dimensionados, facilmente encontrados no mercado, permitirá um aumento da eficiência do sistema de pré-secagem;

2. A implantação do sistema de pré-secagem nas indústrias é relativamente simples, uma vez que as empresas do setor de produção de chapas já utilizam de grandes exaustores de ar, muitas vezes trabalhando de forma ociosa;

3. Sistemas de pré-secagem, com o mesmo princípio de funcionamento do apresentado neste trabalho, podem ser instalados sob

esteiras transportadoras de partículas, antes do secador, de forma que, por sucção e pelo contato com o ar em movimento, a umidade das partículas é reduzida, sem acarretar aumentos de energia para as empresas do setor.

BIBLIOGRAFIA CITADA

ALFONSO, V. A. Caracterização anatômica de madeira e casca das principais espécies de *Eucalyptus* do Estado de São Paulo. *Silvicultura*, São Paulo, v.8, n. 28, p.720-725, jan-fev. 1982. Edição especial / IV Congresso Florestal Brasileiro.

ANTUNES, R. C. Briquetagem de carvão vegetal. In: PENEDO, W.R. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte, CETEC-Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982, p.197-206. (Publicações Técnicas, 8)

BRITO, E. O. *A viabilidade de utilização de espécies de pinus para a produção de chapas de composição estruturais "waferboards"*. Curitiba: [s.n.], 1984. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias Universidade Federal do Paraná, 1984.

BRITO, J. O. Estudos preliminares de retificação térmica da madeira de eucalipto. *Silvicultura*, São Paulo, v.2, p.774, set. 1993. Edição especial / VII Congresso Florestal Brasileiro e I Congresso Florestal Panamericano.

CORRÊA, M. P. *Dicionário das plantas úteis do Brasil*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, v.2, 1931.

FAO-YEARBOOK FOREST PRODUCTS (1980 - 1991). Roma, FAO, 1993. 335p. (FAO Forestry series, 26).

GALVÃO, A.P.M., JANKOWSKY, I. P. *Secagem racional da madeira*. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

- HARRIS, R. A. Accelerated ambient air-drying of wood fuel. *Forest Products Journal*, Madison, v.39, n.5, p.34-36, may 1989.
- JENKINS, N. Will biomass energy compete for forest industries raw materials? *World Wood*, San Francisco, v.18, n.12, p.20, nov. 1977.
- KOLLMANN, F. F. P., KUENZI, E. W., STAMM, A. J. *Principles of wood science and technology*. Berlin: Springer-Verlag, v.2, 1975.
- MARTINS, V. A. *Secagem de madeira serrada*. Brasília : IBDF / DPq-LPF, 1988. 56p. il.
- PONCE, R. M. & WATAI, L. T. *Manual de secagem da madeira*. Brasília: MIC/STI-IPT, 1985. 70p. (Documentos, 22)
- RESENDE, M. A., SAGLIETTI, J. R. C., MARTINEZ, J. C. Estudo das variações da massa específica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Silvicultura*, São Paulo, v.2, p.629-635, set. 1993. Edição especial / VII Congresso Florestal Brasileiro e I Congresso Florestal Panamericano.
- TOMASELLI, I., DELESPINASSE, B. A indústria de painéis no Brasil. *Informativo STCP*, Curitiba, v.1, n.1. p.16-20, março 1997.
- TSOUMIS, G. T. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. Nova York: Chapman & Hall, 1991. 494p.