

ELIO JOSÉ SANTINI

SECAGEM DE MADEIRA SERRADA EM ESTUFA SOLAR E SUA COMPARAÇÃO COM OS MÉTODOS CONVENCIONAIS

Dissertação submetida à consideração da Comissão Examinadora, como requisito parcial na obtenção do título de "Mestre em Ciências - M. Sc.", no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA
1981




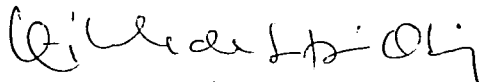
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

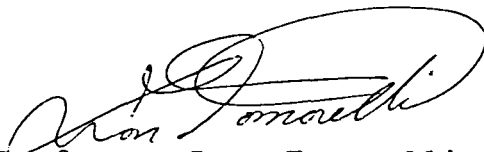
PARECER

Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato ELIO JOSÉ SANTINI, sob o título "SECA GEM DE MADEIRA SERRADA EM ESTUFA SOLAR E SUA COMPARAÇÃO COM OS METODOS CONVENCIONAIS" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais. Observação: O critério de avaliação da Dissertação e defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas APROVADA ou NÃO APROVADA.

Curitiba, 24 de setembro de 1981


Professor Paulo Galvão, Ph.D
Primeiro Examinador


Professor Luiz Carlos de Sampaio Oliveira, M.Sc
Segundo Examinador


Professor Ivan Tomaselli, Ph.D
Presidente



À minha esposa JUSSARA

À minha filha RENATA

À memória de meu pai

EURÉLIO SANTINI

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Dr. Ivan Tomaselli por suas sugestões, orientações, estímulos, compreensão e amizade.

Aos co-orientadores Professor Dr. Peter Karstedt e Professora Aracely Vidal Gomes.

A Universidade Federal de Santa Maria que permitiu a realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, opção Tecnologia de Produtos Florestais, na Universidade Federal do Paraná.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná por possibilitar a realização deste Curso e do presente trabalho.

A Financial Empreendimentos Florestais S.A. de Campo Grande (MS) e a Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF), pelo auxílio financeiro.

As Indústrias Zipperer S.A. de São Bento do Sul (SC), por ceder a madeira para secagem.

A Indústria de Máquinas e Aparelhos Paraná Limitada (IMAPA) pela cessão do ventilador.

Aos funcionários da área de Tecnologia da Madeira da UFPR. pelos inestimáveis auxílios.

Aos demais professores, funcionários e colegas de Curso que direta ou indiretamente colaboraram.

BIOGRAFIA

ELIO JOSÉ SANTINI, filho de Eurélio Santini e Ana Carolina Tascheto Santini, nasceu em Cacequi, Estado do Rio Grande do Sul, no dia 21 de agosto de 1949.

Concluiu o Curso primário em 1963 no Grupo Escolar "Coronel Pilar", o Curso Ginásial em 1967 no Ginásio Estadual "Padre Caetano Pagliuca", e o 2º Grau em 1971 no Colégio Estadual "Professora Maria Rocha" de Santa Maria.

Em 1972 iniciou o Curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se em julho de 1976.

Em março de 1977 ingressou na Universidade Federal de Santa Maria como Auxiliar de Ensino.

Iniciou em março de 1979, na Universidade Federal do Paraná, o Curso de Mestrado em Engenharia Florestal com especialização na Área de Tecnologia de Produtos Florestais, concluindo os requisitos para o Grau de M.Sc. em julho de 1980.

Atualmente exerce a função de Professor Assistente junto ao Departamento de Ciências Florestais. Exerce ainda, na Universidade Federal de Santa Maria, a função de Executor do Sub-Projeto "Tecnologia da Madeira" mantido com a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos).

S U M Á R I O

	Página
Lista de Figuras	xi
Lista de Quadros	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Aspectos físicos da secagem de madeiras	3
2.1.1. Tipos de água existente na madeira ...	3
2.1.2. Desorção	5
2.1.3. Fatores que influem na secagem da ma- deira	7
2.1.3.1. Fatores inerentes à madeira..	7
2.1.3.2. Fatores inerentes ao ambiente.	10
2.2. Secagem solar	13
2.2.1. Generalidades	13
2.2.2. Princípio da secagem solar	13
2.2.3. Estufas solar	14
2.2.3.1. Construção e materiais empre- gados	14
2.2.3.2. Orientação da estufa	17
2.2.3.3. Inclinação do teto	18
2.2.3.4. Coletores de energia solar ..	20
2.2.3.5. Armazenamento de calor	22

	Página
2.2.3.6. Circulação do ar interno	24
2.2.3.7. Controle e registro da temperatura e umidade relativa do ar	26
2.2.3.8. Sistema de isolamento	29
2.2.3.9. Custos de construção	30
2.2.3.10. Relação entre área do teto e volume da estufa solar	32
2.2.4. Resultados obtidos	32
2.2.4.1. Tempo de secagem e teor de umidade final.....	32
2.2.4.2. Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio	35
2.2.4.3. Qualidade da madeira secada..	39
2.2.4.4. Possibilidades de emprego da secagem solar	41
2.2.5. Experiências brasileiras	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1. Coleta e preparo do material	49
3.2. Desenvolvimento da estufa solar	49
3.2.1. Estudos e testes preliminares	49
3.2.2. Construção da estufa piloto	52
3.2.3. Testes operacionais	55
3.2.3.1. Funcionamento da estufa vazia	55
3.2.3.2. Funcionamento da estufa carregada	55
3.3. Métodos de secagem utilizados	57
3.3.1. Secagem ao ar livre	57

3.3.1.1.	Local do experimento	57
3.3.1.2.	Empilhamento	58
3.3.1.3.	Registro dos fatores envolvidos	58
3.3.1.4.	Controle do teor de umidade..	58
3.3.2.	Secagem solar	62
3.3.2.1.	Empilhamento	62
3.3.2.2.	Controle do processo de seca- gem	62
3.3.2.3.	Controle do teor de umidade..	63
3.3.3.	Secagem em estufa convencional	63
3.3.3.1.	Equipamento de secagem	63
3.3.3.2.	Controle do processo de seca- gem	65
3.3.3.3.	Controle do teor de umidade..	66
3.4.	Parâmetros estabelecidos para comparação	66
3.4.1.	Teor de umidade final e tempo de seca- gem	66
3.4.2.	Taxa de secagem	66
3.4.3.	Contração da madeira	67
3.4.4.	Qualidade da madeira	68
3.5.	Análise e delineamento estatístico.....	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1.	Desempenho da estufa solar	70
4.1.1.	Sistema de isolamento	70
4.1.2.	Estufa vazia	75
4.1.2.1.	Insolação e temperatura	75
4.1.2.2.	Temperatura e umidade	79
4.1.2.3.	Velocidade do ar	83
4.1.3.	Estufa carregada	84

4.4.2. Juros de capital	136
4.4.3. Depreciação	138
4.4.4. Mão-de-obra	139
4.4.4.1. Controle do processo	140
4.4.4.2. Manutenção	140
4.4.5. Energia	141
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	145
RESUMO	148
SUMMARY	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
APÊNDICES	158
Apêndice 1. Desenho da estufa solar	159
Apêndice 2. Avaliação do sistema de isolamento da estufa solar	161
Apêndice 3. Quadro dos dados da variação diária da temperatura interna e externa da estufa solar vazia	163
Apêndice 4. Dados meteorológicos médios para a região de Curitiba	165
Apêndice 5. Correlação parcial	167
Apêndice 6. Quadro das médias de comprimento das rachaduras, empenos em arco, em ca- noa e torcido, em mm, nos três pro- cessos de secagem	169
Apêndice 7. Análise da variância e Testes de Tukey .	172
Apêndice 8. 1) Quadros dos custos de investimento para os três processos de secagem. 2) Cálculo dos custos de secagem	178

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
01	Mini-estufa usada nos testes preliminares	51
02	Relação entre a época do ano e a incidência dos raios solares sobre a estufa solar em Curitiba (Latitude $25^{\circ}26'$, Longitude $49^{\circ}17'$, Altitude 900m)	53
03	Detalhes da construção das paredes de tijolos .	54
04	Estufa solar utilizada no experimento	56
05	Pilhas de madeira para a secagem ao ar livre ..	59
06	Metodologia adotada para a confecção das amostras de secagem	60
07	Esquema simplificado da estufa convencional utilizada neste estudo	64
08	Tempo de queda de temperatura desde 60° até 30°C , em alguns testes realizados com a mini-estufa .	73
09	Relação entre a insolação (I) e a temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) da estufa solar vazia	76
10	Variação diária das diferenças de temperatura (Δt) mínima, média e máxima durante os testes com a estufa vazia	78
11	Variação média diária da temperatura, umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (U_{eq}) interna e externa, verificada durante o período de testes com a estufa solar vazia	80

Figura	Página
12	Relação entre temperatura (T), umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (Ueq) na estufa solar vazia 81
13	Influência da diferença de temperatura (Δt) na umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (Ueq) da estufa solar vazia 82
14	Curva de secagem do teste experimental realizado com uma carga mista de madeira 85
15	Oscilação da temperatura máxima interna (T_i) e externa (T_e), e da insolação (I) durante a secagem solar de uma carga mista de madeira 86
16	Variação média mensal da umidade de equilíbrio (Ueq), umidade relativa do ar (UR) e temperatura para a região de Curitiba (adaptado de GALVÃO ¹⁴ e HOLZMANN & GUARITA ²³) 91
17	Taxa de secagem média de duas pilhas de madeira seca ao ar livre com diferentes teores de umidade inicial 92
18	Contração média em espessura e largura (%) em função do tempo de secagem ao ar livre 94
19	Influência da insolação (I) na temperatura ($T_{m\acute{a}x}$) da estufa solar carregada 95
20	Efeito do teor de umidade de madeira (TU) na temperatura da estufa solar ($T_{m\acute{a}x}$), para os dias com insolação superior a 8 horas 97
21	Variação das médias diárias de temperatura, umidade de equilíbrio e umidade relativa em dois

Figura	Página
estágios de secagem solar: 93 - 30% e 30 - 12% de teor de umidade	99
22 Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e insolação diária (I) duran- te o período de secagem solar (CARGA D)	100
23 Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e insolação diária (I) duran- te o período de secagem solar (CARGA E)	101
24 Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e insolação diária (I) duran- te o período de secagem solar (CARGA F)	102
25 Curvas de secagem para os três métodos estuda- dos	120
26 Taxa de secagem média observada nos três méto- dos de secagem, em diferentes intervalos de umidade da madeira	122
27 Efeito do teor de umidade na contração de <i>Ocotea catharinensis</i> submetida a secagem ao ar livre, solar e convencional	124
28 Estufa solar desenvolvida para a execução do experimento	160

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
01	Programa de secagem utilizado para tábuas de 25mm de <i>Ocotea catharinensis</i>	65
02	Isolamento da mini-estufa - tempo médio em horas, da queda de temperatura de 60° até 30°C .	70
03	Variação do teor de umidade da madeira após 55 e 90 dias de secagem ao ar livre	89
04	Média da insolação diária em horas, observada em Curitiba no período 1958/1970 (adaptado de CHISI ¹⁵)	103
05	Teor de umidade e tempo de secagem das três repetições na estufa solar	104
06	Comparação quanto ao tempo de secagem aproximado, entre o experimento de Curitiba e alguns estudos conduzidos em outras partes do mundo .	107
07	Teor de umidade e tempo de secagem das três repetições na estufa convencional	111
08	Relação entre taxa de secagem, teor de umidade, e umidade de equilíbrio da madeira durante a secagem convencional	113
09	Tempo de secagem ao ar livre e na estufa solar até o teor de umidade de 20%	117
10	Tempo de secagem ao ar livre, solar e convencional nos diferentes intervalos de umidade da madeira ..	118

Quadro	Página
11	Contração média da madeira de <i>Ocotea catharinensis</i> observada para os três métodos de secagem 125
12	Anisotropia de contração média observada no final da secagem 126
13	Quantificação dos defeitos resultantes da secagem da madeira nos três processos 128
14	Custos de secagem - comparação entre os métodos ar livre, solar e convencional 137
15	Avaliação do sistema de isolamento da mini-estufa através do tempo de queda da temperatura, em horas, de 60 ^o até 30 ^o C 162
16	Variação diária da temperatura interna e externa da estufa solar vazia durante parte de setembro/outubro de 1980 (dias ensolarados) 164
17	Dados meteorológicos médios para Curitiba (1946/61) (adaptado de HOLZMANN & GUARITA ²³) 166
18	Efeito do teor de umidade da madeira na correlação entre a insolação e Δt 168
19	Comprimento médio das rachaduras em mm, nos três processos de secagem 170
20	Média dos empenos em arco em mm, nos três processos de secagem 170
21	Média dos empenos em canoa em mm, nos três processos de secagem 171
22	Média dos empenos torcido em mm, nos três processos de secagem 171
23	Investimento para a secagem ao ar livre 179

Quadro		Página
24	Investimento para a secagem em estufa solar	180
25	Investimento para a estufa convencional	181

1. INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de secagem apresentam indiscutivelmente vantagens e desvantagens. A secagem ao ar livre, apesar do baixo custo inicial, se processa num período de tempo relativamente longo e o teor de umidade final dificilmente atinge os níveis desejados. As estufas convencionais reduzem significativamente o tempo de secagem porém com custos elevados, o que em certos casos restringe o seu emprego para a produção em pequena e média escala.

Na tentativa de minimizar a problemática dos métodos tradicionais de secagem, por volta de 1958 alguns cientistas do Laboratório de Produtos Florestais de Madison, Estados Unidos, se mostraram otimistas com a possibilidade de utilizar a energia solar para secar madeira em estufa. Desde então, as pesquisas tem sido intensificadas, e nos últimos anos tiveram um impulso muito grande no sentido de desenvolver métodos intermediários que sejam ao mesmo tempo eficientes e de baixo custo. No Brasil, embora alguns estudos tenham sido realizados na Universidade Federal de Viçosa (MG) por VITAL & COLLOM⁷⁴ e VITAL⁷³, o assunto ainda não recebeu a devida atenção.

Os princípios da secagem solar de madeira são atualmente bem conhecidos. A estufa consiste basicamente de uma estrutura de madeira e uma cobertura transparente que permi-

te a passagem de raios solares e minimiza as perdas de calor por irradiação. Contudo, o sistema de armazenamento, transferência e controle do calor solar no processo ainda apresentam alguns problemas.

O emprego da energia solar para a secagem de madeira tem sido muito discutido, e os resultados encontrados indicam que o método poderia ser um meio eficiente particularmente em regiões onde, por razões climáticas, a secagem ao ar livre não é uma alternativa factível. Atualmente as pesquisas conduzidas sobre o assunto visam principalmente, o aperfeiçoamento do método que utiliza uma fonte de energia natural e ilimitada.

O presente estudo tem como objetivo principal desenvolver uma estufa solar a partir de outras já existentes, e comparar os resultados da secagem com aqueles obtidos pelos métodos tradicionais - secagem ao ar livre e convencional -, no que tange a tempo de secagem, teor de umidade final, contração da madeira, taxa de secagem, qualidade da madeira secada e custos de secagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ASPECTOS FÍSICOS DA SECAGEM DE MADEIRAS

2.1.1. TIPOS DE ÁGUA EXISTENTE NA MADEIRA

Para compreender como a água se movimenta na madeira por ocasião da sua secagem, é necessário conhecer as condições sob as quais ela ocorre nas células lenhosas. Os tipos de água existentes na madeira são frequentemente classificados da seguinte maneira (BROWN et al.⁵ ; KOLLMANN & CÔTÉ²⁸, KOLLMANN²⁷ ; CECH & PFAFF⁹):

- a) Água livre ou capilar, aquela localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares, retida por forças capilares;
- b) Água de impregnação ou higroscópica, aquela que se encontra em camadas polimoleculares nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças elétricas.

Por ocasião da secagem, a primeira água a ser perdida é aquela contida nas cavidades celulares, já que as forças que as retêm são apreciavelmente menores do que as que mantêm a água na parede celular (SKAAR⁶⁰). A retirada da água capilar ocasiona apenas uma perda de peso na madeira e normalmente ela se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (PSF) (KOLLMANN²⁷).

O PSF se refere ao estado da madeira em que os lúmens celulares estão vazios e apenas as paredes celulares possuem água. Segundo SKAAR⁶⁰, o PSF varia normalmente entre 25 e 35% de umidade em relação ao peso seco do material, ao passo que KOLLMANN²⁷ afirma que o mesmo pode ser considerado genericamente como sendo 28%. O PSF é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira se manifestam apenas abaixo deste ponto, e a sua determinação pode ser feita através de diferentes métodos (STAMM⁶³).

A água de impregnação está intimamente relacionada com o PSF, pois a saída desta provoca modificações estruturais, aproximando as células lenhosas e conferindo maior rigidez às mesmas. Por esta razão, a água de impregnação exerce um papel importante na utilização da madeira, e se manifesta normalmente entre o intervalo de 6 a 28% de teor de umidade (KOLLMANN²⁷).

Originalmente a madeira apresenta um teor de umidade superior a 30%, e quando exposta às condições atmosféricas perde umidade até entrar em equilíbrio com a atmosfera circundante. O teor de umidade que a madeira adquire quando em equilíbrio com o ambiente, conhecido como umidade de equilíbrio (Ueq), varia de acordo com a umidade relativa do ar e a temperatura do ambiente. Para uma mesma temperatura e umidade relativa, a Ueq. atinge valores diferentes ~~no~~ que tange a absorção e desorção. Este comportamento desigual da madeira é conhecido como histeresis e tem grandes implicações práticas.

2.1.2. DESORÇÃO

A desorção refere-se a evaporação da água livre (água absorvida) e da água de impregnação (água adsorvida). O mecanismo de movimento da umidade na estrutura celular durante a secagem é complexo e requer um estudo detalhado da física da água e da madeira (CECH & PFAFF⁹). Para uma melhor compreensão da secagem, pode-se considerar o fluxo de água na madeira sob dois aspectos: movimento da água acima e abaixo do PSF.

- a) MOVIMENTO DA ÁGUA ACIMA DO PSF: o movimento de umidade acima do PSF é um fenômeno totalmente diferente do movimento abaixo deste ponto, e geralmente segue as leis capilares (HART²⁰). A força capilar provoca um fluxo de água livre através das cavidades, espaços e pontuações de uma célula para outra. A medida que a água livre das cavidades celulares é progressivamente removida, outras forças de secagem começam a operar. A força capilar age no centro da madeira e diminui gradualmente conforme o teor de umidade das células internas aproxima-se do PSF (CECH & PFAFF⁹). De acordo com STAMM⁶², o movimento de água livre acima do PSF é altamente dependente da temperatura, da presença de ar no sistema e do tamanho máximo da abertura da pontuação. HART²⁰ afirma que a existência de uma bolha de ar dentro da cavidade celular, devido a pressão do ar mais pressão de vapor d'água produzidas pelo aquecimento, pressiona a água através das pontuações das células adjacentes provocando o seu movimento.

Assim, o fluxo da água ocorre simplesmente dos lúmens de pressão mais elevada para os de pressão mais baixa. SIAU⁵⁶ menciona que o movimento de água acima do PSF segue a Lei de Poiseuille, que considera o fluxo através dos capilares como uma função do raio do capilar elevado a 4^a potência. As leis capilares consideram ainda que quanto maior o raio do capilar, maior é a tração da coluna d'água no mesmo e, em consequência disso, menor é a tensão capilar, o que resulta numa redução do fluxo.

- b) MOVIMENTO DA ÁGUA ABAIXO DO PSF: o movimento de umidade abaixo do PSF é geralmente considerado um fenômeno de difusão. As moléculas de água movem-se através da parede celular por um gradiente de umidade, através da cavidade celular por um gradiente de pressão de vapor, e novamente através da parede celular mais seca por um gradiente de umidade, e assim sucessivamente até atingir a superfície da madeira (HART²⁰, CECH & PFAFF⁹). A difusão da água abaixo do PSF é considerada complexa porque tanto o gradiente de umidade como o de pressão de vapor se manifestam simultaneamente (STAMM⁶⁴). O gradiente de pressão de vapor é estabelecido quando grande parte das forças capilares cessam, ficando na maioria das cavidades celulares apenas ar e vapor d'água. O gradiente de pressão então, faz com que o vapor d'água se movimente das áreas de alta pressão (interior da tábua) para as áreas de baixa pressão de vapor (periferia da tábua), passan

do através das cavidades celulares, câmaras de pontuações, aberturas da membrana de pontuação e espaços intercelulares (CECH & PFAFF⁹ , STAMM⁶²). O gradiente de umidade entre as paredes das células mais externas e internas se desenvolve a medida que a umidade começa evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira. Como a madeira é higroscópica, as paredes celulares mais secas da superfície absorvem umidade das paredes mais úmidas, resultando um fluxo de água das células internas da madeira para as externas. Além do peso específico e permeabilidade da madeira, a temperatura também exerce considerável influência nesta difusão (HART²¹). A velocidade com que ocorre a difusão do interior para a superfície das tábuas afeta diretamente a velocidade de secagem (BROWN & BETHEL⁶).

O fluxo de água ocorre longitudinalmente e lateralmente, e apesar de ser 10 a 15 vezes mais rápido ao longo da grã, a maior parte da água é evaporada pelas faces transversais à grã porque a distância envolvida é menor. Em termos simples, a secagem ocorre da superfície para o interior, evaporando inicialmente a umidade superficial e posteriormente a interna. Deste modo, a secagem é um processo essencialmente de movimento de umidade das camadas internas para a periferia da madeira (CECH & PFAFF⁹).

2.1.3. FATORES QUE INFLUEM NA SECAGEM DA MADEIRA

2.1.3.1. FATORES INERENTES À MADEIRA

Com base nas teorias anteriormente mencionadas, pode-se relacionar alguns fatores inerentes à madeira, que influem na sua secagem.

- a) PESO ESPECÍFICO: madeiras com baixo peso específico, e por esta razão com grande volume de espaços nas cavidades celulares, secam mais rápido do que madeiras com alto peso específico e com pequeno volume de espaços. O motivo pelo qual o coeficiente de difusão é maior em madeiras de baixo peso específico, é o pequeno volume de parede celular através da qual a água move-se lentamente como um líquido, e o grande volume de lúmens por onde a água passa rapidamente na forma de vapor (BROWN et al.⁵). Por outro lado, HART²⁰ cita que o tempo de secagem normalmente é diretamente proporcional ao peso específico quando da evaporação da umidade superficial, e diretamente proporcional ao quadrado do mesmo no caso da difusão da umidade para a superfície da madeira.
- b) ESTRUTURA ANATÔMICA: o movimento de água ocorre em diferentes direções. KOLLMANN & CÔTÉ²⁸ citam que o fluxo de umidade na direção longitudinal, em madeiras com peso específico médio, sob gradientes de pressão de vapor normais, temperaturas superiores à 50°C e no limite higroscópico, é de 5 a 8 vezes maior do que na direção transversal. Abaixo do PSF este valor aumenta, podendo o fluxo longitudinal ser de 10 a 15 vezes maior (RASMUSSEN⁴²). No sentido radial, para temperaturas comuns de secagem,

a velocidade de secagem é aproximadamente 20 a 50% maior do que no sentido tangencial (KOLLMANN & CÔTE²⁸). O mesmo autor atribui este fato ao efeito dos raios lenhosos, e afirma que em folhosas com grande proporção de células radiais, a difusão neste sentido pode ser até mais do que o dobro da tangencial. Porém deve-se considerar, que dependendo do peso específico, as células de raio contribuem com apenas 2% dos espaços disponíveis para o fluxo de água na madeira, o que é praticamente insignificante.

- c) TEOR DE UMIDADE: em regra geral, quanto maior a diferença entre o teor de umidade inicial e o teor de umidade final da madeira, maior será o tempo necessário para a sua secagem. HART²⁰ afirma que o tempo total de secagem aumenta com o aumento do teor de umidade inicial tanto para madeiras altamente permeáveis, onde ocorre fluxo de massa e a remoção da umidade superficial é o fator limitante, como para madeiras altamente impermeáveis em que a difusão é o fator controlante. Verificou que na secagem de duas peças de madeira com teor de umidade inicial diferente, o tempo de secagem é diferente até o PSF, porém quando o centro das peças atingem este ponto, ambas necessitam o mesmo tempo adicional para secar.
- d) ESPESSURA DA MADEIRA: a taxa de difusão é proporcional ao gradiente de pressão de vapor, e como o gradiente é inversamente proporcional a espessura

da madeira, a taxa de difusão também o é (KOLLMANN & CÔTÉ²⁸). Evidentemente, o tempo de secagem de um material espesso é maior do que de um material fino. Uma aproximação teórica sugere que o tempo, sob condições de secagem idênticas ou semelhantes, é uma função da espessura ao quadrado, sendo que o efeito da espessura é levemente menor no caso da secagem em estufa. Deste modo, o tempo de secagem de uma peça de 50mm é de 3 a 4 vezes maior do que uma peça de 25mm (McMILLEN & WENGERT³³). HART²⁰ confirma que considerando o fluxo de massa, o tempo necessário para uma certa redução em teor de umidade é diretamente proporcional a espessura da madeira. Com relação a difusão do interior para a superfície, o tempo de secagem é diretamente proporcional ao quadrado da espessura.

2.1.3.2. FATORES INERENTES AO AMBIENTE

- a) TEMPERATURA: o calor é a fonte da qual as moléculas d'água na madeira adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar em absorver umidade (CECH & PFAFF⁹). Como a secagem se processa do interior para a superfície, se a temperatura for constante a taxa de evaporação diminuirá gradualmente a medida que diminui o teor de umidade da madeira e aumenta a pressão de vapor do ar. Por esta razão, para manter uma taxa de seca-

gem constante, as moléculas d'água precisam de energia adicional ou a pressão de vapor da estufa precisa ser reduzida. Isto é conseguido aumentando a temperatura (mais energia) ou reduzindo a umidade relativa (menor pressão de vapor) (CECH & PFAFF⁹). Normalmente, quanto maior a temperatura menor o tempo de secagem. Entretanto, deve-se observar certos limites de temperatura para que não ocorra degradação da madeira.

- b) UMIDADE RELATIVA E UMIDADE DE EQUILÍBRIO: a umidade relativa do ar refere-se a relação entre a quantidade real de vapor d'água contida no ar e a quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode conter a uma certa temperatura e pressão, expressa em percentagem. Com o aumento da temperatura sem adicionar umidade, a umidade relativa do ar diminui porque aumenta a capacidade do ar em reter umidade (HILDEBRAND²²). Entre a umidade da madeira, umidade relativa do ar e temperatura se estabelece um equilíbrio higroscópico de grande importância para a secagem da madeira, uma vez que através desta relação pode-se controlar e regular o processo de secagem (HILDEBRAND²²). Aumentando a temperatura do ar numa câmara de secagem, a umidade de equilíbrio é reduzida, obtendo-se com isso uma redução no teor de umidade da madeira. Para que a umidade relativa do ar seja mantida constante durante o processo de secagem, é preciso haver a troca de ar úmido do ambiente de secagem por ar fresco (HILDEBRAND²²).

- c) CIRCULAÇÃO DE AR: é necessário um movimento de ar suficientemente potente e homogêneo através da pilha de madeira para se conseguir uma secagem rápida e uniforme. O fluxo de ar incidente sobre a pilha de madeira tem duas funções básicas: transferir o calor produzido pelo sistema de aquecimento para a superfície da madeira e transportar a massa de vapor d'água desta superfície para a atmosfera. A circulação do ar tem alguma influência na taxa de transferência de calor, embora este efeito diminua a medida que o teor de umidade decresce abaixo do PSF. A taxa de transferência de calor é afetada principalmente pelo diferencial de temperatura (fluxo de ar e superfície da madeira), o qual é razoavelmente influenciado pela taxa de evaporação. Se a velocidade é constante, a taxa de transferência de calor de um fluxo de ar em movimento para a superfície da madeira é mais ou menos proporcional a esta diferença de temperatura (CECH & PFAFF⁹). De uma maneira geral, quanto maior a velocidade do ar menor é o tempo de secagem. Porém, quando da escolha da velocidade do ar deve-se considerar também outros fatores envolvidos no processo de secagem.
- d) POTENCIAL DE SECAGEM: o potencial de secagem se refere a relação entre a umidade atual da madeira e a umidade de equilíbrio utilizada, sendo portanto influenciado pelas condições de temperatura e umidade relativa do ar. Supondo uma migração cons -

tante de umidade na madeira, quanto maior for o potencial de secagem empregado mais rapidamente ela secará (HILDEBRAND²²). No início da secagem, a umidade de equilíbrio é mantida alta, e decresce gradualmente a medida que a madeira perde umidade. Deste modo, a relação entre ambas é conservada constante durante todo o processo de secagem.

2.2. SECAGEM SOLAR

2.2.1. GENERALIDADES

Os estudos sobre o emprego da energia solar para a secagem de madeira em ambientes fechados são relativamente recentes. TROXELL & MUELLER⁶⁹ registram que o trabalho pioneiro sobre o desenvolvimento de secadores solar começou nos Estados Unidos em 1958. Contudo, PLUMPTRE⁴¹ acha que as primeiras pesquisas sobre o assunto iniciaram simultaneamente em dois locais diferentes, com o trabalho de REHMAN & CHAWLA⁴⁵ na Índia, e os de JOHNSON²⁵ e PECK³⁸, ambos nos Estados Unidos.

Nos últimos 10 anos, o desenvolvimento de estufas solar teve um impulso muito grande, e hoje existem aproximadamente 40 modelos espalhados pelo mundo (YANG⁷⁹).

2.2.2. PRINCÍPIO DA SECAGEM SOLAR

A secagem em estufa solar é um processo intermediário entre a secagem ao ar livre, em que os fatores de secagem não são controlados, e a secagem em estufa convencional onde o aquecimento é artificial e os fatores de secagem podem ser

perfeitamente controlados (VITAL & COLLOM 74). A estufa solar emprega a mesma fonte de energia da secagem ao ar livre - energia solar - contudo, com maior eficiência.

Um secador solar deve ser constituído de uma cobertura translúcida ou transparente, de modo a permitir a passagem da energia solar incidente para o seu interior e retê-la pelo maior período de tempo possível (WENGERT⁷⁶). As superfícies internas da câmara, pintadas de preto, absorvem esta energia de ondas curtas, transforma-a em calor (energia em forma de ondas longas), o qual é transferido para o ar principalmente por convecção (WENGERT⁷⁶, SHARMA⁵³). O material transparente praticamente não oferece resistência a passagem dos raios solares, porém resiste a passagem das ondas de calor que são irradiadas do objeto que as absorveu (CHUDNOFF et al.¹⁰, PECK³⁸). Segundo BANKS², a estufa solar exige basicamente um sistema de aquecimento de ar e um método de distribuição do ar aquecido.

2.2.3. ESTUFAS SOLAR

2.2.3.1. CONSTRUÇÃO E MATERIAIS EMPREGADOS

A maioria dos secadores existentes no mundo para secagem de madeiras, aquecidos com energia solar, são baseados nas casas de ~~vegetação~~ vegetação. São constituídos de uma estrutura de madeira, coberta com um material transparente nas faces que recebem a incidência dos raios solares. O material usado como cobertura tem sido comumente plástico fino de 0,05 a 2,0 mm de espessura, como polivinil cloreto (PVC), polivinil fluoreto (PVF), poliéster resistente, polietileno, etc. (SHARMA⁵²).

Tem sido empregado também, embora menos frequentemente, materiais mais espessos e rígidos como fibra de vidro reforçada de poliéster (FRP) (Troxell & Mueller⁶⁹, Gueneau¹⁸, Simpson & Tschernitz⁵⁸) e o próprio vidro (Vital⁷³, Gough¹⁷). Para minimizar as perdas de calor do sistema e aumentar a eficiência do secador, pode-se usar no teto e nas paredes camadas dupla de plástico ou vidro, ou ainda uma combinação dos dois materiais (Sharma et al.⁵⁴, Wengert⁷⁶). Wengert⁷⁷ evidencia que uma cobertura com duas camadas de material transparente é mais eficiente, porém pode não ser necessário se o tempo de secagem não é extremamente importante.

A escolha do material geralmente é feita em função do seu custo e disponibilidade (Banks², Gough¹⁷). Contudo, deve-se considerar também a durabilidade do material em serviço. No secador de Porto Rico, após dois anos de uso, o plástico PVF do teto foi substituído por uma camada de vidro com o dobro de resistência, porque aquele material estava seriamente avariado (Chudnoff et al.¹⁰). Troxell & Mueller⁶⁹ tiveram que substituir o plástico PVF originalmente empregado após um ano de uso, por fibra de vidro reforçada de poliéster. Na Índia, Sharma et al.⁵⁴ constataram que devido as constantes chuvas de granizo na região, a vida útil do plástico de polietileno de 0,25mm foi de apenas 6 meses.

Tem sido difícil encontrar um material com características ideais para fazer o recobrimento das estufas. O plástico tem problemas de resistência, durabilidade e propriedades óticas, enquanto que o vidro é pesado, oneroso e requer uma estrutura mais complexa para suportá-lo. Todos são razoavelmente frágeis, porém o vidro é quebrado mais facilmente do

que o plástico (PLUMPTRE⁴⁰). WENGERT⁷⁷ considera a fibra de vidro um material de maior durabilidade e fácil manuseio, ao passo que o plástico tende a tornar-se quebradiço com o tempo. Em função de todos estes problemas, a colocação do plástico em algumas estufas tem sido na forma de pequenos quadros ou módulos, de modo a facilitar a montagem e, eventualmente a desmontagem por ocasião de reparos ou substituição do material (CHUDNOFF et al.¹⁰, PLUMPTRE⁴¹, VITAL & COLLOM⁷⁴).

Normalmente a parede da estufa que nunca ou raramente é atingida pelos raios solares, é maciça, construída de madeira e dotada de um sistema de isolamento para evitar perdas de energia (WENGERT⁷⁶). Nesta parede geralmente localiza-se a porta de carregamento e descarregamento, bem como eventuais portas de inspeção, o que facilita a confecção e permite um vedamento mais eficiente das mesmas. Quando os secadores estão situados no hemisfério sul, a parede sólida encontra-se ao sul e quando no hemisfério norte esta parede está voltada para o norte (BANKS²). No entanto, em algumas estufas, todas as paredes tem sido construídas de material transparente, quer em função da localização ou devido ao emprego de um sistema de reflectores externos que dirigem os raios solares para dentro do secador através das paredes laterais (PLUMPTRE³⁹, PLUMPTRE⁴¹).

O assoalho ou piso da estufa pode ser de madeira (BOIS³, WENGERT⁷⁶, GOUGH¹⁷), de concreto (SHARMA et al.⁵⁴, TROXELL & MUELLER⁶⁹, MALDONADO & PECK³², PLUMPTRE³⁹, GUENEAU¹⁸, SHARMA^{53,52}), de pedras (READ et al.⁴³, YANG⁷⁹) ou de cascalho (VITAL & COLLOM⁷⁴). WENGERT⁷⁶ constatou que 11% da energia que entra no secador é perdida pelo piso, que

em consequência disso deve ser construído com um sistema de isolamento mais eficiente. Sugere que um excelente piso poderia ser feito com uma camada de concreto ou asfalto sobre uma base de madeira. GOUGH¹⁷ aconselha construir a estufa num local bem drenado e interpor uma membrana impermeável entre o solo e o assoalho.

Outro ponto crítico a ser considerado no planejamento de uma estufa solar, tem sido a eliminação da umidade que evapora da madeira. As aberturas confeccionadas para este fim não tem se mostrado muito eficiente (WENGERT⁷⁶, PLUMPTRE⁴¹, TROXELL & MUELLER⁶⁹). LUMLEY & CHOONG³⁰ ventilaram a possibilidade de remover a água por condensação quando a estufa e os coletores se resfriam a noite. Este foi o motivo que levou YANG⁷⁹ a instalar um sistema de tubulação para condensar a umidade e removê-la da estufa.

2.2.3.2. ORIENTAÇÃO DA ESTUFA

Para receber uma insolação máxima, os coletores e superfícies transparentes do secador são orientados paralelamente ao equador, ou seja, quando no hemisfério sul, voltados na direção norte. Isto permite minimizar a soma dos ângulos de incidência dos raios solares, isto é, que os raios solares sejam recebidos com incidência mais direta (VITAL & COLLOM⁷⁴). Por esta razão, algumas estufas tem sido orientadas na direção norte-sul (CASIN et al.⁸, GUÉNEAU¹⁸, GOUGH¹⁷). As estufas construídas na Uganda estão orientadas nesta direção, de maneira que os raios solares atingem primeiro um dos lados, passam quase verticalmente sobre o teto e põe-se no outro lado (PLUMPTRE³⁹).

A maioria das estufas contudo, foram construídas de maneira que o eixo principal fosse orientado na direção leste-oeste (MALDONADO & PECK³², TROXELL & MUELLER⁶⁹, PECK³⁸). SHARMA et al.⁵⁴ justifica que optou por esta orientação devido ao aspecto sulino do sol na maioria das regiões da Índia.

É preciso considerar que o eixo principal da estufa coincide com o comprimento da pilha de madeira. Se a estufa é orientada na direção leste-oeste, a porta de carga e descarga será localizada numa destas paredes transparentes, o que dificulta a sua confecção e fechamento. Por outro lado, construindo a parede sólida paralelamente ao eixo maior da estufa, implicaria numa diminuição da área da superfície transparente.

2.2.3.3. INCLINAÇÃO DO TETO

Para possibilitar a absorção máxima de energia dentro do secador, a superfície transparente ou coletora deve ser inclinada a um plano normal aos raios solares (BANKS²). Isto é justificado pelo fato que as superfícies transparentes permitem a ultrapassagem dos raios solares mais facilmente, quando atingidas perpendicularmente. LITTLE²⁹ considera que é praticamente impossível ajustar o ângulo de hora em hora ou mesmo diariamente em função da declinação do sol e da latitude. CHUDNOFF et al.¹⁰ afirmam que a eficiência máxima do secador é obtida quando o teto é inclinado perpendicularmente à direção média do sol ao meio dia, ou simplesmente inclinado em direção ao equador a um ângulo com a horizontal igual a latitude. Por esta razão, o teto e o coletor do seca-

dor de Porto Rico foram inclinados 16° em direção norte. Para uma eficiência máxima de absorção o ano todo, o teto do seca dor solar construído na Índia foi inclinado para o sul a um ângulo de 27° com a horizontal, que corresponde a 0,9 vezes a latitude do local (SHARMA et al.⁵⁴ , SHARMA⁵³). Por outro lado, BANKS² afirma que por razões práticas, o ângulo de in clinação na África do Sul deveria ser igual a latitude do lo cal mais 10° .

SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷ construíram um coletor externo ao nível do solo, não inclinado, com uma área de 19m^2 , para aquecer uma estufa com capacidade de $2,4\text{m}^3$. Propuseram tam**ê**m a construção de um outro semelhante nas Filipinas, com uma área de 90m^2 . Com coletores horizontais, os raios solares atingem perpendicularmente a superfície transparente apenas em determinadas épocas do ano, porém a eficiência na absorção de radiação solar é compensada pela grande superfície colet ra.

OLIVEIRA³⁷ cita que se o secador for projetado para o perar o ano inteiro, a alternativa seria usar uma inclinação igual a latitude. Se for para funcionar apenas no inverno, o ângulo de inclinação do teto em relação a horizontal deveria ser acrescido em 10 a 15° , ao passo que para o verão deveria ser subtraído 10 a 15° da latitude. Isto é confirmado por WENGERT⁷⁷ . Através de estudos conduzidos por vários pesquisadores, foi evidenciado que o ângulo de inclinação da super fície transparente é mais pronunciado em regiões de altas la titudes (BOIS³ , LUMLEY & CHOONG³⁰ , YANG⁷⁹).

A direção para a qual a superfície coletora é inclin da depende da localização geográfica. Deste modo, quando o

secador solar está situado no hemisfério sul, o teto e coletores devem ser inclinados para a direção norte, e quando no hemisfério norte, devem estar voltados para o sul (BANKS²).

2.2.3.4. COLETORES DE ENERGIA SOLAR

Um dos aspectos mais importantes de um secador solar diz respeito à superfície absorvedora de energia. A maioria dos coletores de energia solar consistem de uma chapa de metal pintada de preto, que pode ser plana, ondulada ou ranhurada (LITTLE²⁹, BANKS²). As superfícies são pintadas com uma tinta preta fosca, para absorver a radiação de ondas curtas e evitar a reflexão. Quanto a coleta de energia, os secadores podem ser classificados em dois tipos: com coletores internos e com coletores externos.

O uso de coletores internos pode ser feito colocando-se uma chapa de metal enegrecida logo abaixo do teto transparente e paralela a este (MALDONADO & PECK³², CHUDNOFF et al.¹⁰, VITAL & COLLOM⁷⁴, PLUMPTRE⁴⁰). Através deste método, a energia solar é captada e utilizada diretamente dentro do ambiente de secagem. SHARMA⁵² empregou uma chapa ondulada sobre a pilha de madeira, paralela ao topo da mesma, que funciona também como falso teto. Em algumas estufas foi construído um teto e duas paredes com chapas de alumínio enegrecida, aproximadamente 15cm abaixo da superfície transparente, que funcionam como coletores (PECK³⁸, CASIN et al.⁸). Muitas câmaras de secagem foram planejadas sem qualquer tipo de chapa coletora. No entanto, todas as superfícies internas - chapa, rede sólida, assoalho, estrutura de madeira, deflectores, etc. - foram pintadas de preto (TROXELL & MUELLER⁶⁹, GOUGH¹⁷,

GUENEAU¹⁸ , SHARMA et al.⁵⁴, WENGERT⁷⁷). SHARMA⁵² pesquisando em locais de latitudes semelhantes, evidenciou indicações de que o uso de coletores sob o teto ou paredes transparentes não melhora o desempenho da estufa. Concluiu que pintando de preto as superfícies internas o efeito é o mesmo, se não melhor do que a colocação de chapas absorvedoras embaixo das superfícies transparentes.

A energia solar captada através de coletores instalados fora da estufa solar, é empregada indiretamente na secagem da madeira. O uso de coletores externos tem sido limitado principalmente pelos custos de produção. Um dos objetivos do planejamento de uma estufa solar é a economia do processo, através do emprego de materiais de baixo custo, para poder competir com os demais métodos de secagem. Por esta razão, o coletor de energia deve ser enquadrado neste princípio, para não onerar os custos de construção. Os coletores externos mais comumente empregados são do tipo aquecedores de ar, os quais são amplamente discutidos na literatura (BANKS²). Basicamente consistem de uma chapa de absorção de energia e um sistema de isolamento, colocados logo abaixo de uma superfície transparente, de maneira a proporcionar entre ambos um espaço de ar para aquecimento (SHERWOOD & GATZ⁵⁵). De acordo com MOSELEY³⁴, estes coletores podem ser confeccionados com diferentes tipos de materiais transparentes, mas afirma que o vidro temperado, quando instalado adequadamente dura indefinidamente. Alguns coletores são acoplados na própria estrutura da estufa, constituindo-se numa parte integrante da cobertura (BOIS³, YANG⁷⁹). Outros são afastados da estufa e conectados a ela através de um sistema de tubulação que per

mite, por meio de uma circulação forçada, a transferência do ar aquecido até a câmara de secagem e o seu retorno posteriormente para os coletores (READ et al. 43 , SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷). O coletor desvinculado da estrutura da estufa possibilita uma maior área de absorção de energia solar, devido a sua independência do formato da câmara de secagem (TSCHERNITZ & SIMPSON 70). LUMLEY & CHOONG³⁰ desenvolveram um coletor semelhante a uma caixa cortada diagonalmente através dos cantos opostos. Cobriram a superfície diagonal com vidro, e as quatro faces internas que funcionam como superfície de captação de energia foram pintadas de preto. Verificaram que o coletor tipo caixa permite uma maior área de absorção, maior eficiência na coleta de energia nas diferentes épocas do ano e menores perdas por reflexão devido ao seu formato.

Em função do número reduzido de pesquisas e da dificuldade em comparar a eficiência dos coletores, devido a localização geográfica e as diferenças existentes entre eles, ainda não foi definido um tipo ideal de coletor de energia solar para ser empregado nas câmaras de secagem de madeira.

2.2.3.5. ARMAZENAMENTO DE CALOR

Um sistema de armazenamento destinado a conservar parte do calor captado durante o dia para possibilitar o funcionamento da estufa à noite ou nos períodos sem sol, possivelmente seria uma alternativa viável para a secagem solar. Alguns pesquisadores chamam a atenção para este fato e citam sugestões para melhorar a eficiência da estufa neste aspecto (REHMAN & CHAWLA⁴⁵ , CASIN et al. 8 , BANKS 2 , SHARMA 53).

REHMAN & CHAWLA⁴⁵ reconhecem que o principal problema é encontrar um meio adequado de armazenamento de calor para utilizar à noite ou quando não há sol. Recomendam a instalação de um tanque de água aquecida com energia solar. Esta também é a sugestão de SHARMA⁵³. BANKS² aconselha a utilização de um depósito subterrâneo de pedras, para armazenar a energia fornecida por um aquecedor solar.

A primeira pesquisa realizada sobre o assunto, foi conduzida em Griffith, Austrália, por READ et al.⁴³. Foram colocados 15m³ de basalto britado embaixo da câmara de secagem, isolados com poliestireno, para armazenar 2/3 da quantidade máxima de calor que entra diariamente na estufa. O volume de pedras foi calculado com base na área do coletor solar. Foi estimado que o sistema de armazenamento recupera aproximadamente 16 horas de calor por dia. Contudo, o custo de instalação deste sistema é considerado elevado para estufas de pequena capacidade.

Informações mais recentes dão conta que na Universidade de Lakehead, no Canadá, existe um plano para produzir calor a partir de resíduos de madeira, para auxiliar o coletor solar nos períodos de condições climáticas desfavoráveis e à noite (HUGHES²⁴).

É importante considerar que embora a estufa solar não possua um sistema de armazenamento, o teor de umidade final e o tempo de secagem neste processo são menores do que ao ar livre. Por outro lado, a secagem solar não tem a pretensão de competir com a secagem em estufa convencional. Por esta razão, o custo de implantação de um sistema de abastecimento

de energia deve ser compatível com o custo da estufa, e avaliado em função da probabilidade de ocorrência de períodos desfavoráveis, prolongados e contínuos, no local de instalação.

2.2.3.6. CIRCULAÇÃO DO AR INTERNO

A circulação do ar é um dos fatores mais importantes dentro de uma estufa solar. O ar movimentado pelos ventiladores incide sobre as superfícies de absorção solar e aquece-se, sendo posteriormente dirigido através da pilha de madeira, propiciando a evaporação (SHARMA⁵³). A secagem da madeira, seja qual for o método empregado, exige o movimento constante de ar sobre a superfície das peças para manter uma taxa de evaporação contínua.

Nos primeiros estudos sobre secagem solar, foi testada a circulação natural de ar, porém os resultados não foram satisfatórios (REHMAN & CHAWLA⁴⁵). Na mesma época, JOHNSON²⁵ construiu um pequeno secador em Madison, equipado com um ventilador centrífugo acionado por um moinho de vento. Os experimentos não foram bem sucedidos, principalmente porque a secagem de madeira exige uma circulação de ar uniforme e contínua. Em todos os estudos posteriores, o ar foi circulado de maneira forçada através do uso de ventiladores induzidos eletricamente. A localização dos ventiladores depende do tipo de fluxo de ar desejado. Desta maneira, podem ser colocados na parte superior da estufa, sobre a pilha de madeira, para produzir um fluxo vertical (READ et al.⁴³, BOIS³, CHUDNOFF et al.¹⁰, TSCHERNITZ & SIMPSON⁷⁰, PLUMETRE^{39,41}, YANG⁷⁹). Podem ser instalados também inferiormente, ao nível do piso ou mais elevado, para ge-

rar um fluxo de ar horizontal (SHARMA et al.⁵⁴, PLUMPTRE⁴⁰, GOUGH¹⁷). Muitas estufas foram equipadas com motores elétricos reversíveis, para inverter periodicamente o fluxo de ar (Troxell & Mueller⁶⁹, SHARMA et al.⁵⁴, PLUMPTRE^{39,41}, GOUGH¹⁷). Segundo SHARMA et al.⁵⁴, este procedimento diminui a diferença de secagem da pilha de madeira, entre os lados de entrada e saída de ar.

O número de ventiladores utilizados na câmara de secagem tem sido muito variável, pois depende do tamanho da mesma e do volume de ar a ser movimentado. CASIN et al.⁸ empregaram apenas um ventilador de 60cm de diâmetro, enquanto que CHUDNOFF et al.¹⁰ usaram 9 de 40cm de diâmetro.

A velocidade e a uniformidade do fluxo de ar através da pilha de madeira exercem um papel importante no controle da taxa de secagem (PLUMPTRE⁴¹). Porém, tem sido registrado valores baixos e variáveis. CHUDNOFF et al.¹⁰ constataram que a velocidade do ar oscilou entre 0,3 e 0,5 m/s, ao passo que TROXELL & MUELLER⁶⁹ encontraram valores entre 0,5 e 1,8 m/s. GOUGH¹⁷ confeccionou ao redor da pilha de madeira, paredes de blocos de concreto vazados para uniformizar o fluxo de ar ao longo da estufa. A distribuição foi uniforme em toda a pilha, com uma velocidade de 1,0 m/s.

Em todos os casos os ventiladores funcionam apenas durante as horas do dia (LITTLE²⁹). BANKS² sugere que os ventiladores deveriam desligar-se automaticamente quando a umidade relativa dentro da estufa atinge um limite máximo ou mínimo, e também quando não há radiação solar. PECK³⁸ colocou uma célula sensível à luz no circuito elétrico do motor, para que o ventilador operasse apenas durante as horas de luz do

dia. BOIS³ acoplou no motor dos ventiladores termostatos de controle, de maneira que os mesmos funcionassem apenas quando a temperatura interna excedesse à 26°C. O mesmo sistema foi adotado nos Estados Unidos por OLIVEIRA³⁷, com a diferença que a temperatura limite foi 16°C. Apesar destas sofisticações evidenciadas, a maioria dos ventiladores são operados manualmente. Nos estudos conduzidos nas Filipinas, o ventilador foi ligado às 7:30h e desligado às 17:30h (CASIN et al.⁸). SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷ acionaram os ventiladores no período das 8 às 18h, porque após às 18h muito pouca energia solar foi coletada.

A despeito do controle dos ventiladores, seria interessante o uso de termostatos ou um outro mecanismo de controle, pois isto possibilita um melhor aproveitamento da energia disponível na câmara de secagem principalmente naquelas dotadas de um bom sistema de isolamento.

2.2.3.7. CONTROLE E REGISTRO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Para permitir a renovação do ar interno, que no decorrer da secagem adquire umidade, os secadores normalmente são dotados de pequenas aberturas as quais possibilitam o controle da umidade relativa. O número e dimensões dessas aberturas bem como suas localizações são muito variáveis, e até o momento ainda não há um critério definido para a sua confecção. PLUMPTRE³⁹ instalou duas aberturas, uma em cada lado da estufa, para permitir a entrada e saída do ar segundo a rotação dos ventiladores. CASIN et al.⁸ confeccionaram três aberturas de 10 x 10cm, localizadas nos lados da estufa pouco

acima do piso. SHARMA et al.⁵⁴ utilizaram quatro aberturas de 25 x 25cm e constataram que mesmo com elas totalmente abertas foi difícil manter a umidade relativa baixa no início da secagem.

Alguns pesquisadores tentaram dar às aberturas um certo grau de sofisticação, objetivando melhorias no seu funcionamento. PECK³⁸ instalou registros nas quatro aberturas, operadas por motores elétricos, de modo que a corrente liga e desliga através de um microinterruptor conectado a um elemento de madeira. Constatou que o sistema não foi muito preciso devido às grandes variações de temperatura dentro do secador. TROXELL & MUELLER⁶⁹ usaram quatro aberturas operadas por pequenos motores controlados por microinterruptores. Os resultados mostraram a importância do controle e os autores reconhecem que pouco se sabe ainda sobre como melhor utilizar as aberturas do secador. Na grande maioria dos secadores, as aberturas são reguladas manualmente, e os critérios usados para graduá-las diferem muito. Segundo BOIS³, no início da secagem, quando a madeira ainda está verde, as aberturas devem ser deixadas abertas, e a medida que a madeira seca podem ser gradualmente fechadas. CHUDNOFF et al.¹⁰ salientam porém, que no início da secagem, quando eventualmente a temperatura alcança valores altos, as aberturas devem ser mantidas fechadas para evitar o aparecimento de defeitos na madeira. GOUGH¹⁷ menciona que nos primeiros estágios da secagem, a elevada capacidade evaporativa da madeira reduz a temperatura do ar, sendo necessário abrir as aberturas para expelir o ar úmido da estufa. Salienta contudo, que como a saída da água de impregnação é lenta, abaixo do PSF as aberturas podem per

manecer fechadas. A renovação de ar na estufa é mais importante para o controle da umidade relativa, porém pode ser usada também para diminuir a temperatura quando a mesma atinge valores críticos nos últimos estágios de secagem.

O controle da umidade relativa e da temperatura pode ser feito também através de um mecanismo de umidificação. CHUDNOFF et al.¹⁰ instalaram dentro da estufa um conjunto de bicos vaporizadores para controlar a umidade relativa nos primeiros estágios de secagem e proporcionar tratamentos de acondicionamento para madeiras com esforços internos. Um aquecedor solar de água fornece o líquido quente para os vaporizadores. A maioria das estufas no entanto, não possuem este mecanismo. Neste caso, a umidificação nos períodos críticos de secagem pode ser feita manualmente (VITAL & COLLOM⁷⁴).

O registro da temperatura e umidade relativa normalmente é feito com termômetros registradores de bulbo seco e bulbo úmido. PECK³⁸ usou um registrador de três elementos, sendo que um dos elementos de bulbo seco foi colocado dentro do secador, ao lado do bulbo úmido, e o outro fora do secador para registrar a temperatura externa. Para efeito de comparação, foram empregados também indicadores potenciométricos. PLUMPTRE³⁹ utilizou-se de um termômetro registrador de bulbo seco e bulbo úmido, sendo ambos resguardados dos raios solares diretos e refletidos através de uma proteção pintada de branco. Foi mantido o fluxo de ar livre através dos bulbos. O mesmo procedimento foi adotado por SHARMA et al.⁵⁴. TROXELL & MUELLER⁶⁹ empregaram um aparelho de três elementos, com gráfico circular, para registrar as temperaturas do bulbo seco dentro e fora da câmara de secagem, e a temperatura

do bulbo úmido interna. Os elementos sensíveis dentro do secador foram sombreados para evitar a incidência direta da luz solar sobre os mesmos. Uma maneira prática de obter os valores de temperatura e umidade relativa do ar é a utilização de registradores com gráficos semanais, o que facilita o controle e dispensa as observações periódicas nos termômetros.

2.2.3.8. SISTEMA DE ISOLAMENTO

Todas as faces de uma estufa solar, onde se inclui suas superfícies transparentes, parede sólida e assoalho, precisam ser bem isoladas pois uma consideração importante no desenho do secador é a minimização das perdas de calor (GOUGH¹⁷). YANG⁷⁹ constatou uma influência marcante do isolamento na elevação da temperatura interna. O isolamento das superfícies sólidas não será tratado neste item, pois já foi mencionado anteriormente (item 2.2.3.1.).

Os estudos conduzidos por WENGERT⁷⁶ com o objetivo de detectar as fontes de perdas, evidenciaram que o motivo da grande proporção de calor perdido foi o isolamento deficiente da cobertura, paredes e assoalho. Os mesmos estudos apontaram a propagação de calor através das paredes, em torno de 29%, como a principal fonte de perdas. Foi sugerido então o emprego de camadas duplas de materiais transparentes, de modo a proporcionar um intervalo de ar entre as mesmas. Porém, para que o isolamento seja eficiente, o ar retido entre as camadas deve permanecer estático, de maneira a reduzir a diferença de temperatura entre as paredes e o exterior.

PLUMPTRE⁴¹ afirma que o emprego de plástico flexível em camada dupla como cobertura, é razoavelmente menos eficiente do

que um material rígido, o qual mantém um espaço de ar constante e reduz seu movimento causado pelo fluxo de ar dos ventiladores. TROXELL & MUELLER⁶⁹, com o uso de um pireliômetro, estimaram a partir da radiação solar que entra no secador e do teor de umidade da madeira, que entre 25 a 45% da energia solar que atinge o interior do secador é empregada na secagem da madeira, sendo o restante perdido.

A grande maioria das estufas foram construídas com no máximo duas camadas de material transparente, e não há referência na literatura sobre o emprego de um número maior. Quanto a distância entre as duas camadas, também parece haver dúvidas sobre qual proporciona um isolamento mais eficiente. CHUDNOFF et al.¹⁰ utilizaram uma camada dupla de plástico transparente, separados por um espaço de ar de aproximadamente 4,0cm. PLUMPTRE³⁹ fez uso de uma camada dupla de plástico afastados 4,4cm um do outro. PECK³⁸ construiu o secador inicialmente com apenas uma camada de plástico e posteriormente adicionou mais uma camada distante várias polegadas da primeira. GOUGH¹⁷ empregou externamente um vidro de 3,0mm e internamente plástico de 0,15mm, com um afastamento de 7,5cm entre eles. VITAL⁷³ deixou uma camada de 1,0cm de ar estagnado entre os plásticos. Contudo, NOACK³⁵ menciona que para obter uma eficiência máxima quando se usa uma camada de ar como isolante, o afastamento entre as duas superfícies que o retêm deve ser de 2,0cm.

2.2.3.9. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO

Os custos de construção de uma estufa solar se referem aos custos de materiais e mão-de-obra. Uma relação dos

materiais necessários para a construção de secadores de diferentes capacidades, pode ser encontrada nos trabalhos de BOIS³ e LUMLEY & CHOONG³⁰.

É essencial que o investimento inicial da secagem solar seja o mais baixo possível para poder competir com a secagem ao ar livre. Segundo PLUMPTRE⁴¹, as estufas devem ser desenhadas de maneira a facilitar sua construção, a partir de materiais de fácil obtenção. A grande maioria das estufas instaladas em regiões tropicais tem sido construídas com base neste princípio. O custo de instalação de um secador solar é naturalmente mais elevado do que o da secagem ao ar livre. Porém, considerando o menor tempo de secagem, menor teor de umidade final e menor percentual de degradação da madeira, a secagem solar torna-se mais econômica em regiões climáticas pouco favoráveis a secagem ao ar livre.

Em relação a secagem em estufas convencionais aquecidas artificialmente, o custo de uma estufa solar é geralmente mais baixo, porém deve-se considerar que o tempo de secagem é maior. Pelas estimativas de READ et al.⁴³, o custo da estufa solar construída na Austrália foi aproximadamente 3 vezes superior ao de uma estufa convencional devido ao tipo de material usado e a complexidade do desenho. Com referência a estufa desenhada por TSCHERNITZ & SIMPSON⁷⁰ para as Filipinas, os custos de construção do protótipo com capacidade para 9,4 m³ foram estimados em Cr\$ 272.000,00*. O alto cus-

* Os valores aqui mencionados referem-se ao mês de julho de 1980, quando: 1 UPC (Unidade Padrão de Capital)=Cr\$ 604,00.

to foi atribuído às importações de materiais, correspondentes a 63% do custo total. Na estufa desenhada por LUMLEY & CHOONG³⁰, com capacidade para 59m³, o custo de construção foi aproximadamente a metade daquele de uma estufa convencional aquecida a vapor de igual capacidade. Porém, considerando que o tempo de secagem é aproximadamente 2 vezes maior, o investimento de capital é mais ou menos igual. Os custos totais da estufa construída por GOUGH¹⁷ foram aproximadamente Cr\$ 360.000,00, sendo Cr\$ 250.000,00 para materiais e Cr\$ 110.000,00 para mão-de-obra. SHARMA⁵³ calculou que o custo de construção de uma estufa solar de 3,5m³, é aproximadamente 1/3 do custo de uma estufa a vapor de igual capacidade. Salienta que o baixo investimento inicial faz da secagem solar um processo atrativo para as pequenas indústrias madeireiras.

2.2.3.10. RELAÇÃO ENTRE ÁREA DO TETO E VOLUME DA ESTUFA SOLAR

Alguns estudos mencionam que o volume de ar a ser aquecido dentro da estufa solar, é provavelmente influenciado pela área da superfície transparente da mesma (CHUDNOFF et al.¹⁰, VITAL & COLLOM⁷⁴, PLUMPTRE⁴⁰). Contudo, ainda não existem informações suficientes que permitam estabelecer uma relação adequada entre a área do teto e o volume da estufa solar.

2.2.4. RESULTADOS OBTIDOS

2.2.4.1. TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE FINAL

O tempo necessário para secar uma carga de madeira numa estufa solar, além dos fatores de secagem, é afetado também pela localização geográfica e condições climáticas. Entretanto, todos os estudos conduzidos evidenciaram que este tempo é sempre menor do que na secagem ao ar livre. PECK³⁸ verificou que a secagem solar ocorreu em aproximadamente 60% do tempo requerido pela secagem ao ar livre. BOIS³ constatou que foram necessários 52 dias para secar madeira de *Prunus* de 60% até 6% de teor de umidade médio. Estes mesmos resultados já haviam sido constatados por JOHNSON²⁵. REHMAN & CHAWLA⁴⁵ encontraram que no secador solar a madeira alcançou um teor de umidade final de 13,6% em 16 dias contra 23% da secagem ao ar livre no mesmo período. Calcularam que em relação a secagem ao ar livre, o tempo de secagem solar foi reduzido em 54%. GUENEAU¹⁸, secando *Pinus kesiya* e *Dalbergia baroni* na estufa solar, constatou uma redução no tempo de secagem de 34 a 68% para a primeira e 48% para a segunda espécie, em relação a secagem ao ar livre. SINGH⁵⁹ também constatou uma considerável diferença no tempo de secagem entre os dois métodos.

Segundo PLUMPTRE³⁹ e SCHNEIDER et al.⁵¹, nos primeiros estágios de secagem a estufa solar não apresenta superioridade substancial em relação a secagem ao ar livre, porém abaixo de 30% de umidade a diferença na velocidade de secagem é bem evidente. TROXELL & MUELLER⁶⁹ verificaram que no verão praticamente não houve diferença entre os tempos de secagem solar e ao ar livre até o teor de umidade de 20%. Porém, a secagem até 12% no secador ocorreu em aproximadamente 65% do tempo dispendido ao ar livre. Nos meses de inverno, TROXELL &

MUELLER⁶⁹ encontraram que a secagem até o teor de umidade de 19% ocorreu em aproximadamente 40% do tempo de secagem ao ar livre. Constataram também que o tempo de secagem varia muito entre as estações do ano. JOHNSON²⁵ acredita que a secagem a partir do estado verde no verão de Madison (USA), necessita em torno de 80 dias, ou aproximadamente 400 horas de insolação, o que possibilitaria a secagem de duas cargas de madeira verde por ano. MALDONADO & PECK³², durante um período de condições climáticas desfavoráveis, secaram madeira de 30mm de espessura de *Swietenia macrophylla*, de 50 a 12% de teor de umidade em 23 dias e até 8,5% em 29 dias. Testemunhas ao ar livre atingiram 27% em 23 dias. Num período de condições menos úmidas, a mesma espécie de 25mm secou de 32 a 12% de umidade em 13 dias.

CHUDNOFF et al.¹⁰ verificaram que o tempo de secagem solar parece variar quase que diretamente com a espessura do material. A partir de um teor de umidade inicial de 50%, tábuas de 25mm podem ser secadas no secador a um teor de umidade final de 12% em 18 dias; de 30mm em 25 dias; e de 50mm em aproximadamente 41 dias. Concluíram que fazendo-se uma pré-secagem ao ar livre até 30% de umidade, o tempo de secagem solar poderia ser reduzido para 13, 19 e 29 dias respectivamente. Nas primeiras pesquisas realizadas nas Filipinas, verificou-se que na estufa solar a secagem de tábuas de 25mm e 50mm de espessura ocorreu em aproximadamente 1/3 e 1/2 do tempo requerido pela secagem ao ar livre (CASIN⁷). Em estudos posteriores, CASIN et al.⁸ não apenas confirmaram estes resultados, como também concluíram que a secagem na estufa solar alcançou teores de umidade mais baixo do que foi possível pela secagem ao ar livre.

Estudos realizados na Índia, em regiões de baixas latitudes (17° e 20° N), os resultados indicaram que madeiras de 25mm podem ser secadas no secador desde o estado verde até 12% de umidade, entre 7 a 16 dias no verão e em torno de 20 dias no inverno (SHARMA⁵²).

Algumas pesquisas compararam os resultados da secagem solar com a secagem em estufa convencional. SHARMA et al.⁵⁴ encontraram que o tempo de secagem de madeiras de 25mm desde verde até o teor de umidade de 12% foi duas vezes maior do que na estufa convencional eletricamente aquecida. PLUMPTRE³⁹ verificou que este tempo foi 2,5 a 3 vezes maior. No secador australiano dotado de armazenamento térmico, o tempo de secagem de *Eucalyptus* de 100 a 16% de umidade foi aproximadamente duas vezes maior do que na estufa convencional aquecida a vapor (READ et al.⁴³). TSCHERNITZ & SIMPSON⁷⁰ constataram que o tempo de secagem solar foi $2 \frac{1}{4}$ vezes maior do que a secagem em estufa convencional.

Todas as pesquisas realizadas evidenciaram que a secagem solar não é tão rápida quanto a secagem em estufa convencional, porém oferece consideráveis economias em relação ao tempo de secagem ao ar livre. Os períodos de secagem são razoavelmente curtos, o que torna-a atrativa para operações em pequena escala.

2.2.4.2. TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA E UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Durante o período diurno, a temperatura da estufa solar, por mais simples que seja a sua construção, é sempre superior à temperatura do ar externo. Mesmo durante a noite, al

guns pesquisadores evidenciaram que a temperatura no secador conserva-se mais elevada. SHARMA et al.⁵⁴ observaram que a temperatura manteve-se aproximadamente 3°C acima da ambiente com os ventiladores ligados, e em torno de 10°C mais alta com os ventiladores desligados e aberturas fechadas. TROXELL & MUELLER⁶⁹ verificaram que a temperatura a noite prevalece mais ou menos 5,5°C mais alta no secador.

A temperatura dentro do secador é influenciada pelo teor de umidade da madeira (TROXELL & MUELLER⁶⁹, SHARMA et al.⁵⁴, BOIS³, GOUGH¹⁷). No início da secagem, quando a madeira possui elevado teor de umidade e por esta razão alta capacidade de evaporação, a diferença entre a temperatura interna e externa não é muito pronunciada devido ao efeito de resfriamento exercido pela umidade. Porém, a medida que a madeira seca esta diferença torna-se progressivamente maior porque a saída da água de impregnação é lenta, e em consequência disso, é necessário menos energia para elevar a temperatura do secador ao mesmo grau (TROXELL⁶⁸). GOUGH¹⁷ verificou que em dias ótimos de secagem, a diferença máxima entre a temperatura interna e externa variou entre 18 e 24°C, e a temperatura interna máxima atingiu 59°C quando a externa foi 35°C. TROXELL & MUELLER⁶⁹ efetuando testes com o secador vazio, constataram diferenças entre as temperaturas interna e externa de 27 a 33°C, e com madeira no secador estas diferenças caíram para 11 a 16°C. BOIS³ encontrou no verão uma diferença entre 5,5 e 8,3°C no início da secagem, e abaixo de 20% de umidade da madeira as temperaturas no secador alcançaram 11 a 16°C acima da ambiente. SHARMA et al.⁵⁴ constataram que as diferenças máximas de temperatura variaram entre 15°C

nos primeiros estágios e 28°C no final da secagem. CHUDNOFF et al.¹⁰ verificaram que a temperatura máxima média dentro do secador foi 45°C, enquanto que a temperatura máxima média ambiente foi 30°C. Com os vaporizadores ligados, a temperatura máxima média atingida foi 39°C. Num dos primeiros secadores solar construídos, JOHNSON²⁵ observou uma diferença de temperatura de 28°C. PLUMPTRE³⁹ encontrou uma diferença máxima de 35°C. REHMAN & CHAWLA⁴⁵ encontraram em média, 13 a 18°C; PECK³⁸ 4,7 a 12°C; MALDONADO & PECK³² em média 15,6°C; TAO & HSIAO⁶⁶ 9,0°C; CASIN et al.⁸ entre 7,2 a 11,6°C; SCHNEIDER et al.⁵¹, na Europa Central, encontraram em média 7,1 a 9°C. Através de testes realizados com a estufa vazia, YANG⁷⁹ verificou que a temperatura interna média às 16 horas foi 49°C e a ambiente 20°C. A máxima alcançada foi 61,1°C, que em regiões de altas latitudes ocorre às 16 horas e não ao meio dia como registrou PLUMPTRE³⁹ em latitudes menores (0° 20'N). A temperatura no secador também é influenciada, embora em pequena proporção, pelo tipo de material de cobertura (BANKS²). TROXELL & MUELLER⁶⁹, após a substituição do plástico PVF por fibra de vidro, constataram uma diminuição de 1,7°C na temperatura da estufa devido às diferenças em transmissividade dos materiais.

A umidade relativa do ar depende da temperatura interna e da diferença entre esta e a externa. PECK³⁸ observou que a medida que aumenta a diferença de temperatura, diminui a umidade relativa interna. Verificou que a umidade relativa dentro do secador foi geralmente menor do que a externa e apresentou uma tendência decrescente, como era esperado, a medida que a secagem progrediu. Deste modo, a medida que diminui

o teor de umidade da madeira decresce também a umidade relativa (Troxell⁶⁸). A umidade relativa também é afetada pelo grau de controle das aberturas e pelo sistema de umidificação da estufa. As aberturas estando fechadas permitem um aumento na umidade relativa e vice-versa. O controle da temperatura geralmente é difícil no secador solar, porém um nível de controle relativamente bom da umidade relativa é possível no processo de secagem, como evidenciado por Simpson & Tschernitz⁵⁷. Evidentemente que este controle não é possível na secagem ao ar livre, o que é mais um aspecto positivo da secagem solar, especialmente em regiões muito úmidas.

A umidade de equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa, e conseqüentemente varia também com a umidade da madeira. A medida que a madeira seca, a umidade de equilíbrio no secador diminui. Simpson & Tschernitz⁵⁷ verificaram que à temperatura ambiente a umidade de equilíbrio varia entre 13 e 18%. Contudo, um aumento de 6°C na temperatura de secagem reduz a variação em umidade de equilíbrio para 9 a 11%, e um aumento de 11°C diminui para 7 a 8%. De acordo com Chudnoff et al.¹⁰, a umidade de equilíbrio em Porto Rico varia entre 13 a 15% durante todo o ano e dentro do secador foi observado uma variação entre 8 a 10%. Porém, com o sistema de vaporização ligado, este vapor elevou-se a 16%. Parece evidente que aumentos relativamente pequenos na temperatura de secagem são suficientes tanto para atingir umidades equilíbrio adequadas, como para reduzir grandemente o tempo envolvido no processo de secagem.

2.2.4.3. QUALIDADE DA MADEIRA SECADA

A grande maioria das pesquisas realizadas mostraram que a qualidade da madeira secada na estufa solar foi superior à secagem ao ar livre, e em muitos casos igual ou melhor do que a secagem em estufa convencional. Nos estudos conduzidos por PLUMPTRE³⁹, a madeira seca na estufa solar sofreu em geral menos degradação que ao ar livre e foi pelo menos tão boa quanto a secagem em estufa convencional, mostrando menos tendência a endurecimento superficial, colapso e outros defeitos. TROXELL & MUELLER⁶⁹ constataram 12,6% de defeitos no secador contra 15,4% da secagem ao ar livre, porém no secador os defeitos não foram suficientemente severos para diminuir a qualidade da madeira. PECK³⁸ encontrou no secador 11% menos rachaduras superficiais do que na secagem ao ar livre. SHARMA et al.⁵⁴ verificaram que a qualidade da madeira foi semelhante ou melhor do que na estufa convencional, e que os defeitos de secagem podem ser melhor controlados do que na secagem ao ar livre. Segundo TAO & HSIAO⁶⁶, a qualidade da madeira foi aceitável e não foram observados problemas sérios de endurecimento superficial mesmo em espécies suscetíveis ao defeito. De acordo com GOUGH¹⁷, a qualidade da madeira foi boa, com gradientes de umidade em níveis mínimos e esforços de secagem virtualmente inexistentes. YANG⁷⁹ verificou que o número de defeitos na madeira secada na estufa solar, principalmente no inverno, foi menor do que ao ar livre. Atribui a elevada percentagem de defeitos na secagem ao ar livre às grandes oscilações de temperatura e umidade relativa. Constatou que no secador o número de peças com rachaduras de topo foi maior no verão do que no inverno, devido possivelmente às tem

peraturas mais elevadas e períodos de secagem mais curtos.

Para PLUMPTRE⁴⁰, a qualidade da madeira secada na estufa solar é superior aos outros métodos de secagem devido às seguintes razões:

- a) De um modo geral, a taxa de secagem é lenta comparada com as estufas convencionais.
- b) As variações diárias de temperatura são maiores do que na secagem ao ar livre, porém as variações em umidade relativa são muito menores.
- c) Durante a noite, a umidade relativa na estufa solar varia entre 90 e 100% até que o teor de umidade da madeira atinja 18 a 20%, e a madeira sofre um tratamento de acondicionamento suave todas as noites. Como a temperatura é baixa, umidade relativa alta e não há circulação de ar durante a noite, o teor de umidade interno e superficial das peças tende a se igualar, evitando assim o surgimento de esforços. Este fenômeno é muito mais pronunciado num ambiente fechado, como o secador, do que ao ar livre.

Outra maneira de reduzir os defeitos da madeira durante a secagem solar é a instalação de um sistema de umidificação. SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷ evidenciaram que os esforços de secagem são mais críticos nos estágios iniciais de secagem, e uma alta umidade relativa mantém a periferia das peças a um alto teor de umidade. Isto reduz o gradiente de umidade e conseqüentemente o surgimento de esforços, que poderiam causar rachaduras.

Normalmente, para aliviar os esforços da madeira, é

executado um tratamento de acondicionamento no final da secagem durante 18 a 24 horas, a 80°C e 85% de temperatura e umidade relativa respectivamente (WRIGHT⁷⁸). Como o secadornão atinge temperaturas tão elevadas durante tanto tempo, uma das alternativas é aumentar o tempo do tratamento. Segundo CHUDNOFF et al.¹⁰, um tratamento de vaporização durante 48 horas foi suficiente para remover o endurecimento superficial das tábuas. Nos estudos conduzidos por REHMAN & CHAWLA⁴⁵ e CASIN et al.⁸, a baixa qualidade de algumas madeiras secadas foi atribuída principalmente à falta de mecanismos de umidificação.

2.2.4.4. POSSIBILIDADES DE EMPREGO DA SECAGEM SOLAR

As vantagens do emprego da energia solar para a secagem de madeiras parecem bem evidentes. A maioria dos estudos confirmam que, em relação a secagem ao ar livre, a secagem solar proporciona tempos de secagem mais curtos, menor degradação especialmente em madeiras de difícil secagem, e menor teor de umidade final (WENGERT⁷⁶). A grande vantagem no entanto, parece ser a possibilidade de obter teores de umidade entre 6 a 12%, valores estes bem inferiores a umidade de equilíbrio externa e dificilmente alcançados com a secagem ao ar livre (CHUDNOFF et al.¹⁰, PLUMPTRE⁴⁰, YANG⁷⁹, SHARMA⁵², CASIN et al.⁸). Em relação a secagem convencional, além da boa qualidade da madeira, a secagem solar apresenta baixo custo inicial, baixo custo de operação, baixo custo de supervisão e não necessita mão-de-obra especializada. Entretanto, possui a desvantagem de ser lenta e depender das condições atmosféricas (PLUMPTRE⁴⁰). SHARMA et al.⁵⁴ acreditam que a

vantagem mais significativa da estufa solar sobre a convencional, é que a mesma não necessita de operadores experimentados ou em tempo integral, os quais por outro lado são indispensáveis quando a madeira é secada sob programas cuidadosamente controlados, o que aumenta apreciavelmente os custos de secagem.

O emprego da energia solar tem sido muito discutido nas diferentes partes do mundo. Os resultados de secagem encontrados indicam que seria um meio eficiente e de baixo custo, particularmente em regiões que recebem alta intensidade de radiação solar durante o ano todo (MALDONADO & PECK³², PECK³⁸, REHMAN & CHAWLA⁴⁵, JOHNSON²⁶, TROXELL & MUELLER⁶⁹ CHUDNOFF et al.¹⁰). WENGERT⁷⁵ comenta que a secagem ao ar livre pode ser um método economicamente viável em certas épocas do ano, desde que adequadamente conduzido, porém TROXELL⁶⁸ salienta que em regiões mais úmidas este método torna-se anti-econômico. O secador solar poderia ser a solução para muitos problemas de secagem da madeira, onde os custos da estufa e de energia fazem da secagem convencional um método proibitivo. Os resultados obtidos por PECK³⁸, numa região que recebe apenas uma quantidade moderada de radiação solar, indicam que existem locais onde a secagem da madeira por energia solar seria economicamente viável em relação a secagem ao ar livre. CUPPETT¹² observa que, embora os princípios da coleta de energia solar sejam bem conhecidos, o sistema de armazenamento, transferência e controle do calor solar no processo de secagem da madeira ainda apresentam muitos problemas. Por esta razão, o emprego da energia solar para a secagem de madeira é, na maioria das vezes, experimental e envol

ve modelos pequenos de secadores.

SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷ evidenciam que a secagem solar é vantajosa particularmente em países tropicais de baixa latitude, onde a umidade relativa ambiente é tão elevada que a madeira não pode ser secada ao ar livre a um teor de umidade igual a umidade de equilíbrio ambiental.

A maioria das estufas existentes foram construídas para fins de pesquisas. Muitas tem trabalhado satisfatoriamente em escala de pesquisa, porém poucas foram as tentativas para o emprego em escala comercial. Segundo PLUMPTRE⁴⁰, as razões disso são muitas, porém algumas delas são as seguintes:

- a) A maioria das estufas foram construídas em países onde a exigência por madeira adequadamente seca é pequena e o abastecimento tende a ser satisfeito pelos maiores fornecedores, que frequentemente operam com estufas convencionais de produção relativamente grande.
- b) Em países desenvolvidos, o clima frequentemente é inadequado durante a metade do ano e a maioria das grandes empresas necessitam de produção alta e contínua.
- c) As estufas solar não são pré-fabricadas com instruções de como construí-las, como as estufas convencionais e casas de vegetação.
- d) Existe o receio de que, devido as escassas possibilidades de controle do secador em relação a estufa convencional, a qualidade do produto seja inferior.
- e) Tem sido difícil obter materiais duráveis, adequados para a cobertura da estufa solar.

O baixo custo da secagem solar tem sido destacada por vários pesquisadores (SATTAR⁴⁹, SHARMA et al.⁵⁴, PLUMPTRE⁴¹) PECK³⁸ foi um dos poucos a constatar igualdade nos custos de secagem solar e ao ar livre. BANKS² cita que os custos de eletricidade para o ventilador foi aproximadamente 1/3 dos custos totais da secagem solar. SHARMA et al.⁵⁴ lembram, que além do consumo de energia elétrica pelo ventilador, deve ser considerado também o custo de depreciação do secador, uma vez que a substituição do plástico poderá ser necessária a cada 1,5 ou 2 anos. Os custos de operação são limitados ao ajustamento das aberturas e ao controle do teor de umidade da madeira. Portanto, a estufa solar não necessita da atenção constante de operadores, os quais são indispensáveis para a estufa convencional. Todos estes fatores contribuem decisivamente para economia considerável no custo da secagem solar (SHARMA⁵³).

Diferentes sugestões tem sido observadas na literatura acerca da secagem solar. Para aumentar a produção anual do secador, BOIS³ propõe uma pré-secagem ao ar livre até o teor de umidade de 15%, e posteriormente a secagem até aproximadamente 8% de umidade. GUENEAU¹⁸ recomenda a secagem da madeira no secador até um teor de umidade de 10%, depois de um período preliminar de secagem ao ar livre. CASIN et al.⁸ sugerem uma pré-secagem no secador até o teor de umidade de 25 a 30% antes da secagem em estufa convencional ao teor de umidade desejado. RYLEY⁴⁷ acredita que a secagem solar é mais adequada para folhosas e madeiras tropicais preliminarmente secas ao ar livre até o teor de umidade de 25 a 30%. Saliencia que, embora as coníferas também possam ser secadas na estufa solar,

isto é desnecessário devido ao sucesso da secagem a alta temperatura para tais espécies.

Existe um desequilíbrio entre o aumento do desempenho da estufa solar e a manutenção dos baixos custos de capital. Os dois mais recentes desenhos de estufas solar ilustram bem este problema. A estufa desenvolvida em Oxford por PLUMPTRE⁴⁰ minimiza os custos de capital às custas da eficiência da estufa e do tempo de secagem. O coletor externo proposto por TSCHERNITZ & SIMPSON⁷⁰ maximiza a eficiência da estufa, porém com custos de capital elevados, fato este que já havia sido constatado na Austrália por READ et al.⁴³. Os custos de capital da estufa de Oxford são bem aceitáveis mas o tempo de secagem precisa ser melhorado, ao passo que os custos de capital da estufa com coletor externo precisam ser reduzidos. Não tem sido encontrado na literatura análises econômicas do funcionamento comercial das estufas solar, o que evidencia que os secadores estão ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento. Com a intensificação das pesquisas, a possibilidade de adotar o processo de secagem solar em escala comercial parece promissora (CUPPETT¹²).

2.2.5. EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

As experiências com secagem solar no Brasil começaram em 1971, em Viçosa (MG) (latitude 20° 50'). Foi construído um secador solar para estudos, com capacidade para 3,0m³ de madeira serrada, com as seguintes dimensões: 2,5m de largura, 4,0m de comprimento, 3,0m de altura maior e 2,5m de altura menor. O recobrimento foi feito com duas camadas de plástico de 0,25mm, montados na forma de pequenas armações, e o piso foi de cascalho. Na parede sul, construída com duas camadas de chapas de fibra, estão localizadas quatro aberturas para renovação do ar no secador. O teto, inclinado 11° em relação à horizontal, foi orientado na direção do norte magnético. Sob o teto do secador, com a mesma inclinação, foi usada uma chapa de aço galvanizada pintada de preto, com uma área de 8,0m², que funciona como coletor de energia solar. Foram usados dois ventiladores de 47cm de diâmetro, com motor elétrico de 1/4 HP instalados na parte superior do secador, e defletores para distribuir o fluxo de ar interno. Não há notícias sobre a velocidade do ar utilizada.

Nos primeiros estudos realizados neste secador, foram secados moirões de *Eucalyptus saligna* com 12cm de diâmetro, pranchões de imbuia (*Ocotea porosa*) de 7,0cm de espessura e bicuíba (*Virola sp.*) de várias dimensões (VITAL & COLLOM⁷⁴). A temperatura externa variou em média entre 18°C às 8 horas e 21°C às 14:30 horas, enquanto no secador oscilou em média entre 21°C às 8 horas e 49°C às 14:30 horas. Nos dias extremos, a diferença entre as temperaturas interna e externa foi de 44°C. Os moirões de eucalipto levaram 98 dias para secar de 51,2% até 15,6% de umidade no secador, enquanto que após

282 dias de secagem ao ar livre, o teor de umidade atingiu em média 32,4%. Os defeitos de secagem foram aproximadamente iguais em função do baixo teor de umidade atingido no secador. A imbuia foi secada apenas no secador solar, de 21,8% a 6,5% de umidade em 59 dias, sendo que o teor de umidade de 10% foi atingido em 34 dias. A bicuiba levou 113 dias para secar de 42,3% até 11,6% de umidade no secador, enquanto que na secagem ao ar livre a umidade das peças foi reduzida para 17,5% no mesmo período de tempo. O tamanho médio das fendas na madeira secada no secador foi duas vezes menor do que ao ar livre. Os pesquisadores concluíram que a secagem solar pode ser usada com bons resultados por ser mais rápida, por possibilitar um teor de umidade final mais baixo e menor quantidade de defeitos do que a secagem ao ar livre.

Posteriormente, foi realizado um segundo experimento com a finalidade de verificar o comportamento da secagem de tábuas de *Eucalyptus saligna* de 25mm de espessura e pranchões de bicuiba com 75mm de espessura, no secador solar e ao ar livre (VITAL⁷³). Para este estudo, o desenho do secador original foi modificado. Sua capacidade de secagem foi reduzida para 2,0m³, tendo atualmente as seguintes dimensões: 2,0m de largura, 3,0m de comprimento, 3,0m de altura maior e 2,1m de altura menor. O teto, cuja inclinação foi aumentada para 22° 50', está orientado para o norte verdadeiro e a área do coletor foi reduzida para 4,5m². Os ventiladores foram trocados por dois de 50cm de diâmetro com motores de 1,0 HP. O teto foi substituído por uma camada de vidro de 5,0mm de espessura e as paredes norte, leste e oeste continuaram com duas camadas de plástico transparente, separadas entre si por uma

camada de ar de 1,0cm. A bicuíba com teor de umidade inicial de 42,3%, atingiu 20% após 39 dias de secagem no secador e 79 dias ao ar livre. Para alcançar a umidade de equilíbrio de 16%, foram necessários 65 dias no secador. Não foi detectada diferença significativa entre as médias dos defeitos de secagem ao ar livre e no secador. As tábuas de eucalipto foram secadas de 55,6% até 20% de umidade em 14 dias no secador e 35,5 dias ao ar livre, sendo necessário mais 7 dias no secador para alcançar o teor de umidade de 16%. Como os dois métodos de secagem causaram excessiva ocorrência de defeitos, VITAL⁷³ sugere um controle mais efetivo da umidade relativa e o uso de restrição mecânica durante a secagem de madeiras de eucalipto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL

A espécie utilizada nesta pesquisa foi canela preta (*Ocotea catharinensis* Mez), escolhida em função da disponibilidade e facilidade de obtenção. O material é oriundo da mata nativa e foi coletado no pátio de uma serraria em São Bento do Sul (SC). No próprio local, as tábuas com 25mm de espessura, aproximadamente 2,0m de comprimento e largura variável, foram separadas aleatoriamente em 3 lotes, cada um contendo uma quantidade suficiente para a confecção de 3 pilhas de madeira. Posteriormente, o material foi transportado para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, onde em seguida iniciou-se os experimentos de secagem.

3.2. DESENVOLVIMENTO DA ESTUFA SOLAR

3.2.1. ESTUDOS E TESTES PRELIMINARES

Os estudos iniciais foram realizados com um modelo tipo mini-estufa, construído com base nas estufas solar desenvolvidas em outras partes do mundo. A mini-estufa foi confeccionada com as seguintes dimensões: 0,86m de largura, 1,06m de comprimento, 0,73m de altura maior e 0,24m de altu-

ra menor (Figura 01). Para a sua construção utilizou-se uma armação de sarrafos sobre uma chapa de compensado naval que serviu de assoalho, e uma cobertura de plástico transparente de 0,20mm de espessura. Como o objetivo principal da mini-estufa foi avaliar o sistema de isolamento das paredes sólidas e transparentes, numa primeira fase dos estudos usou-se duas camadas de plástico afastadas por sarrafos de 2,0cm de modo a proporcionar um intervalo de ar estagnado. Na segunda fase dos testes adicionou-se uma terceira camada de plástico, mantendo o mesmo afastamento entre elas. A parede de maior altura, que funciona como porta, foi confeccionada com uma chapa de fibra. As partes internas do assoalho e da porta foram pintadas de preto e isoladas externamente, primeiro com chapas de isopor de 25mm e posteriormente com painéis de lã de rocha da mesma espessura, com a finalidade de avaliar a eficiência destes materiais no sistema de isolamento. Os testes com a mini-estufa foram realizados em condições artificiais, dentro de uma câmara climatizada com 20°C e 65% de temperatura e umidade relativa respectivamente. O aquecimento da mesma foi proporcionado por 4 lâmpadas de 250 watts, fixadas estrategicamente 20cm acima do teto transparente. A distribuição e uniformização do ar quente interno foi realizada por um pequeno ventilador. Testou-se adicionalmente a possibilidade de adotar um sistema de armazenamento de calor, utilizando-se para este fim paredes de tijolos dentro da mini-estufa. Além disso, foi testado também a importância de um coletor de energia, usando-se uma chapa de ferro interna e paralela ao teto.

Os testes com a mini-estufa foram executados apenas

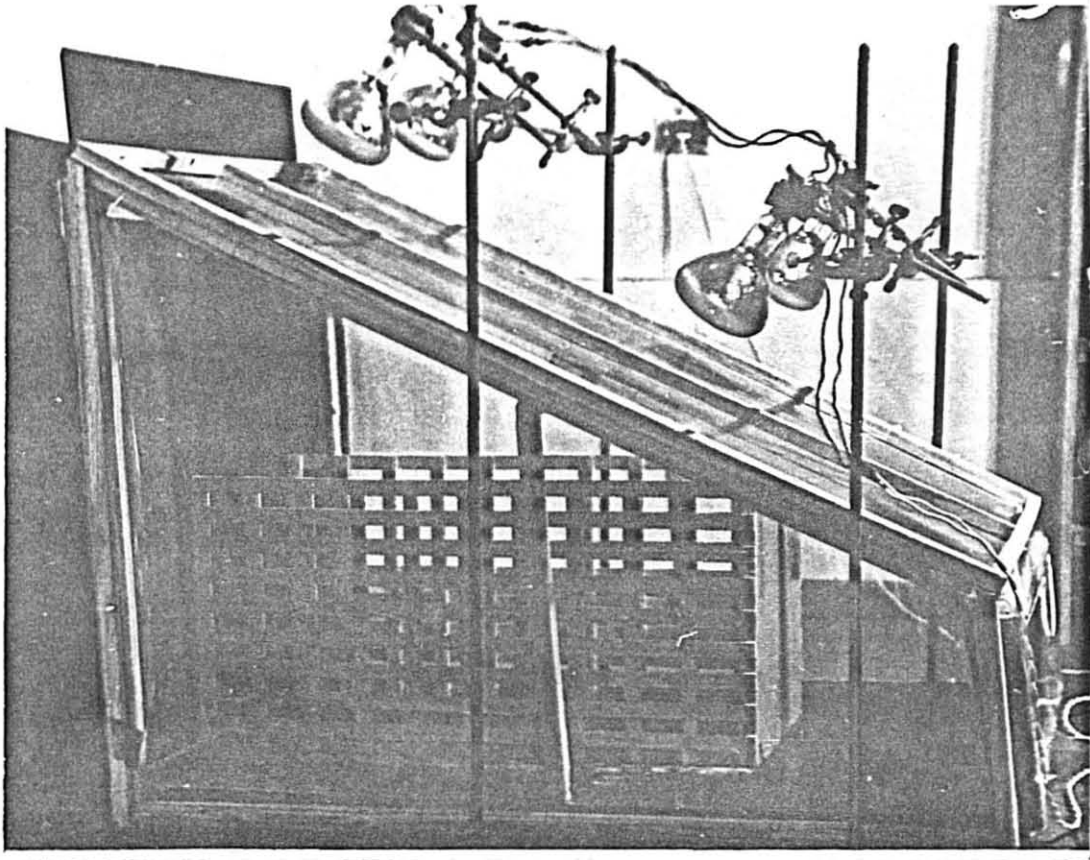


FIGURA 01: Mini-estufa usada nos testes preliminares.

com base na elevação e decréscimo da temperatura, provocados respectivamente pela ligação e desligamento das lâmpadas.

Para tanto utilizou-se um potenciômetro registrador dotado de vários termo-elementos, que permite verificar a temperatura em diferentes pontos simultaneamente.

3.2.2. CONSTRUÇÃO DA ESTUFA PILOTO

Com base nos testes preliminares realizados com a mini-estufa, construiu-se a estufa piloto com capacidade para $1,0\text{m}^3$ de madeira serrada e com as seguintes dimensões internas: 2,60m de largura, 3,20m de comprimento, 2,21m de altura maior e 0,72m de altura menor. Esta diferença de altura entre as paredes sul e norte, deve-se a inclinação de 25° do teto para a direção norte. Este ângulo foi escolhido em função da época de realização deste estudo, de maneira a possibilitar uma incidência dos raios solares aproximadamente perpendicular ao teto transparente (Figura 02).

A estufa solar foi dimensionada a partir da capacidade de secagem pré-estabelecida e dos espaços necessários para dar vazão ao volume de ar produzido pelo ventilador. Foi confeccionada com uma estrutura de vigas de 5 x 7cm, apoiada sobre pilares de tijolos 20cm acima do nível do solo, sendo o assoalho composto por chapas de aglomerado de 20mm de espessura. A parede sólida, voltada para a direção sul, foi feita com tábuas de 25mm. Nesta parede encontram-se as duas portas auxiliares de 0,60 x 1,10m, situadas lateralmente, e uma porta principal de 1,0 x 1,10m para carga e descarga localizada no centro da parede. Tanto esta parede como o assoalho foram isolados com o material lã de rocha para minimizar as perdas

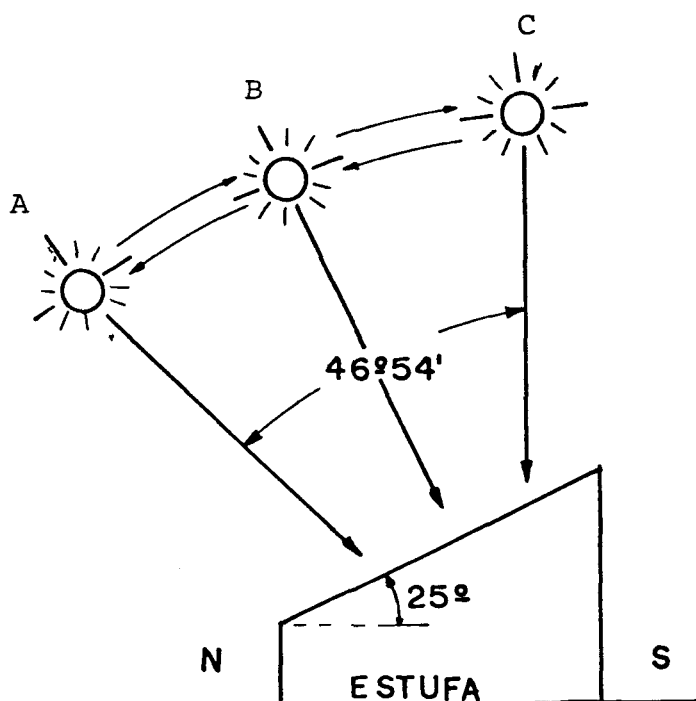


FIGURA 02: Relação entre a época do ano e a incidência dos raios solares sobre a estufa solar em Curitiba (Latitude $25^\circ 26'$, Longitude $49^\circ 17'$, Altitude 900m).

A - Posição aproximada do sol em junho.

B - Posição aproximada do sol em março e setembro

C - Posição aproximada do sol em dezembro

N - norte

S - sul

de calor. O teto da estufa e as paredes norte, leste e oeste foram recobertos com três camadas de plástico PVC transparente de 0,20mm, separadas por sarrafos de 2,0 x 2,0cm que mantêm duas camadas de ar estagnado entre elas. Com exceção do teto, a montagem dos plásticos foi feita em pequenos módulos para facilitar a sua retirada e reposição em caso de avarias, como sugerido em estudos anteriores (VITAL & COLLOM⁷⁴). Aproximadamente na metade da altura da parede norte, confeccionou-se duas aberturas de 25 x 25cm para permitir a ventilação da estufa. Ao redor da área de empilhamento, foram edificadas paredes vazadas de tijolos com a finalidade principal de direcionamento do ar, cujos detalhes de construção são mostrados na Figura 03. Sobre as paredes de tijolos, colocou-se um falso teto de madeira e um deflector de plástico para forçar a passagem do ar através dos tijolos e, conseqüentemente através da pilha de madeira.

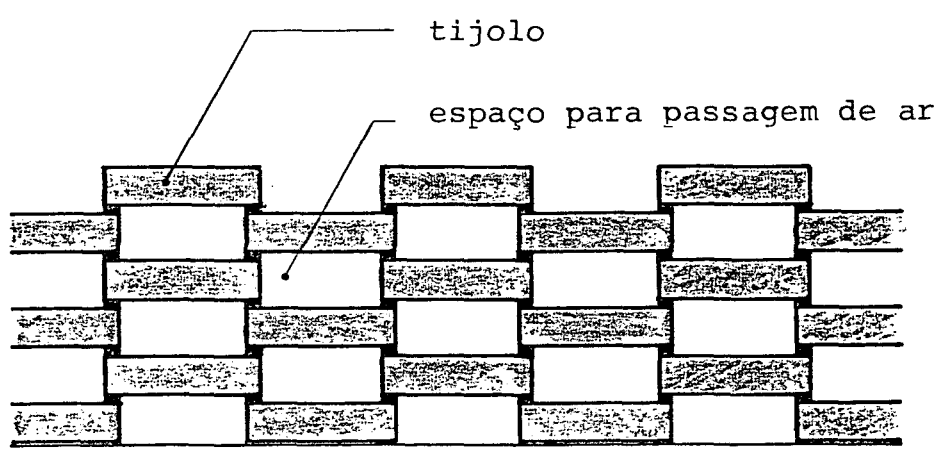


FIGURA 03: Detalhes da construção das paredes de tijolos.

Todas as superfícies internas da estufa foram pintadas com uma tinta fosca preta para servir de área de absorção de energia. A circulação do ar foi proporcionada por um ventilador de 47cm de diâmetro, movido por um motor elétrico trifásico de 0,5 HP, fixado sobre o assoalho na parte trazeira da estufa. A circulação do ar foi horizontal e sem reversão do mesmo. A figura 04 e a 28 (Apêndice 1) mostram a estufa solar utilizada neste estudo.

3.2.3. TESTES OPERACIONAIS

3.2.3.1. FUNCIONAMENTO DA ESTUFA VAZIA

Para observar a oscilação dos fatores envolvidos na secagem da madeira e deste modo compreender melhor o funcionamento da estufa solar, foram registradas diariamente através de termopares acoplados a um potenciômetro, as temperaturas internas do bulbo seco e úmido e a temperatura externa. Estes dados foram coletados durante parte dos meses de setembro e outubro de 1980, com a estufa vazia e circulação interna de ar.

Para verificar a velocidade do ar dentro da estufa solar, empilhou-se apenas uma fileira de tábuas de 25mm no lado interno da parede de tijolos, separadas por sarrafos de 25mm. A velocidade com que o ar passa através das tábuas foi medida com um anemômetro em diferentes pontos dos espaços proporcionados pelos sarrafos separadores.

3.2.3.2. FUNCIONAMENTO DA ESTUFA CARREGADA

Para avaliar preliminarmente o comportamento da estu-

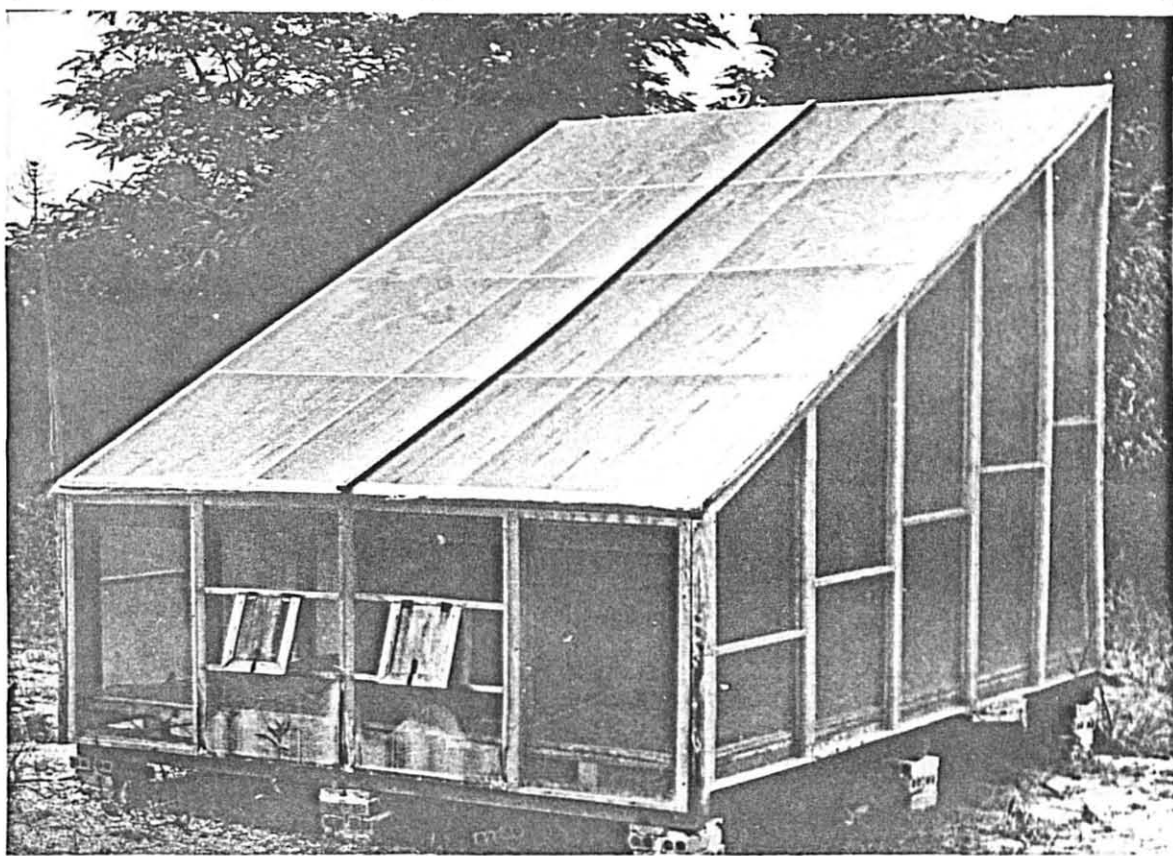


FIGURA 04: Estufa solar utilizada no experimento

fa solar, durante parte do mês de setembro de 1980 foram conduzidos estudos com uma carga de madeira composta de várias espécies. A mistura das espécies não foi proposital, e sim em função da disponibilidade de material no momento da realização dos testes.

Após a determinação do teor de umidade inicial, as 3 amostras de secagem foram colocadas em diferentes alturas da pilha de madeira, e pesadas diariamente para controlar o teor de umidade.

Neste primeiro teste de secagem com a estufa solar, além dos fatores envolvidos no processo analisou-se também a qualidade do material seco.

3.3. MÉTODOS DE SECAGEM UTILIZADOS

A eficiência do processo de secagem solar foi comparada com a secagem ao ar livre e em estufa convencional. Esta comparação foi realizada utilizando-se 3 lotes de madeira, um para cada método de secagem, separados aleatoriamente entre o material coletado. Cada lote foi subdividido em 3 pilhas, também de maneira aleatória, consideradas como sendo as repetições.

3.3.1. SECAGEM AO AR LIVRE

3.3.1.1. LOCAL DO EXPERIMENTO

A secagem ao ar livre foi realizada no pátio do Laboratório de Tecnologia da Madeira, próximo da estufa solar para evitar variações devido a influência dos fatores atmosféricos. O local escolhido é relativamente seco, bem drenado

e arejado, e recebe luz solar durante praticamente todo o dia.

3.3.1.2. EMPILHAMENTO

As três pilhas de madeira com dimensões de 0,8 x 1,0 x 2,0m de largura, altura e comprimento respectivamente, o que equivale a 0,8m³ cada uma, foram confeccionadas sobre uma fundação de madeira, elevada aproximadamente 0,45m do nível do solo, como mostra a Figura 05. Três sarrafos separadores de 2,5 x 2,5cm, afastados aproximadamente 1,0m um do outro, proporcionaram espaços para a circulação do ar entre as camadas de tábuas.

As pilhas de madeira foram orientadas na direção norte-sul em função da direção dos ventos predominantes. Sobre elas confeccionou-se uma cobertura de tábuas, para protegê-las das precipitações e incidência direta dos raios solares.

3.3.1.3. REGISTRO DOS FATORES ENVOLVIDOS

Os dados referentes aos fatores envolvidos no processo de secagem ao ar livre foram coletados na Estação Meteorológica situada no próprio local do experimento. Obteve-se a temperatura e a umidade relativa do ar a partir de um termohigrógrafo, e um heliógrafo forneceu as horas de insolação diária.

3.3.1.4. CONTROLE DO TEOR DE UMIDADE

Para controlar o teor de umidade das pilhas, utilizou-se amostras de secagem de 20 x 80cm de largura e comprimento respectivamente, confeccionadas a partir de tábuas cortadas

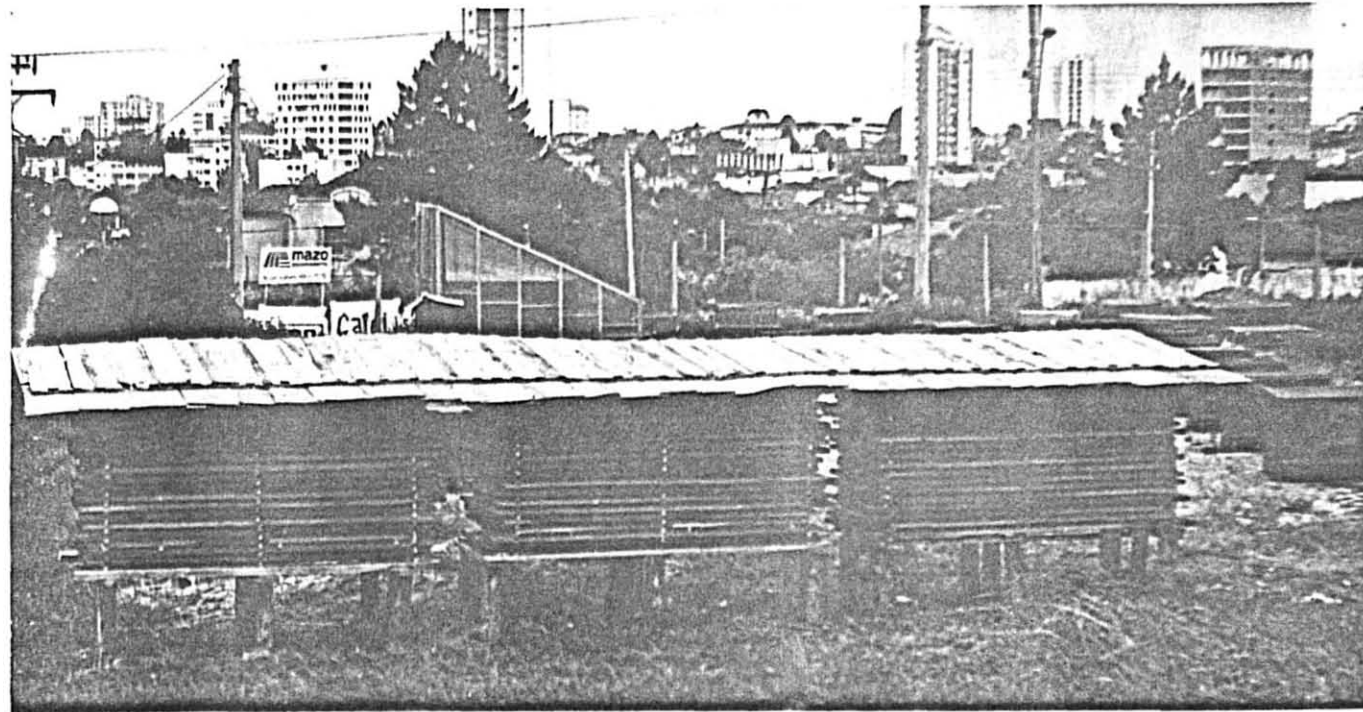


FIGURA 05: Pilhas de madeira para a secagem ao ar livre.

tangencialmente, como ilustra a Figura 06.

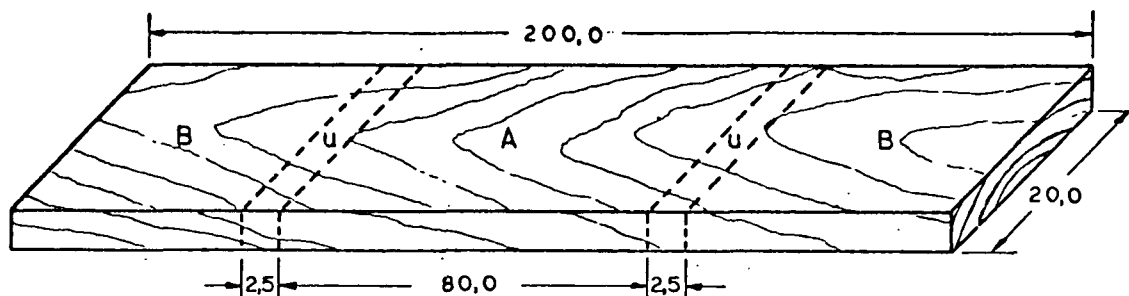


FIGURA 06: Metodologia adotada para a confecção das amostras de secagem.

- A - amostras de secagem
- B - parte eliminada
- u - secções para determinação do teor de umidade inicial

Obteve-se o teor de umidade inicial de cada amostra a través da média aritmética do teor de umidade das duas secções (u). O teor de umidade de cada secção foi determinado pela seguinte equação:

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Ps} \cdot 100 \quad \text{Equação 1}$$

onde: TU = teor de umidade da secção (%)
 Pu = peso úmido (g)
 Ps = peso seco (g)

Determinou-se os pesos úmido (Pu) e seco (Ps) de cada secção numa balança analítica com precisão de centésimos de grama, sendo o Ps obtido após a secagem em estufa de laboratório termostaticamente controlada a uma temperatura de $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Após a confecção e codificação, aplicou-se um selante nos topos das amostras de secagem para minimizar a perda de água no sentido longitudinal.

Colocou-se três amostras de fácil remoção e reposição em três pontos diferentes de cada pilha de madeira, de modo a permitir um controle real e representativo do teor de umidade das mesmas. O teor de umidade da pilha, calculado pela média das amostras de secagem, foi determinado diariamente através da seguinte equação:

$$TU_a = \frac{P_a (TU_i + 100)}{P_u} - 100 \quad \text{Equação 2.}$$

onde: TU_a = teor de umidade atual (%)
 P_a = peso atual da amostra (g)
 P_u = peso úmido da amostra (g)
 TU_i = teor de umidade inicial (%)

A pesagem periódica das amostras de secagem foi realizada numa balança analítica com precisão de 1,0g.

3.3.2. SECAGEM SOLAR

3.3.2.1. EMPILHAMENTO

Cada uma das três pilhas de madeira, com as mesmas dimensões daquelas usadas para a secagem ao ar livre, foi confeccionada fora da estufa sobre um carrinho especialmente construído. O carrinho transportador movimenta-se no lado externo da estufa sobre duas vigas removíveis que servem de trilhos. Uma vez introduzida a carga na estufa, só é retirada após consumado o processo de secagem.

3.3.2.2. CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM

Para controlar os fatores envolvidos no processo de secagem, utilizou-se de 3 termopares acoplados a um potenciômetro que registra ininterruptamente as temperaturas do bulbo seco e bulbo úmido dentro da estufa, e a temperatura externa. Para funcionar como termômetro úmido, um dos termopares foi mantido em contato com um algodão umedecido numa garrafa d'água. O elemento seco e o úmido foram colocados no percurso do fluxo de ar, antes da sua incidência sobre a pilha de madeira, e protegidos dos raios solares diretos e refletidos com um papel claro. Obteve-se a umidade relativa do ar e a umidade de equilíbrio da madeira através de uma tabela psicrométrica, a partir da temperatura do termômetro seco e da depressão do bulbo úmido.

O ventilador foi controlado termostaticamente, sendo acionado quando a temperatura interna atinge valor igual ou superior a 30°C, e desligado quando a mesma cai a valores in

feriores a este. As duas aberturas para trocas de ar com o exterior foram mantidas abertas 2,0cm durante todo o período de secagem. Além disso, abriu-se a estufa temporariamente uma vez por dia para medições das amostras de secagem.

3.3.2.3. CONTROLE DO TEOR DE UMIDADE

A confecção das amostras, aplicação de selante, pesagens, determinação do teor de umidade inicial e teor de umidade periódico para a secagem solar, foram semelhantes às aquelas da secagem ao ar livre. As três amostras foram distribuídas na parte da frente da pilha de madeira para facilitar a sua remoção e reposição durante a secagem, sem que para isso fosse necessário locomover a carga da estufa. As amostras foram pesadas e medidas diariamente às 18 horas, e nessas ocasiões o ventilador era desligado temporariamente para evitar a expulsão do ar quente da estufa.

3.3.3. SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

3.3.3.1. EQUIPAMENTO DE SECAGEM

Utilizou-se de uma estufa metálica tipo Kieffer-Sepp, com circulação de ar forçada, aquecida eletricamente, com dimensões úteis de 0,5 x 1,0 x 4,0m de largura, altura e comprimento respectivamente. Este equipamento possui uma capacidade de aquecimento de 15 kWh, além de uma caldeira elétrica. Possui também um controle automático e semi-automático de temperatura e umidade de equilíbrio. O ventilador produz um volume de ar de 1,0m³ e o fluxo do mesmo é longitudinal. A Figura 07 ilustra esquematicamente a estufa convencional usada.

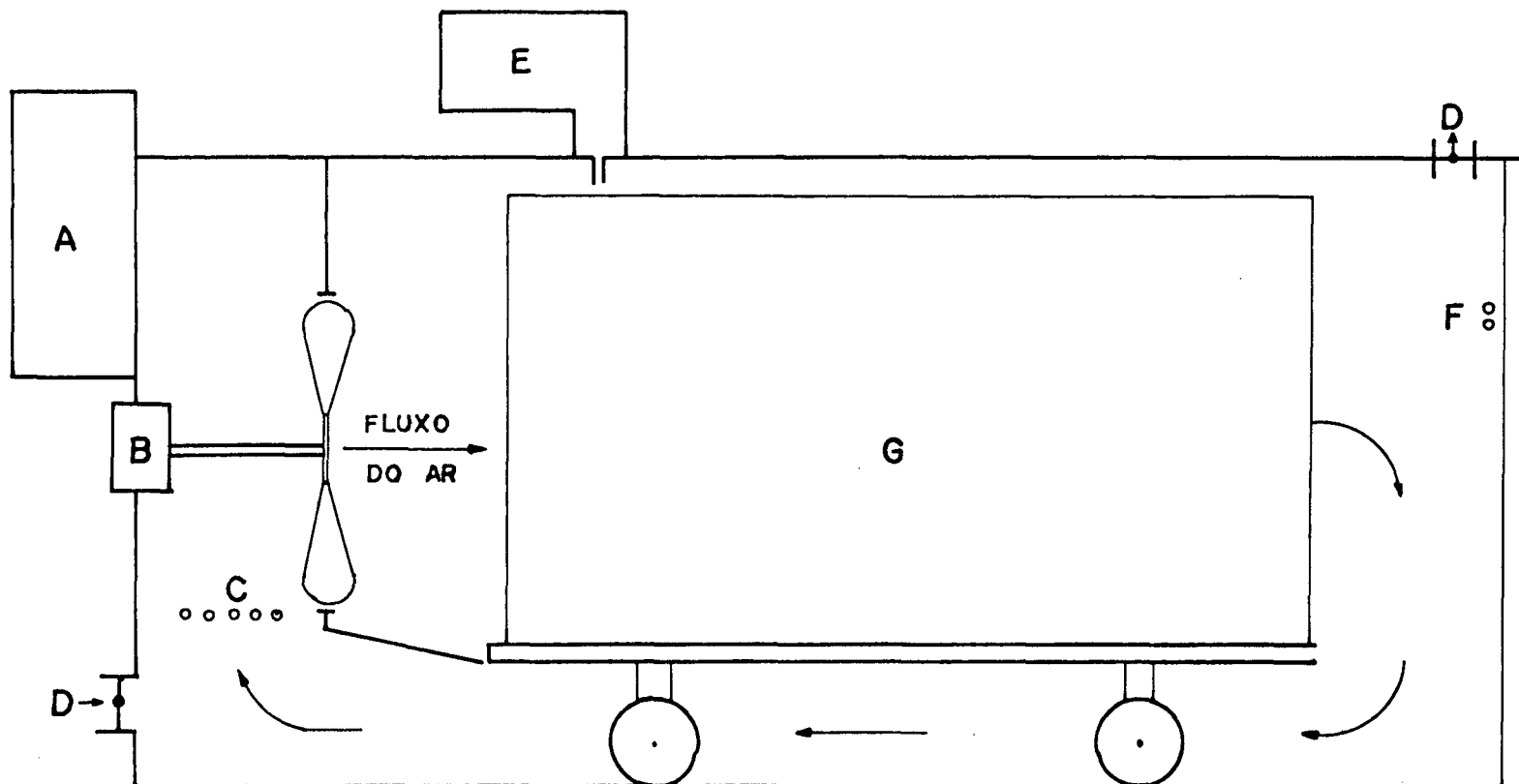


FIGURA 07: Esquema simplificado da estufa convencional utilizada neste estudo.

A - painel de controle
 B - ventilador
 C - serpentinas de aquecimento
 D - entrada e saída de ar

E - caldeira
 F - instrumentos de medição
 G - pilha de madeira

3.3.3.2. CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM

O programa de secagem elaborado para este estudo, previamente testado e otimizado para a espécie utilizada no experimento, é mostrado no Quadro 01.

QUADRO 01: Programa de secagem utilizado para tábuas de 25mm de *Ocotea catharinensis*.

TU	TEMPERATURA	Ueq.	Pt
%	°C	%	-
Até 50	65	17,0	3
50-40	65	13,0	3
40-30	65	10,0	3
30-25	65	8,0	3
25-20	65	6,5	3
20-15	65	5,0	3
15-12	65	4,0	3
Ac.	65	12,0	3

TU - teor de umidade

Ueq - umidade de equilíbrio

Pt - potencial de secagem

Ac - acondicionamento

Os valores da umidade de equilíbrio foram calculados através da relação entre teor de umidade e potencial de secagem. Tanto a temperatura como a umidade de equilíbrio da madeira foram controlados automaticamente.

3.3.3.3. CONTROLE DO TEOR DE UMIDADE

Também neste processo, utilizou-se três amostras em cada carga de secagem, as quais foram submetidas a todos os procedimentos e determinações estipuladas para os dois métodos anteriormente descritos. As amostras foram colocadas estrategicamente na pilha, de modo a permitir uma avaliação aproximada das condições de secagem. De 12 em 12 horas foram pesadas para a determinação periódica do teor de umidade, apesar da estufa ser equipada de três pontos para monitoramento contínuo do mesmo.

3.4. PARÂMETROS ESTABELECIDOS PARA COMPARAÇÃO

3.4.1. TEOR DE UMIDADE FINAL E TEMPO DE SECAGEM

Para a madeira secada na estufa solar e convencional, estabeleceu-se um teor de umidade final de 12% visto ser este o valor geralmente adotado pelas indústrias de móveis da região. Entretanto, devido a impossibilidade de alcançar estes índices na região de Curitiba, a secagem ao ar livre foi interrompida após um período de 3 meses estocada no pátio. Em consequência desse fato, a comparação entre a secagem ao ar livre e solar foi estabelecida ao teor de umidade de 20%.

3.4.2. TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem, que se refere a percentagem de água evaporada em um determinado intervalo de tempo, foi determinada através da diferença entre duas medições consecutivas

do teor de umidade das amostras. Calculou-se a taxa de secagem da pilha de madeira através da média das três amostras, consideradas neste caso como representativa da mesma. A comparação entre os três métodos de secagem foi estabelecida em função da variação do teor de umidade da madeira.

3.4.3. CONTRAÇÃO DA MADEIRA

O desenvolvimento da contração da madeira foi avaliado medindo-se periodicamente a largura e a espessura das amostras de secagem. Para que estas operações pudessem ser feitas com a maior precisão possível, demarcou-se os pontos de medições em todas as amostras. Para medir a espessura das mesmas usou-se um micrômetro e para a largura um paquímetro. Em razão dos valores praticamente insignificantes, desconsiderou-se a contração longitudinal. Comparou-se a contração da madeira seca nos três métodos de secagem em intervalos de umidade pré-estabelecidos e ao teor de umidade final. A contração em espessura (radial) e largura (tangencial), foram determinadas através das equações 3 e 4.

$$\beta_r = \frac{E_v - E_{at}}{E_v} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.}$$

onde: β_r = contração radial (%)

E_v = dimensão em espessura verde (mm)

E_{at} = dimensão em espessura atual (mm)

$$\beta_t = \frac{L_v - L_{at}}{L_v} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.}$$

onde: β_t = contração tangencial (%)
 L_v = dimensão em largura verde (mm)
 L_{at} = dimensão em largura atual (mm)

3.4.4. QUALIDADE DA MADEIRA

Os defeitos provocados pela secagem nos três métodos, foram analisados individualmente nas peças componentes de cada pilha de madeira. Mediu-se o comprimento das rachaduras e os diferentes tipos de empenamentos com uma régua graduada de precisão milimétrica. Os empenamentos foram avaliados sobre uma mesa plana, fixando-se uma das extremidades da tábua e medindo a flecha do arco na metade da mesma, a altura do torcimento e a flecha do encanoamento no outro extremo da peça. Através dos valores médios comparou-se a ocorrência de defeitos nos três métodos de secagem. Além disso, através do teste de garfo tentou-se detectar a presença de tensões na madeira, no final de cada processo de secagem.

3.5. ANÁLISE E DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

Comparou-se os três processos de secagem através da análise da variância, usando-se um delineamento completamente casualizado. Durante os testes preliminares com a mini-estufa, foi analisado o sistema de isolamento da mesma através do tempo de queda da temperatura, utilizando-se para este

fim três repetições. Quando da avaliação dos resultados da secagem ao ar livre, solar e convencional, analisou-se a ocorrência dos seguintes defeitos: rachaduras, empenos em arco, em canoa e torcido.

O delineamento compreende três tratamentos (secagem ao ar livre, solar e convencional) e três repetições (três pilhas de madeira em cada método).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DESEMPENHO DA ESTUFA SOLAR

4.1.1. SISTEMA DE ISOLAMENTO

A comparação entre os materiais lã de rocha e isopor para isolamento das paredes sólidas, e entre as paredes de plástico dupla e tripla para as superfícies transparentes da mini-estufa, é mostrada no Quadro 15 do Apêndice 2. Os valores médios das três repetições e os respectivos desvio padrão e erro padrão da média são apresentados no Quadro 02.

QUADRO 02: Isolamento da mini-estufa - tempo médio em horas, da queda de temperatura de 60° até 30°C.

TRATAMENTO	n	TEMPO - h -	s	$s_{\bar{x}}$
2 plásticos lã de rocha*	3	3,00	0,20	0,11
3 plásticos lã de rocha*	3	6,96	0,45	0,26
3 plásticos isopor*	3	2,56	0,20	0,11

* - material usado para isolar as superfícies sólidas

$s_{\bar{x}}$ - erro padrão da média

- n - número de repetições
s - desvio padrão

Os valores do Quadro 02 por si só, fornecem subsídios suficientes acerca do sistema de isolamento. Entretanto, para comprovar estas evidências, foi realizada a análise da variância (Apêndice 7) baseando-se nos dados apresentados no Quadro 15, a qual mostrou haver diferença significativa entre os tratamentos ao nível de 99% de probabilidade. Adicionalmente, a comparação das médias através do teste de Tukey detectou a existência de diferença significativa entre os tratamentos "2 plásticos" e "3 plásticos" e entre os tratamentos "lã de rocha" e "isopor", ao nível de 99%. Estes resultados indicam que o emprego de uma cobertura de três plásticos permite um isolamento mais eficiente das paredes transparentes da estufa, em relação ao uso de dois plásticos, devido a formação de duas camadas de ar estagnado entre os mesmos. Embora possibilite menores perdas de calor do interior da estufa para o ambiente, deve-se considerar que a adição de um plástico na cobertura eleva os custos de construção em aproximadamente 25%.

O isolamento térmico das superfícies sólidas da estufa foi avaliado através dos tratamentos "lã de rocha" e "isopor". A comparação através do teste de Tukey já mencionada, evidenciou que a lã de rocha apresenta melhores propriedades isolantes uma vez que as perdas de calor ocorreram mais rapidamente quando a mini-estufa foi isolada com isopor. A eficiência da lã de rocha como isolante neste experimento deve-se provavelmente a grande quantidade de ar em repouso contida

nos seus interstícios, já que o ar estagnado preso entre duas superfícies funciona como um excelente isolante térmico. Além de permitir um bom isolamento, o custo deste material foi aproximadamente 30% menor do que o isopor. A partir destas constatações pode-se verificar que há um certo equilíbrio nos custos de construção com a adição de mais um plástico e o uso de lã de rocha em detrimento do isolante tradicional, fato este que poderá justificar o emprego de uma cobertura transparente tripla.

Embora não tenha sido analisada estatisticamente a fluência da parede de tijolos no armazenamento de calor dentro da mini-estufa, sua importância pode ser constatada graficamente através da Figura 08, confrontando-se as curvas c e d. No teste em que foi colocada uma parede de tijolos dentro da mini-estufa, a temperatura levou 2 horas a mais do que no teste sem tijolos, para cair de 60° até 30°C. Este fato demonstra que uma construção de tijolos dentro da estufa solar proporciona uma queda de temperatura mais lenta, evidenciando que os mesmos mantêm o calor interno por um período mais prolongado.

Pode-se verificar também através da Figura 08, comparando as curvas d e e, que a influência do coletor de energia neste modelo não foi muito evidenciada, provavelmente devido a pequena espessura da chapa de ferro utilizada para este fim.

Os estudos conduzidos por WENGERT⁷⁶ relatam que as principais fontes de perdas de calor se manifestam por convecção através das paredes e teto, por reflexão e transmissão da energia solar, pelas aberturas de ventilação, por radia-

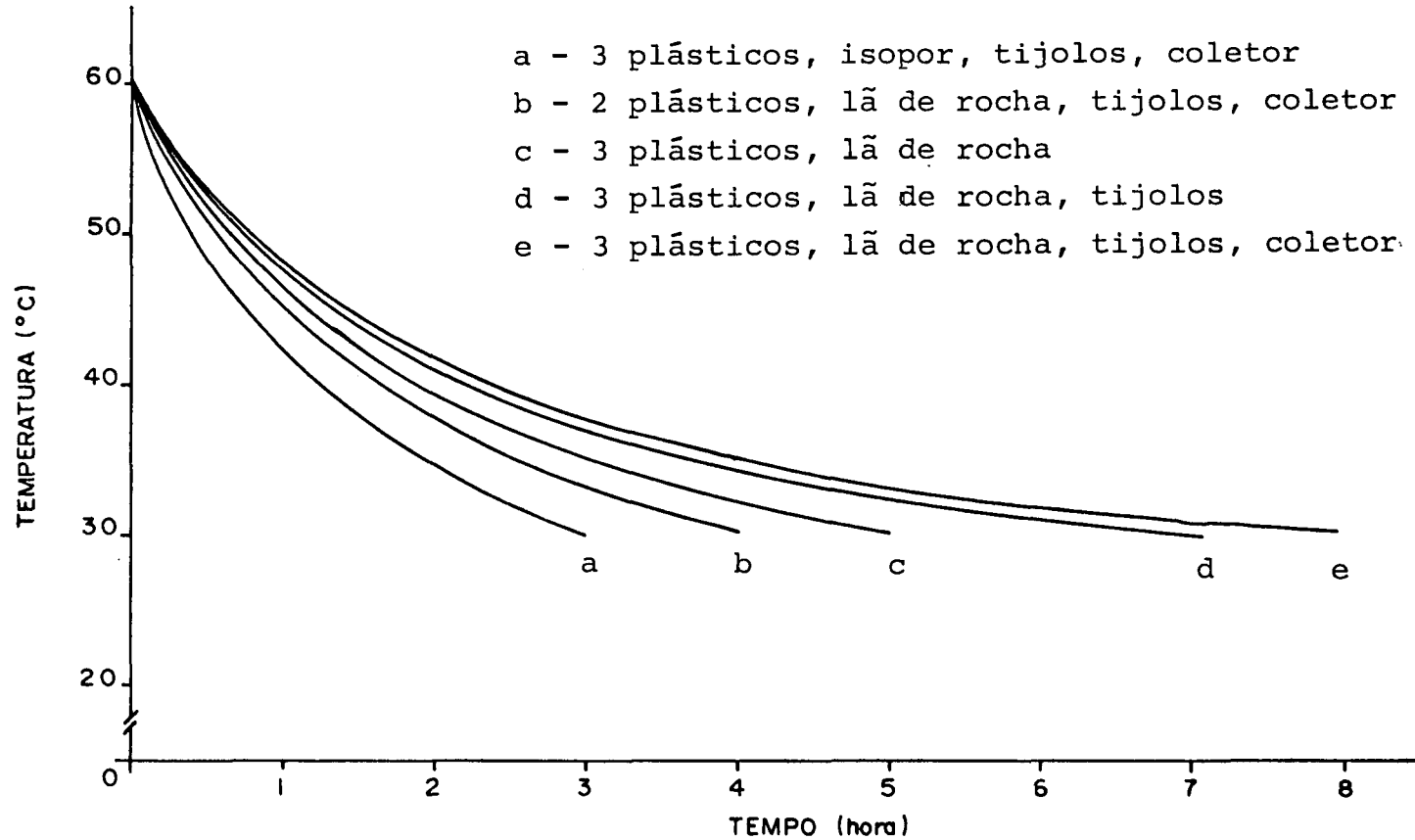


FIGURA 08: Tempo de queda da temperatura desde 60° até 30°C, em alguns testes realizados com a mini-estufa.

ção de ondas longas, e devido a transmissão através do assoalho. Como já mencionado anteriormente, um dos aspectos considerados no desenho da estufa solar para o presente estudo, foi o de melhorar o sistema de isolamento. Embora as perdas de calor não tenham sido avaliadas quantitativamente, os testes realizados com a mini-estufa e o experimento conduzido com a estufa piloto atestam a eficiência da mesma.

A distância entre os plásticos, ou seja, a espessura da camada de ar, não foi avaliada neste estudo, e de acordo com a literatura, nem em trabalhos anteriormente realizados. O valor de 2,0cm foi adotado a partir das informações de NOACK³⁵. As duas camadas de ar estagnado entre os plásticos, ao invés de apenas uma como na maioria dos estudos conduzidos até então, juntamente com o uso do isolante lã de rocha para as superfícies sólidas, contribuíram decisivamente para a maximização do sistema de isolamento da estufa solar.

Um ano após a sua construção, a estufa solar mantém-se em perfeitas condições de uso, não sendo necessário a substituição de nenhum dos módulos de plástico. Devido ao pequeno período de tempo em que esteve sob observação, não foi possível avaliar a durabilidade do plástico. Contudo, VITAL & COLLOM⁷⁴ estimaram uma vida útil de 2 a 3 anos para o plástico e aproximadamente 4 anos para os demais componentes da estufa. Obviamente que este intervalo é grandemente afetado pelas condições climáticas do local, podendo ser necessária a substituição destes materiais num prazo maior ou menor (CHUDNOFF et al.¹⁰, SHARMA et al.⁵⁴).

O assoalho de aglomerado usado na estufa resistiu sa

tisfatoriamente ao peso da carga de madeira e ao ambiente úmido interno nos primeiros estágios de secagem. No entanto, para a secagem de um volume maior de madeira em uma estufa de capacidade superior a estudada, utilizando o mesmo sistema de isolamento, a resistência da chapa poderá ser afetada pelo peso da pilha de madeira. A sugestão de WENGERT⁷⁶ de utilizar uma camada de concreto ou asfalto sobre uma base de madeira poderá ser, eventualmente, uma boa opção.

4.1.2. ESTUFA VAZIA

Na estufa solar vazia foram observados alguns fatores relacionados com as condições internas da mesma que, conseqüentemente, influem diretamente no processo de secagem. É evidente que as condições dentro da estufa vazia diferem daquelas encontradas para a estufa carregada. Entretanto, o conhecimento dos limites de variação dos fatores envolvidos na secagem, além de estabelecer um termo de comparação entre a estufa solar vazia e carregada, fornece subsídios importantes para a avaliação do seu desempenho por ocasião da secagem de madeiras. Por esta razão, foram realizadas observações sobre a relação entre insolação e temperatura, temperatura e umidade, e velocidade do ar.

4.1.2.1. INSOLAÇÃO E TEMPERATURA

Constatou-se que a temperatura interna aumenta com o aumento do número de horas de insolação diária, o que é comprovado pela correlação estabelecida entre estas duas variáveis, mostrada graficamente na Figura 09.

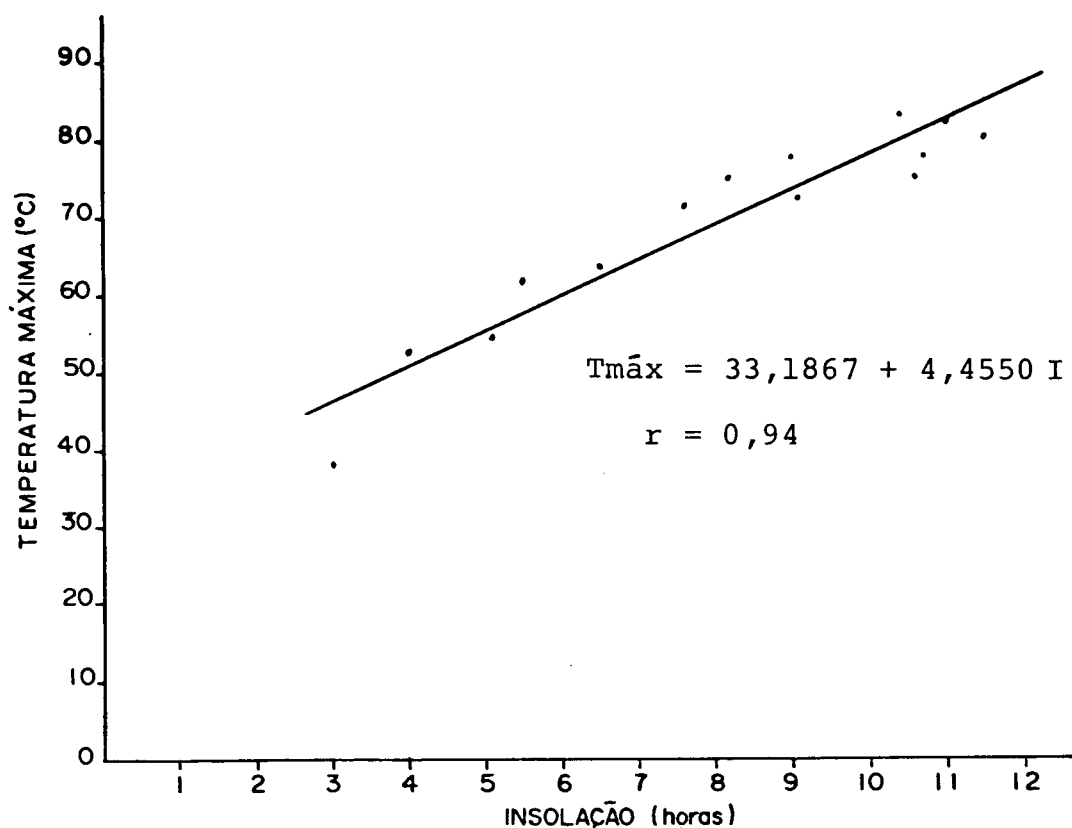


FIGURA 09: Relação entre a insolação (I) e a temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) da estufa solar vazia

YANG⁷⁹ também evidenciou, para altas latitudes, a existência dessa relação, encontrando um Coeficiente de Correlação de 0,86. Como pode ser observado, a correlação entre insolação e temperatura da estufa encontrada neste estudo foi mais estreita ($r = 0,94$), devido provavelmente ao menor número de repetições e ao isolamento mais eficiente da estufa.

As temperaturas máximas registradas na estufa solar ocorreram aproximadamente às 14 horas. A hora de ocorrência da temperatura máxima parece variar de acordo com a latitude, a qual em Curitiba é de $25^{\circ} 26' S$. PLUMPTRE⁴¹ verificou que a temperatura máxima na estufa ocorreu entre 12 e 14 horas, numa latitude de $0^{\circ} 18'$, ao passo que YANG⁷⁹, numa latitude

de 48° encontrou o valor máximo às 16 horas. No secador de Porto Rico (18° de latitude), CHUDNOFF et al.¹⁰ verificaram que a temperatura máxima ocorreu às 12 horas. A partir destas observações pode-se concluir, que a hora de ocorrência da temperatura máxima dentro da estufa aumenta com a latitude do local.

A temperatura média da estufa solar às 14 horas foi 73°C ao passo que a temperatura média externa foi 25,3°C. A maior temperatura alcançada na estufa solar foi 83,1°C, registrada às 14 horas de um dia claro e com alta insolação, quando a temperatura externa era de 29°C. YANG⁷⁹ encontrou uma temperatura média na estufa solar e ao ar livre às 16 horas, de 49,3°C e 20,0°C respectivamente, ao passo que a maior temperatura registrada na estufa solar foi 61,1°C. YANG⁷⁹ verificou também que a diferença máxima entre a temperatura interna e externa (Δt) foi 37°C, registrada no verão quando as horas de insolação naquela latitude são maiores. A variação diária das diferenças entre as temperaturas interna e externa (Δt) é mostrada na Figura 10, cujos dados são apresentados no Quadro 16 do Apêndice 3. Observa-se que o Δt médio às 14 horas foi 47,6°C, enquanto que o Δt mínimo e máximo nesta hora do dia atingiu 42,0°C e 54,0°C respectivamente. As altas temperaturas e Δt evidenciadas nesta pesquisa com a estufa solar vazia podem ser atribuídas ao eficiente sistema de isolamento da estufa solar e a adequada inclinação do teto para o período de testes.

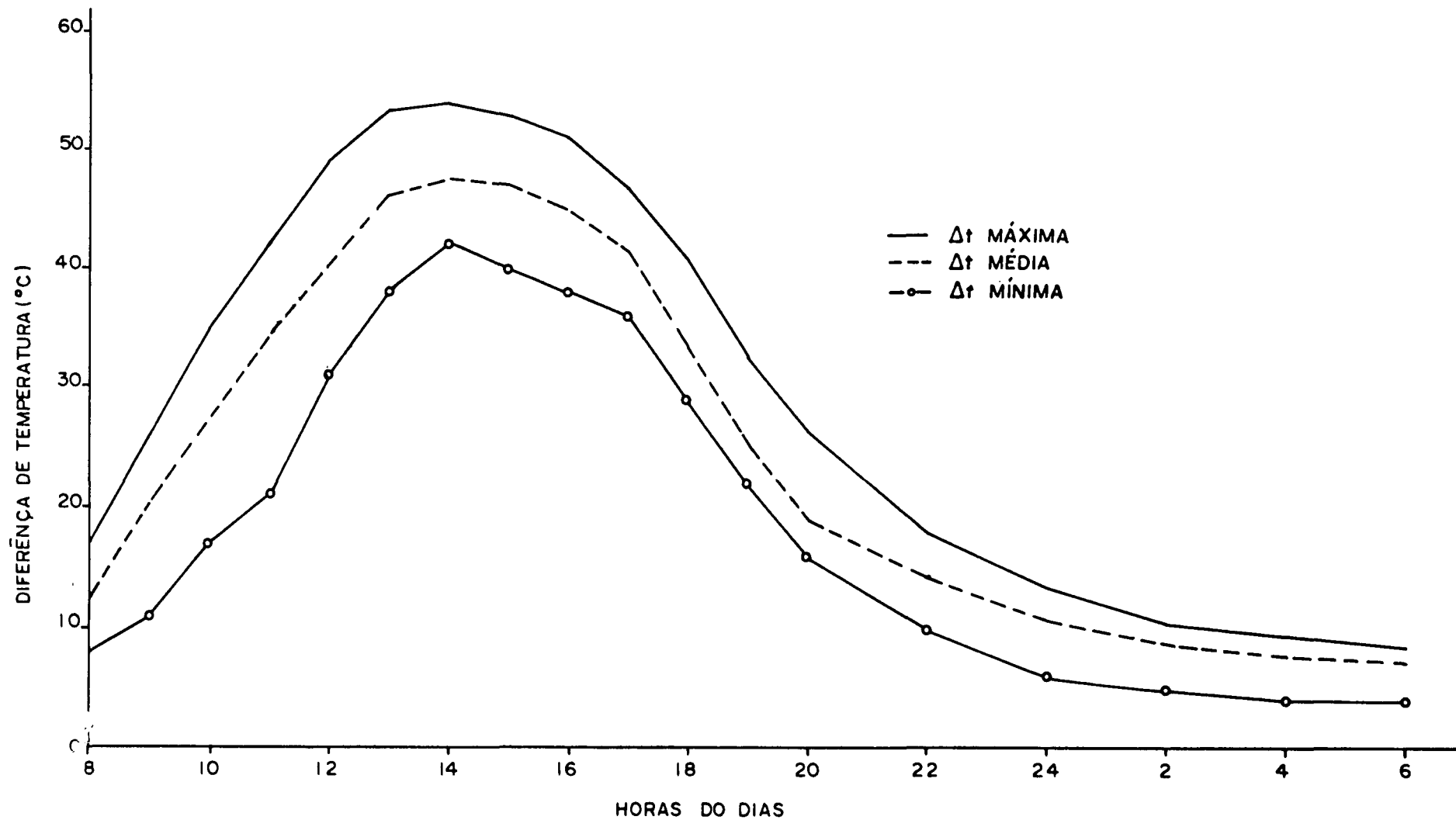


FIGURA 10: Variação diária das diferenças de temperatura (Δt) mínima, média e máxima durante os testes com a estufa vazia.

4.1.2.2. TEMPERATURA E UMIDADE

Uma comparação entre as condições internas da estufa solar e ao ar livre é apresentada na Figura 11, na forma de valores médios de temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio. Observa-se que as condições de secagem na estufa solar são bem mais severas do que ao ar livre, apresentando maior temperatura, menor umidade relativa e conseqüentemente menor umidade de equilíbrio.

Constatou-se, como era de se esperar, que a umidade relativa e a umidade de equilíbrio dentro da estufa solar são afetadas tanto pela temperatura interna como por Δt . Conforme aumenta a temperatura na estufa solar, tanto a umidade relativa como a umidade de equilíbrio diminuem, as quais também decrescem a medida que aumenta Δt . A Figura 12 mostra as correlações evidenciadas entre temperatura e umidade relativa da estufa ($r = -0,91$) e entre temperatura e umidade de equilíbrio ($r = -0,96$), enquanto que a Figura 13 mostra as relações entre Δt e umidade relativa ($r = -0,90$) e entre Δt e umidade de equilíbrio ($r = -0,94$). Pode-se verificar através dos Coeficientes de Correlações que a umidade relativa e a umidade de equilíbrio estão estreitamente relacionadas tanto com a temperatura da estufa como com Δt , e o Coeficiente de Determinação indica que existe um ajuste razoável entre as curvas.

Estas relações também foram observadas por PECK³⁸. PECK³⁸ verificou que num determinado estágio da secagem, a temperatura interna, Δt e umidade relativa atingiram 24,4°C, 5,0°C e 50% respectivamente. Posteriormente, numa outra época, encontrou para os mesmos fatores 39,4°C, 11,1°C e 26%.

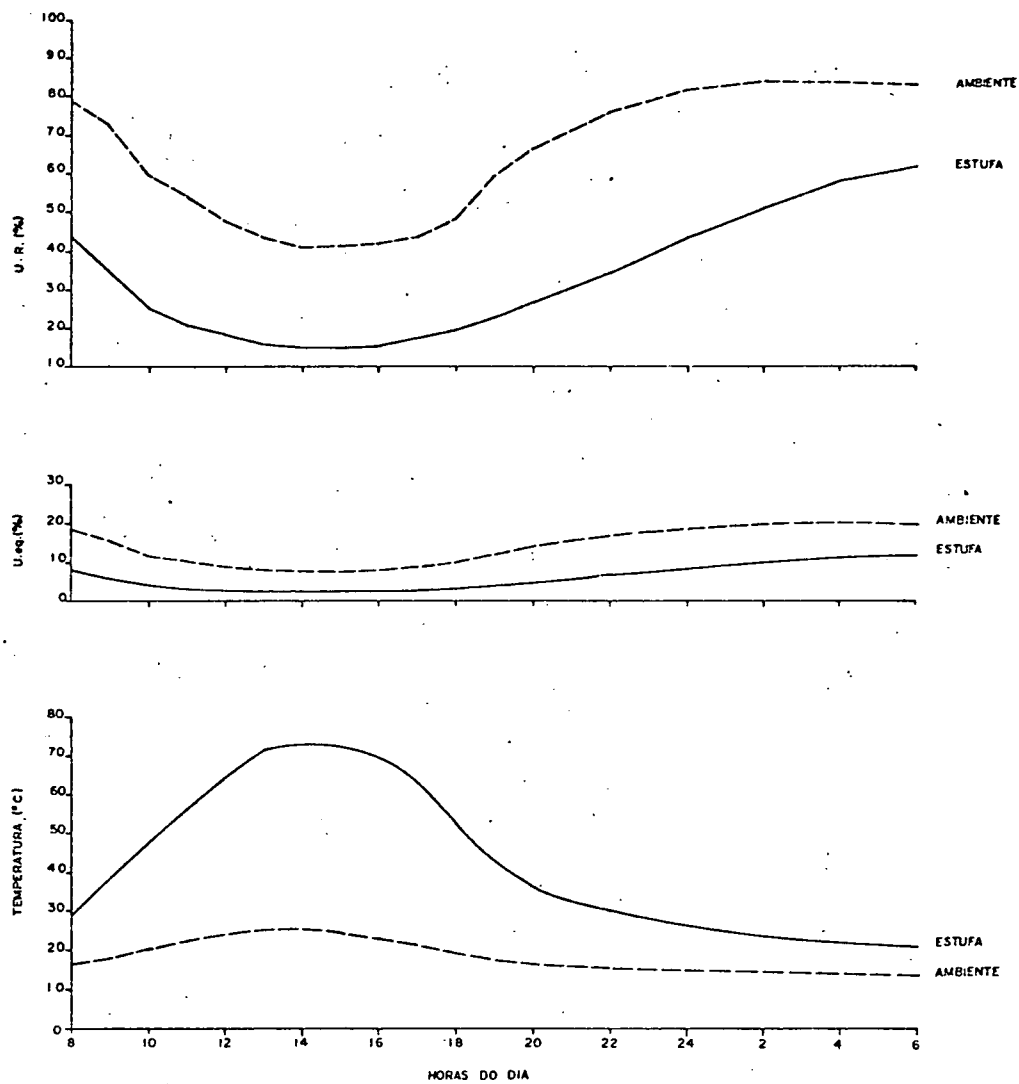


FIGURA 11: Variação média diária da temperatura, umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (Ueq) interna e externa, verificada durante o período de testes com a estufa solar vazia.

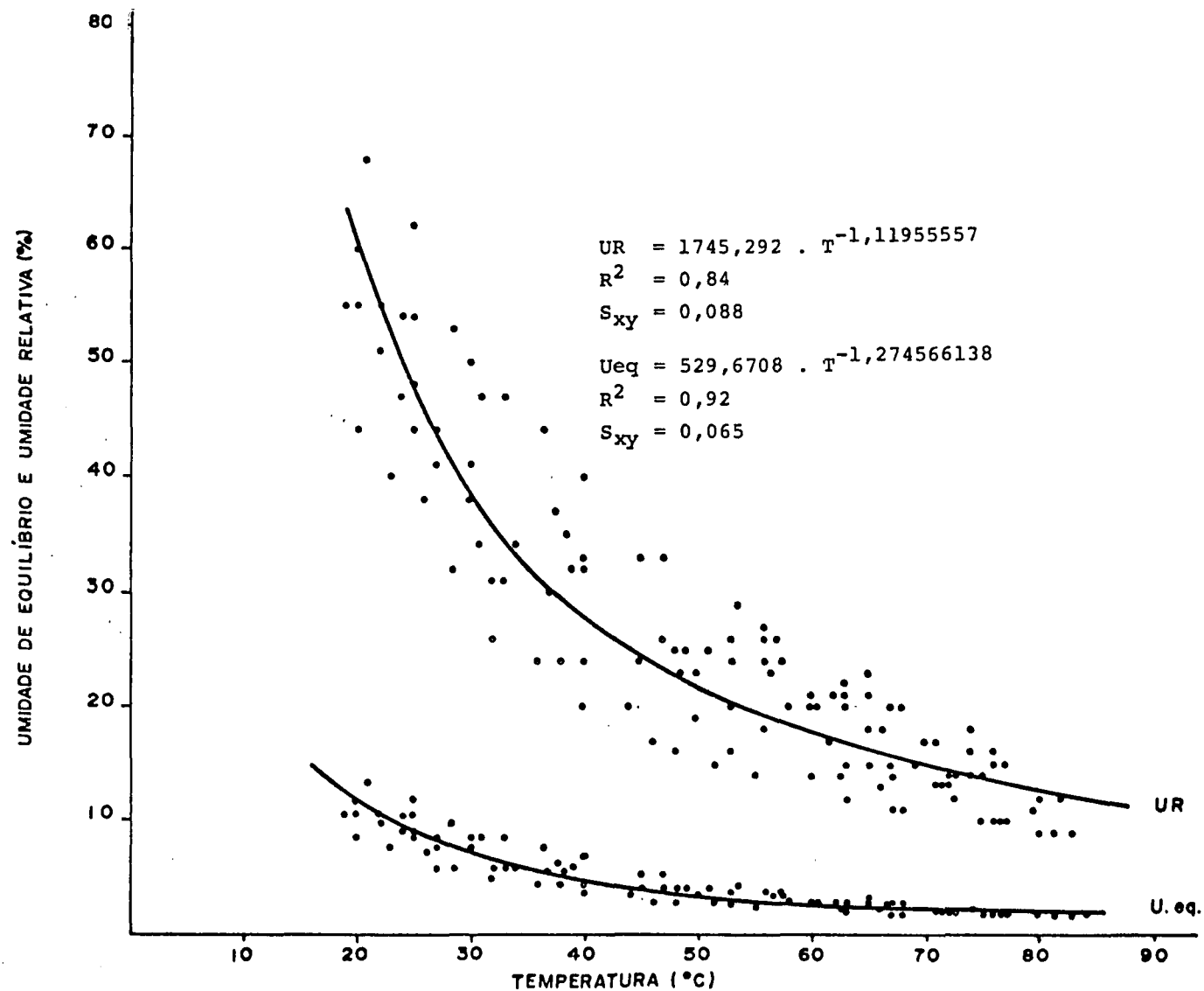


FIGURA 12: Relação entre temperatura (T), umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (Ueq) na estufa solar vazia.

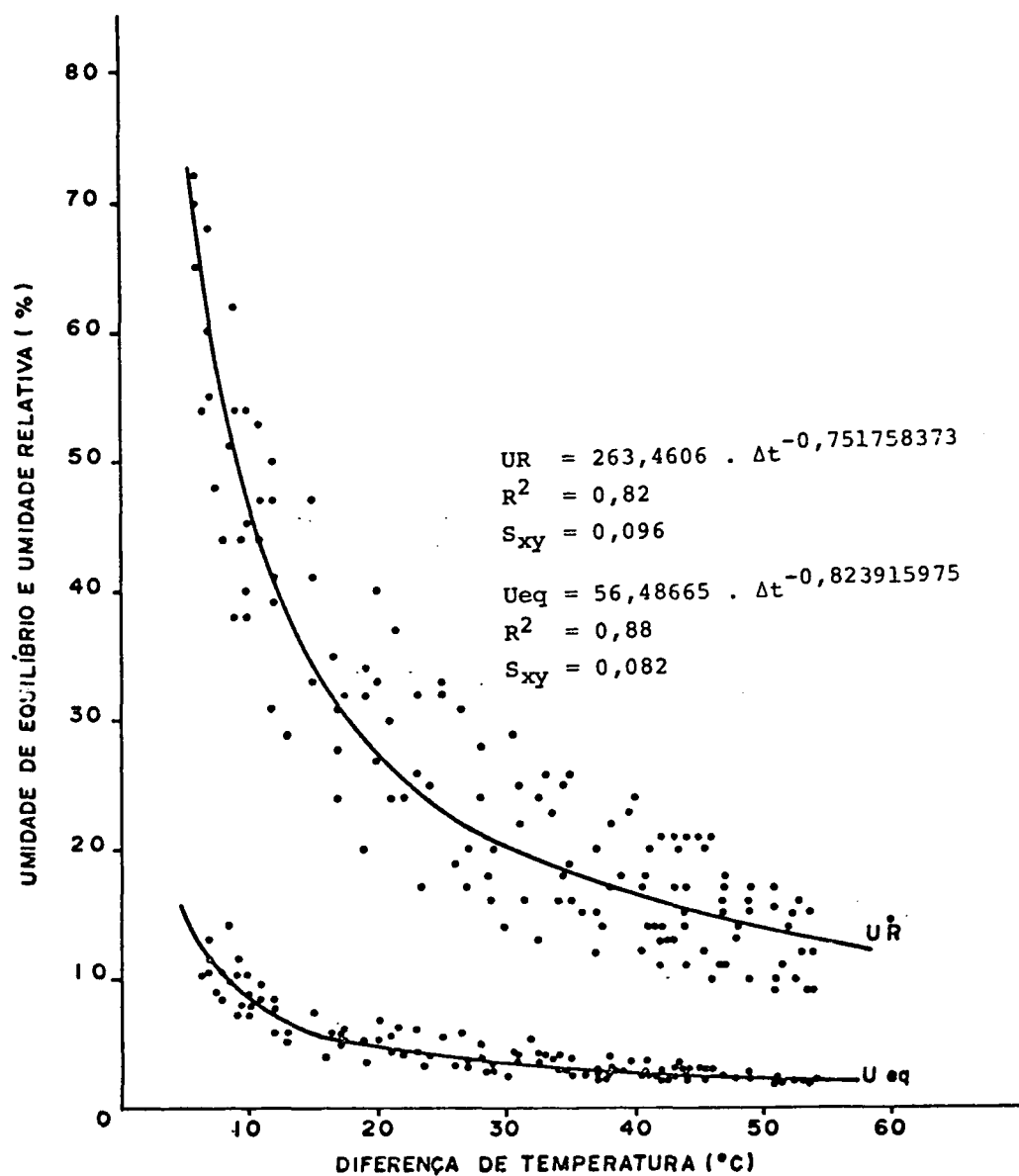


FIGURA 13: Influência da diferença de temperatura (Δt) na umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio (Ueq) da estufa solar vazia.

4.1.2.3. VELOCIDADE DO AR

Outro fator de secagem importante é a velocidade do fluxo de ar através da pilha de madeira. Escolheu-se 1,5 m/s por ser mais compatível com o processo e com o tipo de material utilizado neste experimento. Este valor está dentro dos limites de 1,2 e 2,0 m/s propostos por BRENNAN et al.⁴ para a secagem de madeira de folhosas a baixas temperaturas. Verificou-se através de um anemômetro que a velocidade média do ar foi muito próxima daquela pré-estabelecida, sendo que os valores máximo e mínimo atingiram 2,0 e 1,0 m/s respectivamente. No entanto não existem ainda informações concretas sobre a velocidade do ar ideal para a secagem solar, e os valores encontrados tem sido baixos e variáveis. CHUDNOFF et al.¹⁰ registraram velocidades variando entre 0,3 e 0,5 m/s, enquanto que TROXELL & MUELLER⁶⁹ utilizaram valores entre 0,5 e 1,8 m/s.

A maioria dos estudos evidenciam que a velocidade de circulação do ar está diretamente relacionada com a temperatura e conseqüentemente, com a taxa de secagem da madeira. ECKELMAN & BAKER¹³ reportam que, de um modo geral, a taxa de secagem eleva-se com o aumento da velocidade do ar e também aumenta linearmente com a temperatura como observado por SANTINI⁴⁸. Estudos conduzidos por TOMASELLI⁶⁷ evidenciam que a velocidade do ar deve ser tanto maior quanto mais elevada for a temperatura de secagem.

Com base no exposto, parece que uma boa prática seria ajustar a velocidade do ar em função da temperatura visando a maximização do processo quando a madeira não apresenta pro

blemas de secagem, e em função da taxa de secagem quando o objetivo é minimização de defeitos em madeiras espessas e propensas aos mesmos. Isto poderia ser feito regulando a rotação do ventilador de modo a proporcionar maior ou menor velocidade do ar nos períodos de temperatura interna máxima, dependendo do material de secagem.

4.1.3. ESTUFA CARREGADA

O teste com a estufa solar carregada foi conduzido com o objetivo de verificar o desempenho da mesma durante a secagem de $0,8\text{m}^3$ de madeira de diferentes espécies, com espessura de 25mm. A carga de madeira com uma umidade inicial de 87,0%, atingiu o teor de umidade de 11,6% em 20 dias, e com mais 2 dias de secagem alcançou o teor de umidade final de 7,0%, como mostra a curva da Figura 14. É importante acrescentar que durante o período de secagem foram observados 4 dias chuvosos e 6 dias de tempo nublado.

CHUDNOFF et al.¹⁰ também secaram uma carga mista de madeira desde 60,0% até 12,0% de umidade em 43 dias. Concluíram que este período de tempo poderia ser menor se as espécies fossem secadas separadamente.

A variação das temperaturas interna e externa máximas e da insolação durante o período de testes com a estufa carregada, é mostrada graficamente na Figura 15. A temperatura máxima dentro da estufa solar, verificada nos estágios finais da secagem, foi $62,0^{\circ}\text{C}$, enquanto que a diferença máxima entre a temperatura interna e externa (Δt) foi $44,0^{\circ}\text{C}$.

GOUGH¹⁷ verificou que em dias ótimos de secagem, o Δt

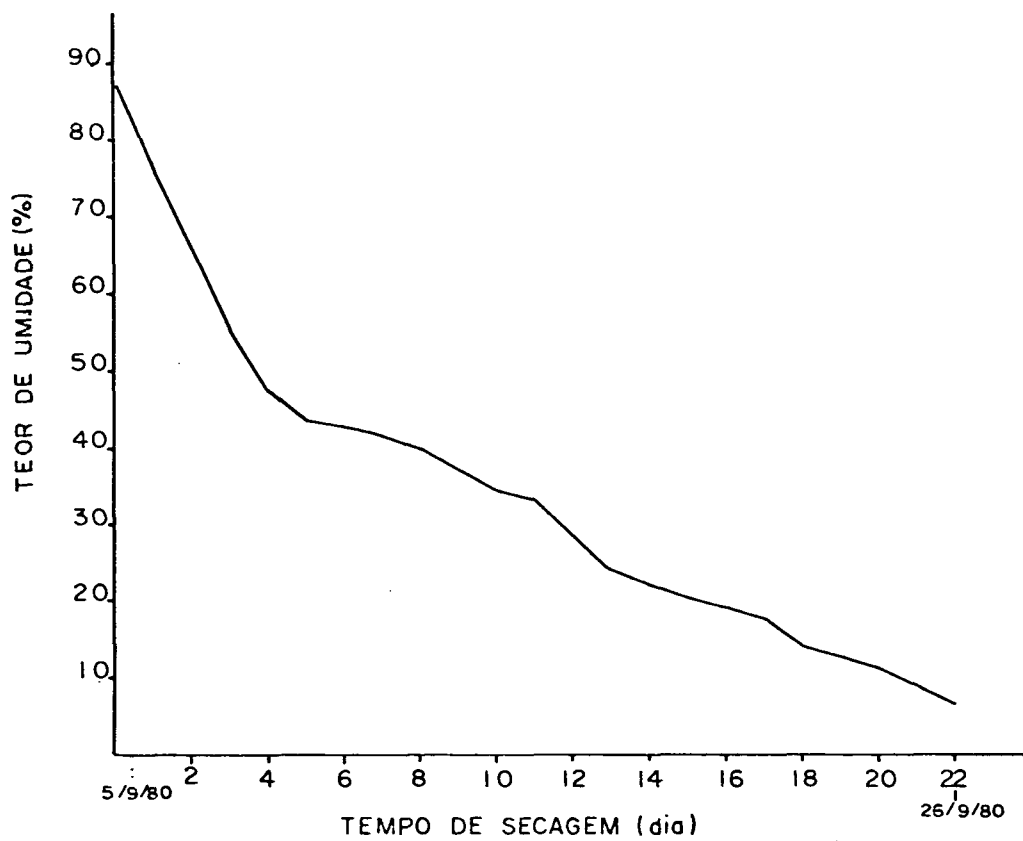


FIGURA 14: Curva de secagem do teste experimental realizado com uma carga mista de madeira.

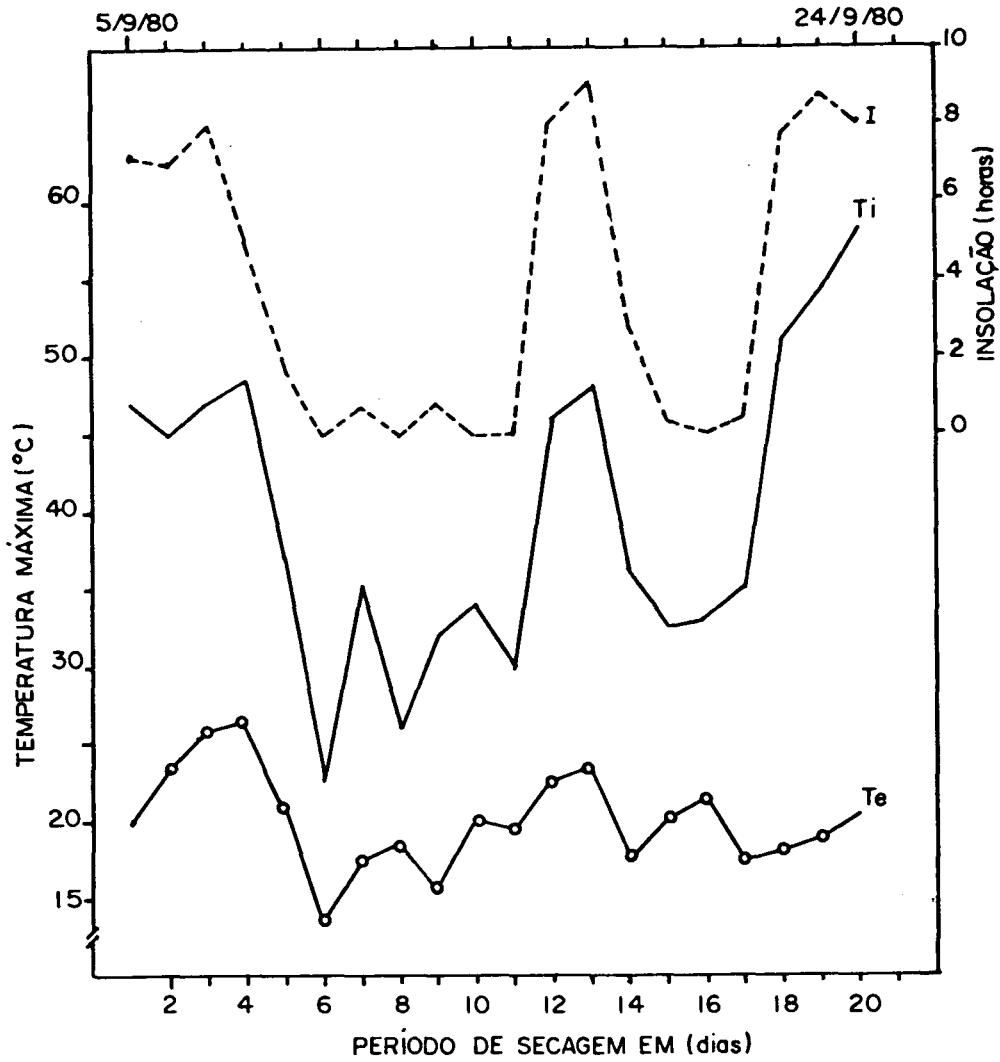


FIGURA 15: Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e da insolação (I) durante a secagem solar de uma carga mista de madeira.

máximo variou entre 18,0 e 24,0°C, e a temperatura interna máxima atingiu 59,0°C quando a externa foi 35,0°C.

No início da secagem, o Δt às 14 horas variou entre 9,5 e 27,0°C, ao passo que no final da secagem essa variação aumentou para 33,0 e 44,0°C. Estas oscilações também foram evidenciadas por BOIS³, que encontrou no início da secagem Δt variando entre 5,5 e 8,3°C e no final da secagem, entre 11,1 e 16,6°C. Estas diferenças de temperatura no início e final da secagem são devido ao efeito da umidade da madeira (GOUGH¹⁷), aspecto este que será discutido posteriormente.

A insolação diária média durante o período de secagem foi 4,3 horas, que é praticamente igual a média de 13 anos no mês de setembro (4,4 horas) para a região de Curitiba como mostra o Quadro 04. JOHNSON²⁵ acredita que no verão de Madison, Estados Unidos, a secagem em estufa solar necessita de aproximadamente 400 horas de insolação. Deve-se salientar contudo, que estas estimativas basearam-se em estudos preliminares conduzidos com uma estufa coberta com apenas uma camada de plástico e desprovida de qualquer sistema de isolamento. No presente teste preliminar, foram registradas 94,15 horas de brilho solar durante o período de secagem até o teor de umidade final de 7,0%, valor que corresponde a aproximadamente 1/4 daquele mencionado por JOHNSON²⁵.

A análise superficial da qualidade da madeira evidenciou que 65% das tábuas estavam isentas de qualquer tipo de defeito. Este índice relativamente alto de defeitos provavelmente foi provocado pela mistura de espécies com características bastante diferentes e de difícil secagem, como é o caso do *Prunus sellowii* que foi responsável pelo surgimento

to de grande quantidade de defeitos, particularmente colapso. Outros defeitos observados foram principalmente empenamentos e rachaduras de topo, porém sem depreciação substancial para a qualidade da madeira.

4.2. AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE SECAGEM

4.2.1. SECAGEM AO AR LIVRE

4.2.1.1. TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM

As três pilhas de madeira foram confeccionadas simultaneamente de modo a se sujeitarem as mesmas variações diárias dos fatores envolvidos no processo. A secagem iniciou dia 25 de outubro de 1980 e foi concluída a 22 de janeiro de 1981, correspondendo a um período de 90 dias.

Em dezembro, após 55 dias de secagem, a madeira alcançou um teor de umidade que pode ser considerado satisfatório porém permaneceu empilhada no pátio. A partir daí, a redução no teor de umidade da madeira tornou-se mínima em razão das frequentes precipitações, e conseqüentemente, das condições desfavoráveis de secagem.

Segundo AUBREVILLE¹, a despeito da altitude de Curitiba, a umidade atmosférica é bastante alta e o Índice Pluviométrico varia entre 1290 e 1880mm, sendo que a precipitação máxima ocorre em janeiro. AUBREVILLE¹ menciona também que a temperatura é bastante variável, com média anual entre 15 a 17°C, sendo que a máxima ocorre em janeiro-fevereiro e a mínima em junho. Informações adicionais acerca do clima regional podem ser obtidas através dos dados médios apresentados

na Figura 16 e no Quadro 17 do Apêndice 4.

O Quadro 03 mostra a variação do teor de umidade da madeira em duas épocas: após 55 e 90 dias de secagem. Observa-se que o teor de umidade da madeira foi suficientemente baixo após 55 dias de secagem, indicação de que o processo poderia ser interrompido já que a partir daí a diminuição foi praticamente insignificante. Entretanto, como o objetivo era secar a madeira até um teor de umidade mínimo possível, e não há evidências que permitam constatar este fato, o processo de secagem foi prolongado.

QUADRO 03: Variação do teor de umidade da madeira após 55 e 90 dias de secagem ao ar livre.

PILHA	TEOR DE UMIDADE (%)			
	TUi	TUa	TUb	TUc
A	92,17	19,0	17,5	15,6
B	75,83	19,2	18,0	15,4
C	70,33	18,5	17,0	16,4

TUi - teor de umidade inicial

TUa - teor de umidade médio das amostras após 55 dias

TUb - teor de umidade médio das amostras após 90 dias

TUc - teor de umidade médio de todas as tábuas, determinado com um medidor elétrico após 90 dias de secagem

Para efeito de comparação, avaliou-se no final da secagem o teor de umidade de cada tábua com o uso de um medidor elétrico. Os resultados mostram que o teor de umidade médio das repetições variou entre 15,4 e 16,4%, sendo que os valores máximo e mínimo foram 18,5 e 13,5% respectivamente. A di

ferença em teor de umidade existente entre os dois métodos de medição deve-se provavelmente à duas possíveis fontes de erro: erro de amostragem e erro de medição. A justificativa para o fato é que as tábuas utilizadas para a confecção das amostras de secagem são tomadas aleatoriamente, e o teor de umidade das mesmas na maioria das vezes não corresponde ao valor médio da pilha.

Entretanto, na região de Curitiba dificilmente a madeira atinge teor de umidade inferior aos encontrados, já que a umidade de equilíbrio média da madeira calculada em função das normais de temperatura e umidade relativa é de 16,7% (GALVÃO¹⁴). Os valores de umidade de equilíbrio média bem como as normais de temperatura e umidade relativa média para os 12 meses do ano, são mostrados na Figura 16. Pode-se verificar que, exceto para o mês de maio, a homogeneidade na umidade de equilíbrio durante todo o ano é bem evidente, e no período de estudo considerado, os fatores de secagem apresentaram uma variação muito pequena.

4.2.1.2. TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem, expressa como a percentagem de água evaporada por dia, no método ao ar livre é influenciada pelos fatores ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e circulação do ar. RESCH & ECKLUND⁴⁴ constataram que além desses fatores externos, deve-se considerar também a influência das propriedades físicas e estrutura anatômica da madeira. Como este processo é natural e depende fundamentalmente das condições ambientais, não é possível controlar os fatores que afetam a taxa de secagem. Por esta razão, foram

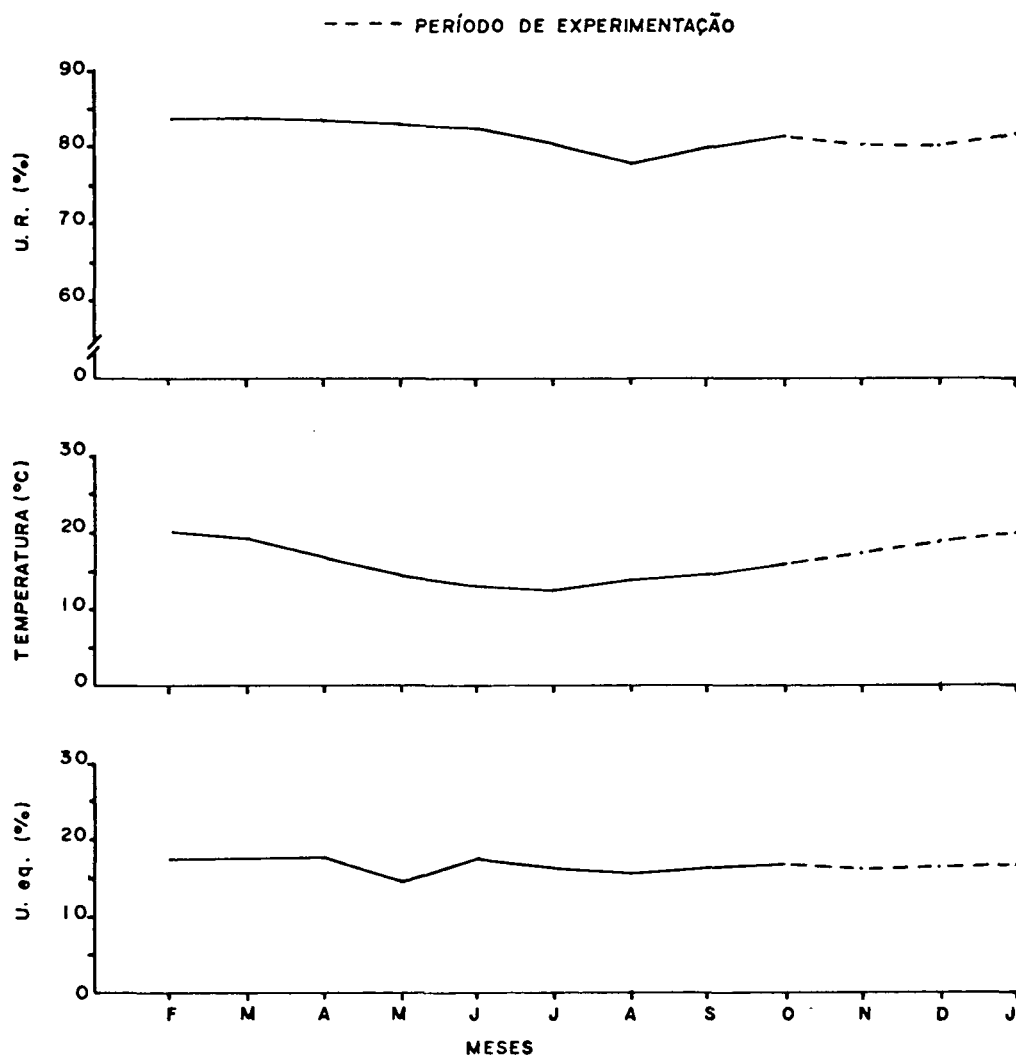


FIGURA 16: Variação média mensal da umidade de equilíbrio (Ueq), umidade relativa do ar (UR) e temperatura para a região de Curitiba (adaptado de GALVÃO¹⁴ e HOLZMANN & GUARITA²³).

observadas taxas de secagem positivas sob condições de secagem favoráveis, e taxas nulas e negativas nos períodos desfavoráveis devido precipitações ou altas umidades do ar.

As maiores taxas de secagem, como era esperado, foram evidenciadas nos primeiros estágios, quando o teor de umidade da madeira era elevado. A Figura 17 mostra graficamente que ocorreu uma queda acentuada da taxa de secagem média nas primeiras três semanas.

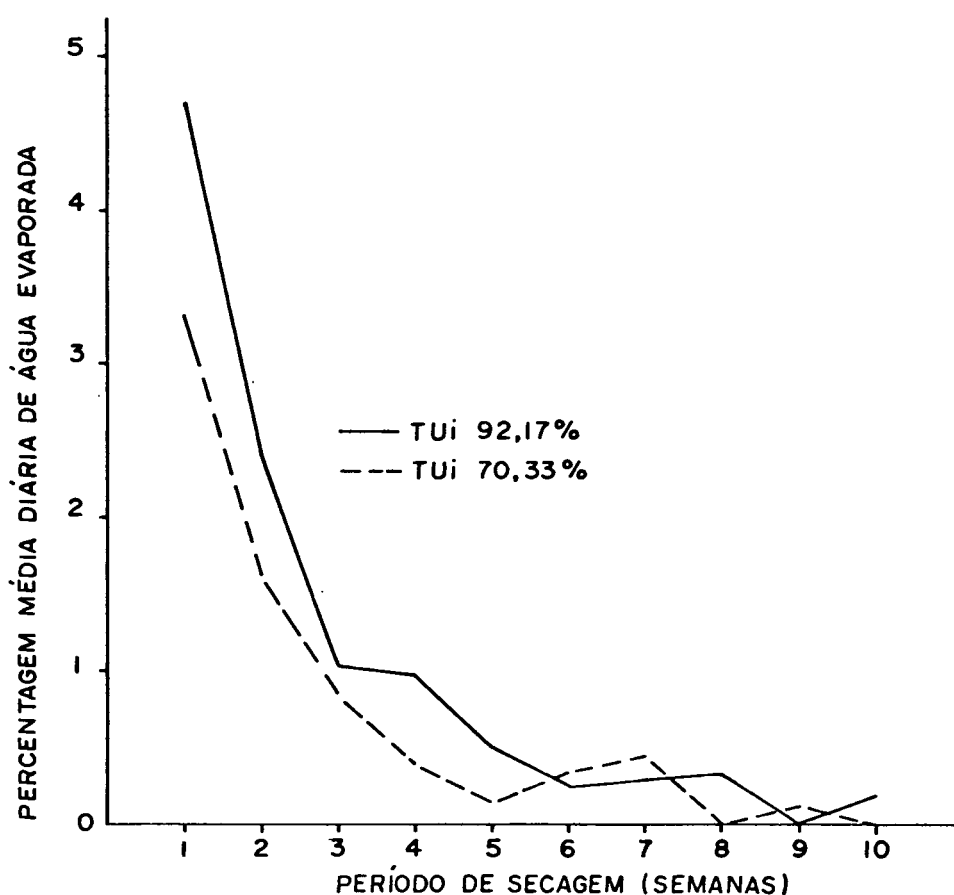


FIGURA 17: Taxa de secagem média de duas pilhas de madeira seca ao ar livre com diferentes teores de umidade inicial.

A influência do teor de umidade inicial da madeira, já discutida por vários pesquisadores, também pode ser evidenciada na Figura 17. A pilha de madeira com maior teor de umida

de inicial apresentou uma taxa de secagem média mais elevada nas primeiras semanas, ao passo que nas semanas subsequentes quando a madeira alcançou teores de umidade inferiores a 30%, a taxa de secagem média tornou-se muito pequena equilibrando-se com aquela da pilha de menor teor de umidade inicial.

4.2.1.3. CONTRAÇÃO DA MADEIRA

Verificou-se que a contração da madeira aumentou com o tempo de secagem, devido a redução do teor de umidade. Observou-se também que a contração ocorreu, embora em valores mínimos, desde as primeiras semanas de secagem, o que contraria as teorias mencionadas na literatura. KOLLMANN & CÔTÉ²⁸ e STAMM⁶⁵ atribuem este fato ao surgimento de um gradiente de umidade na madeira: a superfície das tábuas atingem valores abaixo do PSF e tendem a contrair-se antes que o teor de umidade médio da madeira alcance este ponto.

A curva típica que representa o desenvolvimento da contração com o tempo de secagem ao ar livre é mostrada na Figura 18. O aumento da contração só foi significativo abaixo do teor de umidade médio de 20%.

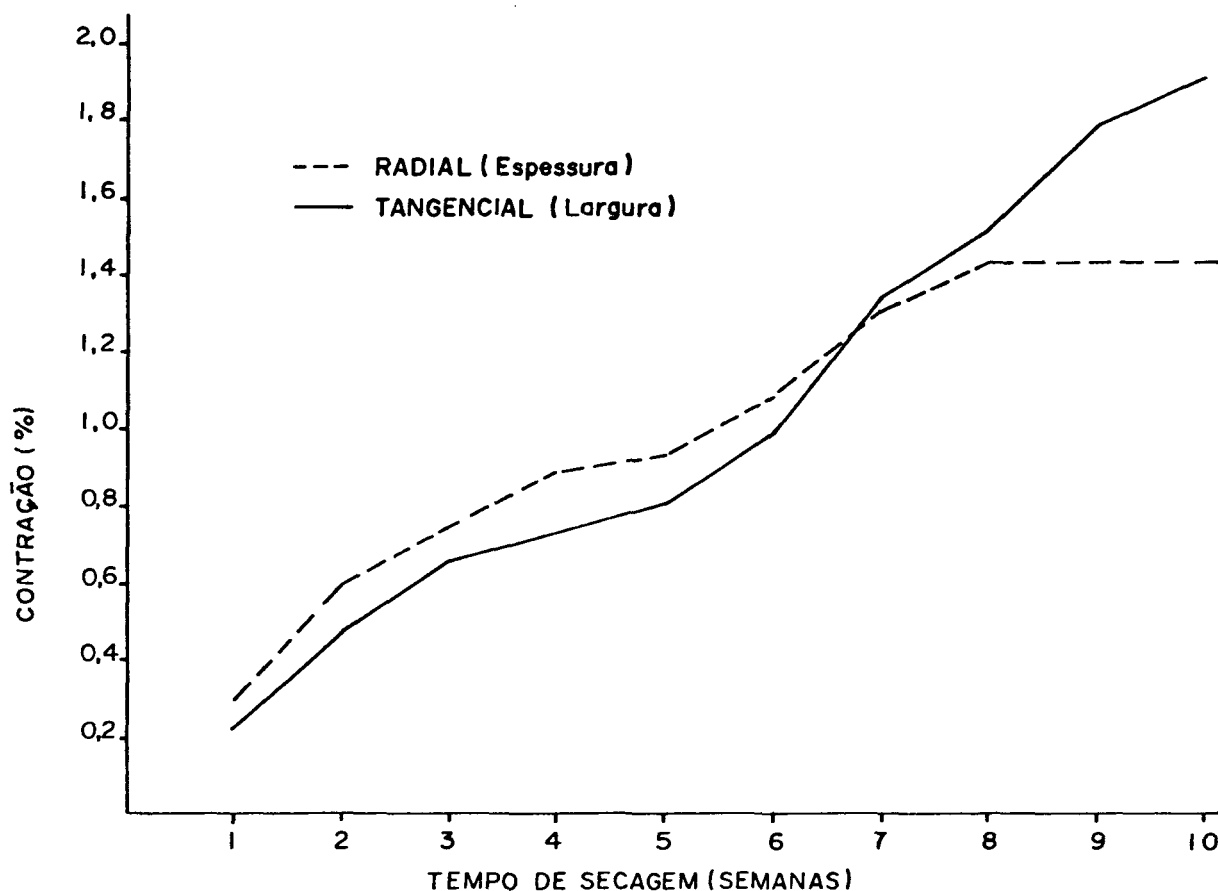


FIGURA 18: Contração média em espessura e largura (%) em função do tempo de secagem ao ar livre.

4.2.1.4. QUALIDADE DA MADEIRA SECADA

De uma maneira geral, a qualidade da madeira secada ao ar livre, considerando o seu aproveitamento final, não foi afetada significativamente devido provavelmente às suaves condições atmosféricas e ao alto teor de umidade final. Os defeitos de secagem observados foram rachaduras de topo e empenamentos. Rachaduras internas, colapso e mudança de coloração não foram detectados na madeira, e a presença de esforços internos foi evidenciada apenas nos extremos das tábuas. Uma análise mais detalhada e a quantificação dos defeitos de secagem ao ar livre será feita posteriormente.

4.2.2. SECAGEM SOLAR

4.2.2.1. INSOLAÇÃO, TEMPERATURA E UMIDADE

A variação da temperatura dentro da estufa solar foi influenciada principalmente pela insolação e pelo teor de umidade da madeira. A influência das horas de insolação na temperatura da estufa solar é mostrada na Figura 19, cujos valores correspondem ao período de secagem das três cargas de madeira. Observa-se que a medida que aumenta as horas de insolação, aumenta também a temperatura interna da estufa.

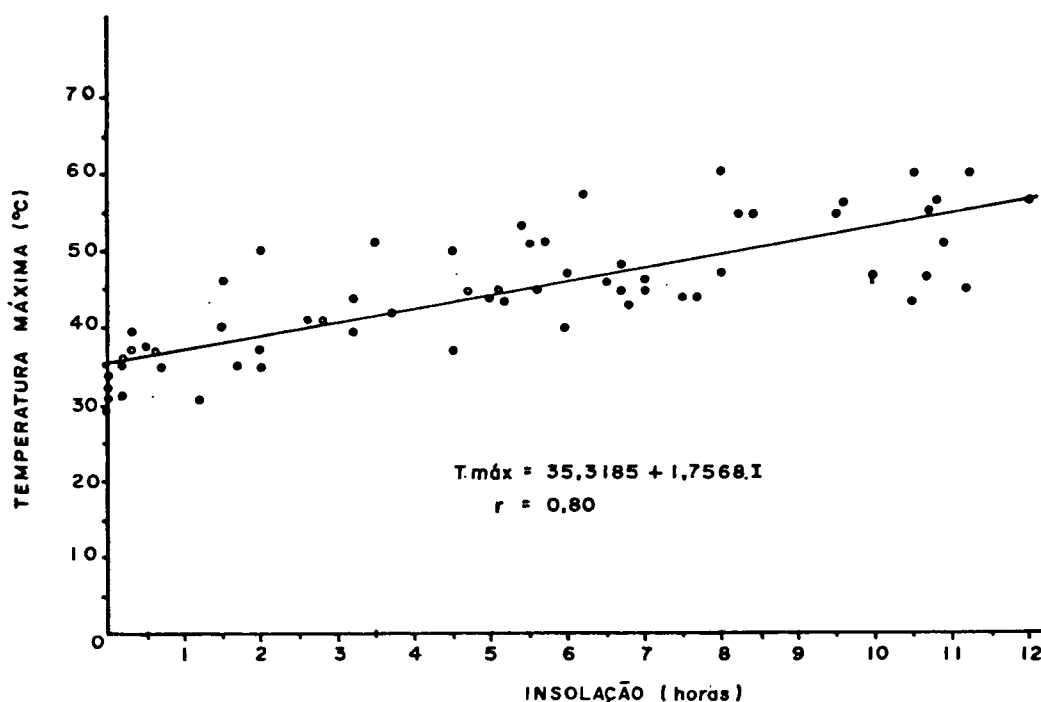


FIGURA 19: Influência da insolação (I) na temperatura (Tmáx) da estufa solar carregada.

O Coeficiente de Correlação encontrado entre a insolação e a temperatura interna ($r = 0,80$), em comparação com aquele estabelecido para a estufa solar vazia ($r = 0,94$), foi menor devido provavelmente a influência do teor de umidade

da madeira. No início da secagem, quando o teor de umidade da madeira é alto, o consumo de energia na forma de calor para evaporar esta água é relativamente grande, fato este que restringe o aumento da temperatura interna. O efeito de resfriamento exercido pela umidade da madeira também é considerado. Em contrapartida, a temperatura interna aumenta nas fases finais da secagem porque a saída da água de impregnação ocorre lentamente e a energia total consumida nestes estágios é menor. TROXELL & MUELLER⁶⁹, SHARMA et al.⁵⁴, GOUGH¹⁷ e BOIS³ também observaram este fato, embora nenhuma correlação tenha sido estabelecida entre a temperatura interna e o teor de umidade da madeira.

A correlação encontrada entre o teor de umidade da madeira e a temperatura interna da estufa solar é mostrada na Figura 20. Observa-se que a medida que diminui o teor de umidade da madeira, a temperatura interna aumenta. Nestes cálculos foram considerados apenas os dias de secagem com insolação superior a 8 horas, na tentativa de eliminar ou pelo menos minimizar a influência da mesma. Através do Coeficiente de Correlação observa-se que existe uma relação razoável entre as duas variáveis, ainda que a insolação diária tenha oscilado entre 8,0 e 11,2 horas.

Através da análise de correlação parcial, avaliou-se adicionalmente o efeito do teor de umidade da madeira sobre a correlação estabelecida entre a diferença de temperatura e a insolação. Foi encontrado para o teor de umidade uma correlação parcial igual a -0,64, e o teste de hipótese para o coeficiente correspondente a esta variável resultou significativo ao nível de 99% de probabilidade (Quadro 18, Apêndice 5).

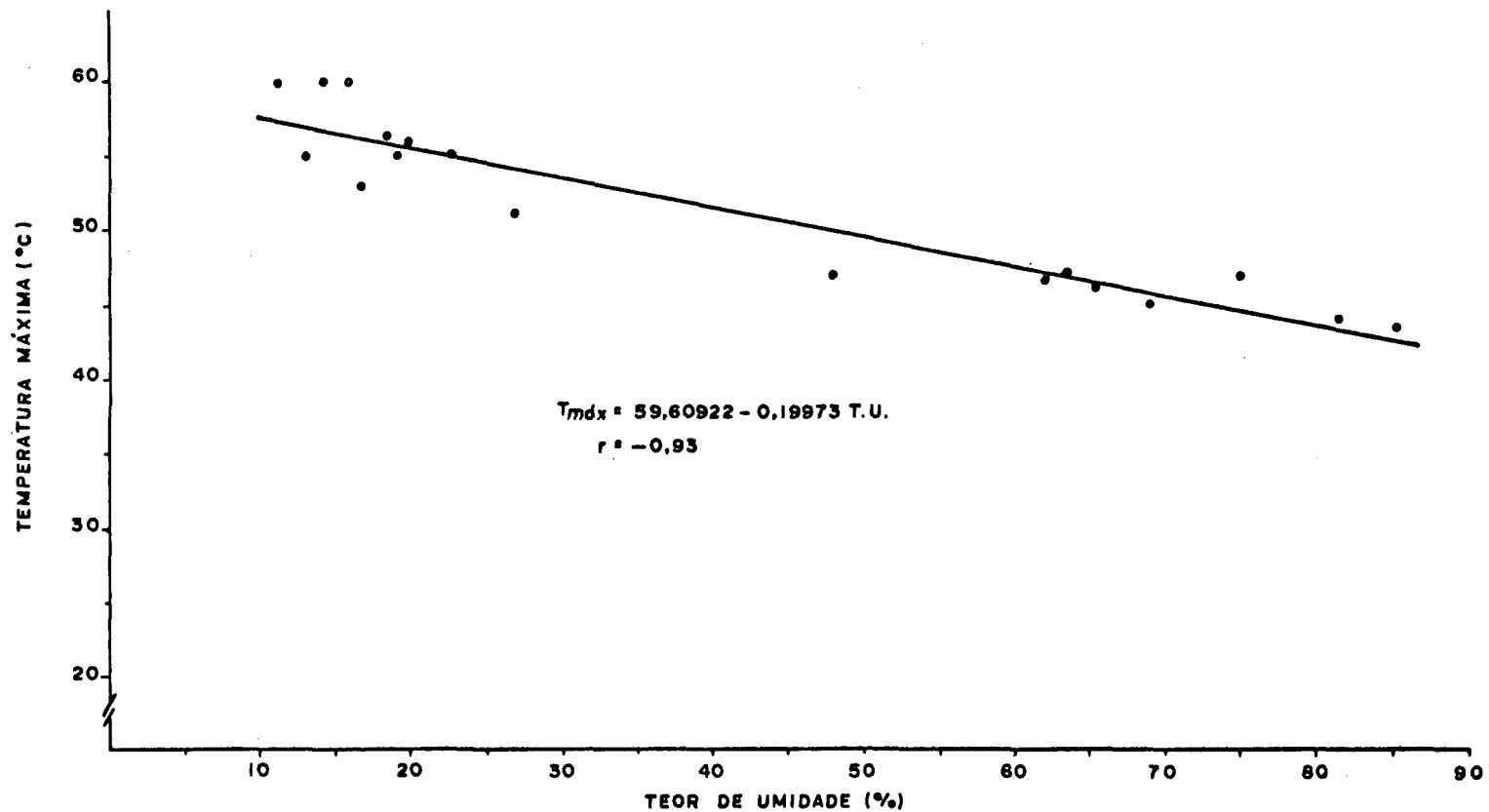


FIGURA 20: Efeito do teor de umidade da madeira (TU) na temperatura da estufa solar ($T_{máx}$), para os dias com insolação superior a 8 horas.

Pode-se observar no Quadro 18, que a adição do teor de umidade na relação das variáveis consideradas, provocou um aumento substancial do Coeficiente de Determinação e uma conseqüente diminuição do Erro Padrão da média. Isto significa que o teor de umidade da madeira tende a influenciar positivamente na diferença entre as temperaturas interna e externa da estufa solar.

A influência do teor de umidade da madeira na temperatura, umidade relativa e, conseqüentemente, na umidade de equilíbrio da estufa solar pode ser comprovada graficamente através da Figura 21. Observa-se que no intervalo entre 93 e 30% de umidade, as médias de temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio às 16 horas foram 39,3°C, 75,1% e 14,3% respectivamente, ao passo que entre os teores de umidade de 30 e 12% atingiram no mesmo período 48,7°C, 30,0% e 4,9% respectivamente. A configuração desses dados confirma mais uma vez que a medida que diminui o teor de umidade da madeira, a temperatura dentro da estufa solar aumenta sensivelmente enquanto que tanto a umidade relativa como a umidade de equilíbrio diminuem.

A maior temperatura observada durante o período de secagem solar foi 60°C, registrada nos estágios finais do processo. As Figuras 22, 23 e 24 mostram graficamente a temperatura máxima interna e externa bem como a insolação diária, verificadas durante a secagem das três cargas de madeira na estufa solar.

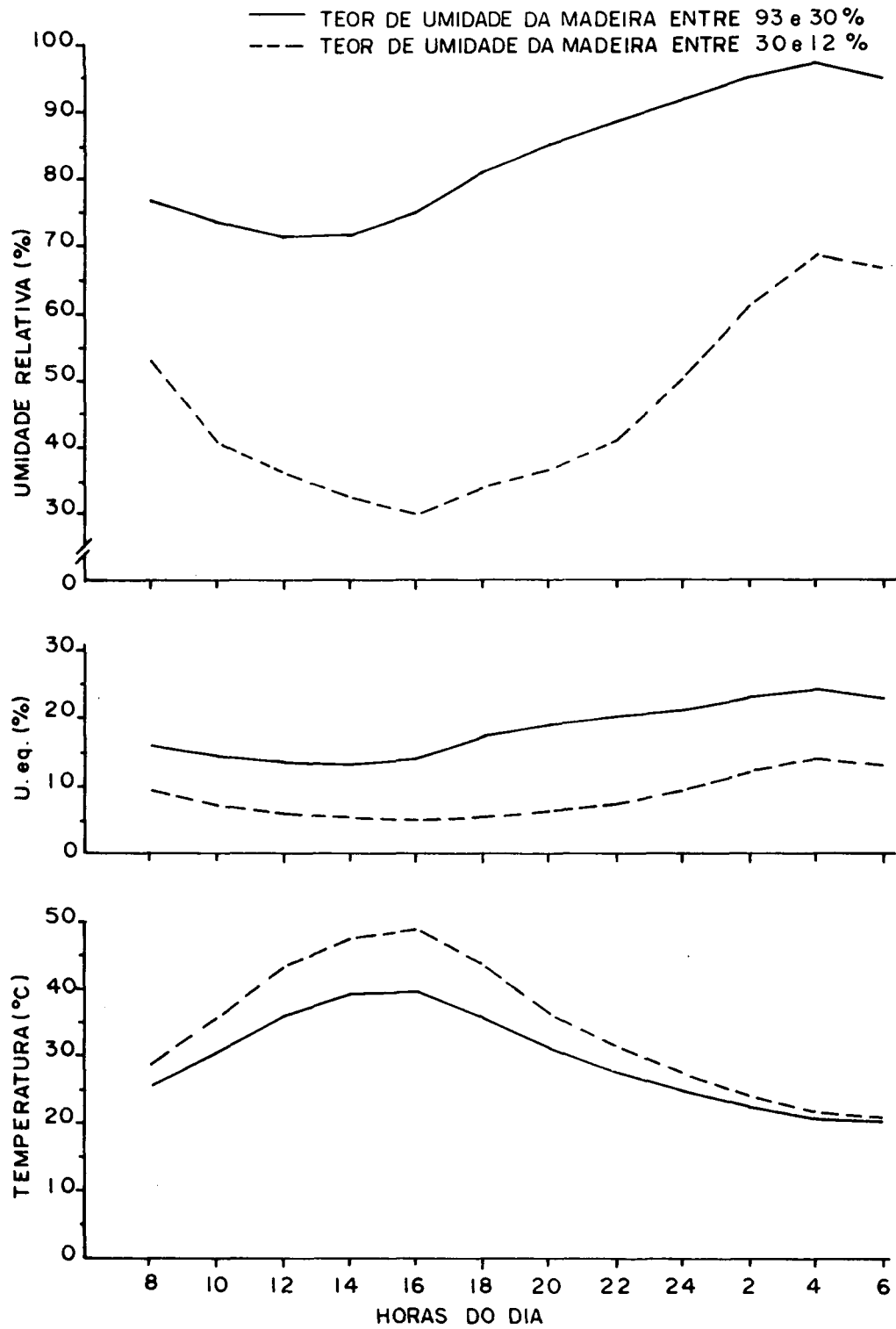


FIGURA 21: Variação das médias diárias de temperatura, umidade de equilíbrio e umidade relativa em dois estágios de secagem solar: 93 - 30% e 30 - 12% de teor de umidade.

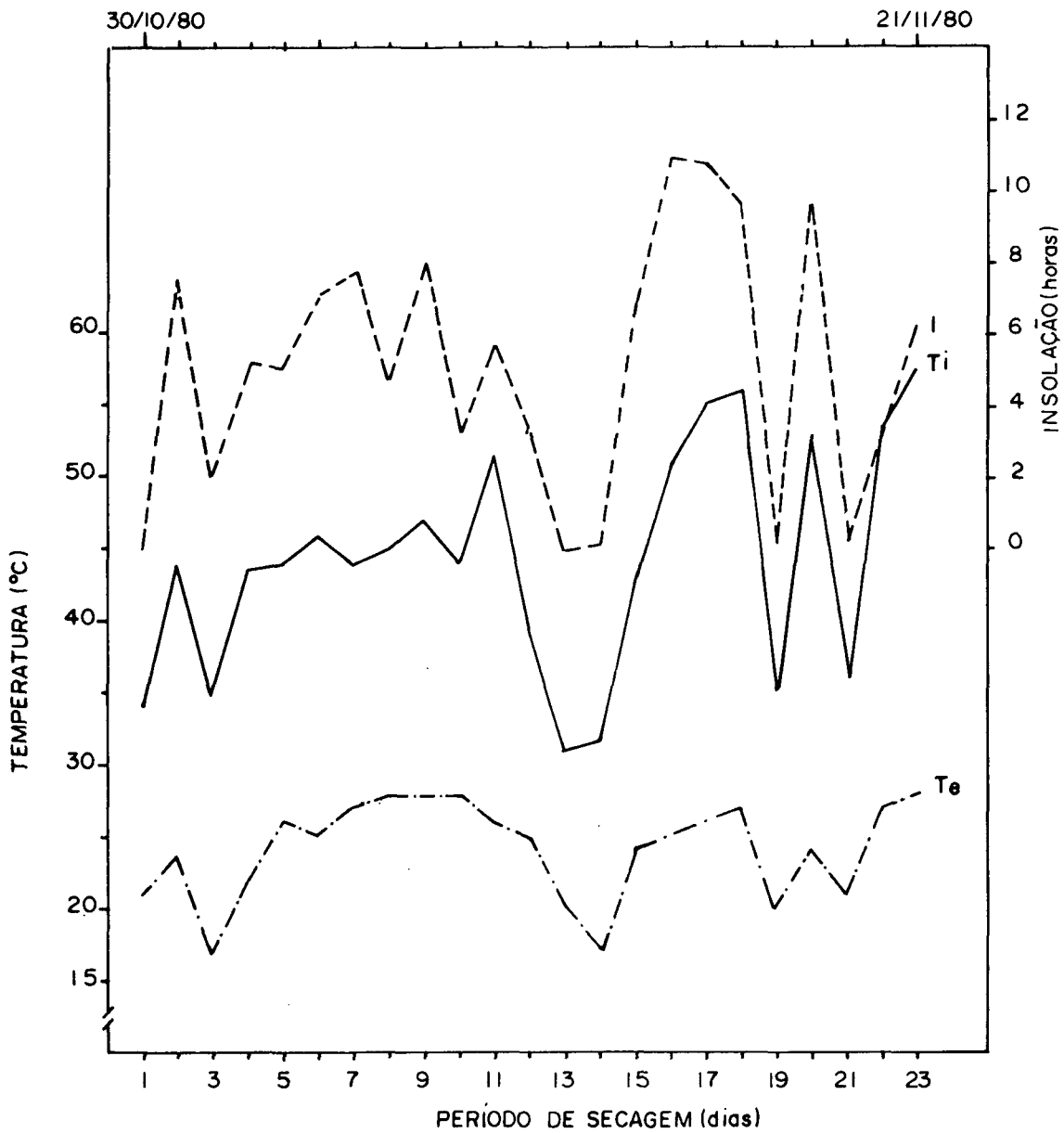


FIGURA 22: Oscilação da temperatura máxima interna (T_i) e externa (T_e), e insolação diária (I) durante o período de secagem solar (CARGA D).

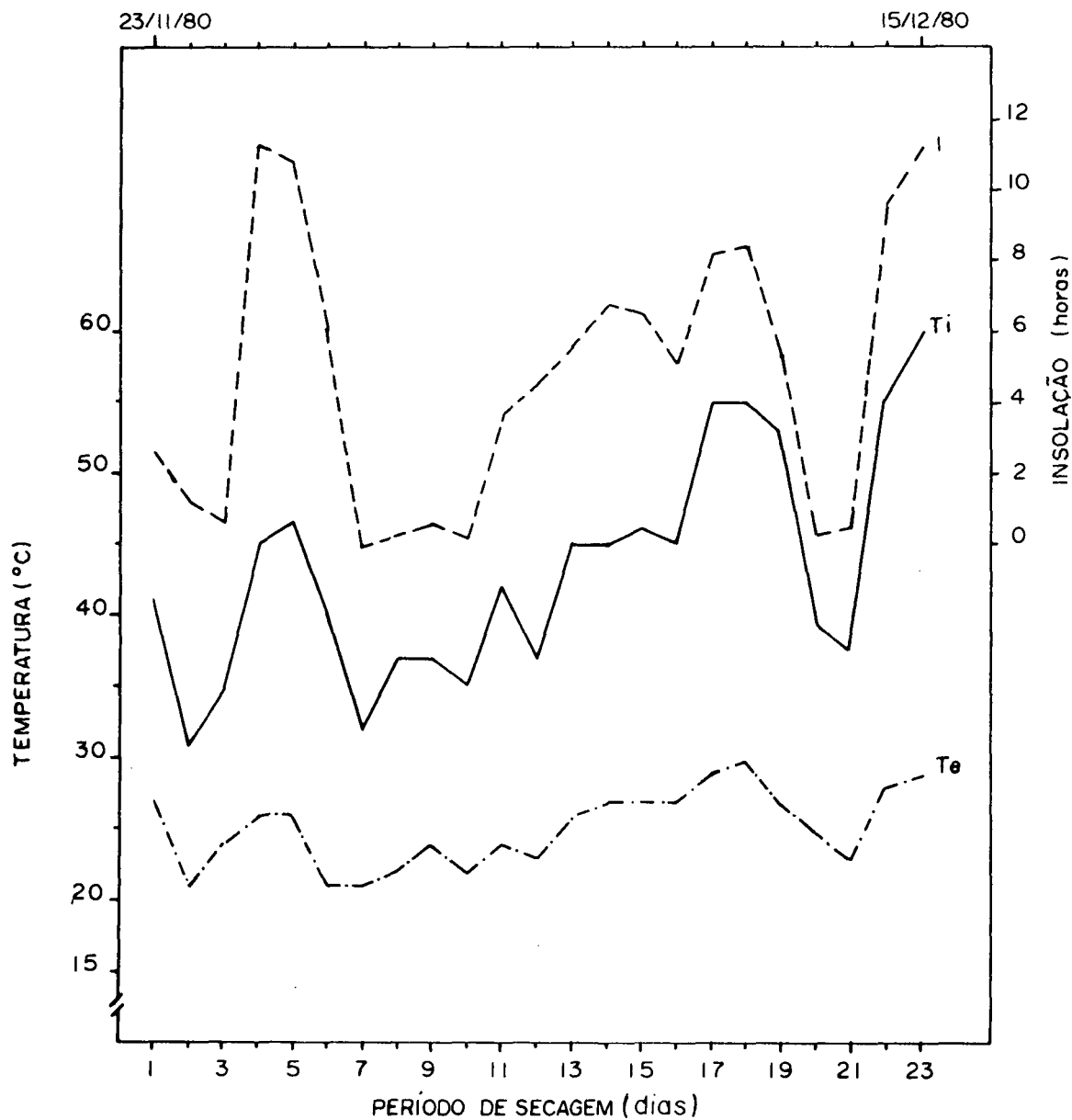


FIGURA 23: Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e insolação diária (I) durante o período de secagem solar (CARGA E).

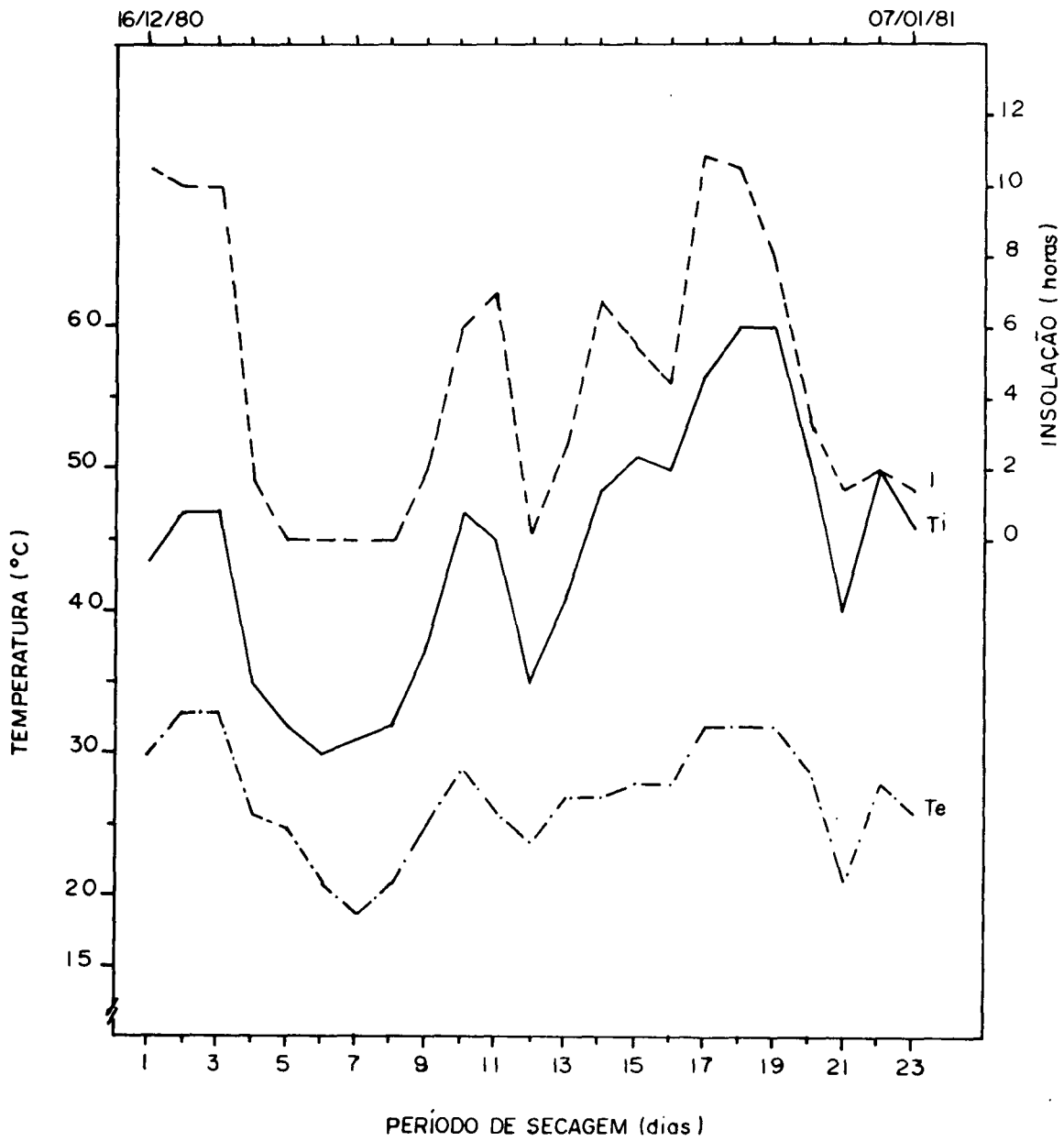


FIGURA 24: Oscilação da temperatura máxima interna (Ti) e externa (Te), e insolação diária (I) durante o período de secagem solar (CARGA F).

O valor médio diário da insolação calculado a partir dos dados coletados durante a execução deste experimento, foi 4,71 horas, que é praticamente igual a média de 13 anos (4,65 horas) para o mesmo período. Pode-se comprovar, analisando os valores do Quadro 04, que a insolação diária média para a região de Curitiba apresenta uma certa homogeneidade durante todo o ano, sendo que os limites médios máximo e mínimo são 5,4 e 4,1 horas respectivamente.

QUADRO 04: Média da insolação diária em horas, observada em Curitiba no período 1958/1970 (adaptado de GHISI¹⁵).

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,0	4,9	5,2	5,0	5,4	5,1	5,2	4,9	4,4	4,3	5,2	4,1

Outro fator climático que afeta a secagem solar é a radiação solar, isto é, a quantidade de calorías que chega à superfície terrestre por unidade de tempo, expressa geralmente em cal./cm² . minuto. Contudo, devido a indisponibilidade de dados, a radiação solar foi desconsiderada neste estudo.

A estufa solar acusou temperaturas superiores a 30°C durante aproximadamente 60% do período de secagem, que é o percentual correspondente ao tempo de funcionamento do ventilador termostaticamente controlado. Além disso, durante dois dias de secagem o ventilador funcionou ininterruptamente, o que equivale dizer que mesmo nos períodos noturnos, geralmente desfavoráveis, a estufa solar registrou temperaturas maiores do que 30°C.

4.2.2.2. TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM

A primeira das três cargas de madeira secadas na estufa solar foi instalada dia 30 de outubro de 1980. A medida que uma carga alcançava o teor de umidade final, era substituída por outra de maneira a permitir a continuidade do processo durante o período considerado.

As três repetições apresentaram teor de umidade inicial bastante semelhante como mostra o Quadro 05. Estes valores foram calculados através das amostras de secagem, as quais permitiram também o controle do processo.

QUADRO 05: Teor de umidade e tempo de secagem das três repetições na estufa solar.

CARGA	TEOR DE UMIDADE (%)			TEMPO DE SECAGEM - dias -
	TUi	TUa	TUm	
D	93,6	12,0	10,4	23,0
E	90,0	12,0	11,5	22,5
F	96,6	12,0	9,5	23,0

TUi - teor de umidade inicial

TUa - teor de umidade final médio das amostras

TUm - teor de umidade final médio de todas as tábuas, determinado com um medidor elétrico.

O teor de umidade final médio de todas as tábuas, medido com o medidor elétrico, acusou uma diferença máxima de 2,0% de umidade entre as três repetições como evidencia o Quadro 05. O teor de umidade da tábua mais seca e mais úmida

foi 8,0 e 18,0% respectivamente, enquanto que a maior diferença encontrada entre os dois métodos de medição foi 2,5% de umidade.

A grande diferença de umidade detectada entre as tábuas mais úmidas e mais secas, deve-se provavelmente ao teor de umidade inicial diferente, a variação da umidade de equilíbrio dentro da estufa e também a falta de um processo de igualização no final da secagem. A literatura consultada não faz referência ao uso de medidores elétricos como um meio comparativo do teor de umidade das tábuas, porém CHUDNOFF et al.¹⁰ encontraram após o acondicionamento, uma diferença de apenas 2% de umidade entre as amostras de secagem. A diferença existente entre os dois métodos de medição mostrada no Quadro 05 pode ser atribuída, como anteriormente mencionado, a possíveis erros de amostragem e de medição.

O tempo dispendido na secagem solar foi praticamente o mesmo para as três repetições, possivelmente porque a quantidade de água perdida pela madeira e as horas de insolação registradas em cada período foram aproximadamente iguais. Por esta razão, pode-se afirmar que na região de Curitiba, entre os meses de novembro e janeiro, são necessárias aproximadamente três semanas para secar uma carga de madeira de canela preta com 25mm de espessura até o teor de umidade final de 12%. Por outro lado, durante os testes realizados em setembro com a estufa solar carregada, observou-se que o tempo de secagem foi um pouco menor. A razão dessa diferença, provavelmente, está relacionada com a inclinação do teto, cujo ângulo com a horizontal (25°) foi estabelecido para a época em questão.

O tempo de secagem encontrado neste estudo, com raras exceções, difere significativamente daqueles evidenciados em outras pesquisas conduzidos com material de mesma dimensão, como mostra o quadro 06. Observa-se que um dos testes conduzidos por YANG⁷⁹ levou apenas um dia de secagem a mais, em relação ao estudo de Curitiba com teor de umidade corrigido, por ter sido realizado no verão e com material de conífera. Em comparação com o experimento realizado na Austrália por READ et al.⁴³, encontrou-se uma diferença entre os tempos de secagem igual a zero, ou seja, o teor de umidade da madeira em Curitiba, levou 20 dias para cair de 88 para 16%. Contudo, tanto a estufa de Ontário como a de Griffith são dotadas de um sistema de armazenamento de energia solar, o que as torna mais eficiente porém onerosas.

Através de uma simples avaliação do Quadro 06, mesmo considerando a grande heterogeneidade existente entre os locais de estudo e espécies utilizadas, observa-se que a diferença no tempo de secagem em favor desta pesquisa é bem marcante, evidenciando a eficiência da estufa solar para o período de estudo considerado.

4.2.2.3. TAXA DE SECAGEM

As maiores taxas de secagem ocorreram no início da secagem, sendo registrado um valor médio de 8,5% no primeiro dia. Porém, este valor diminuiu acentuadamente a medida que o processo progrediu, e após uma semana de secagem encontrou-se uma taxa média de 4,0% por dia.

No decorrer da secagem é muito frequente a ocorrência de variações na taxa de secagem devido a falta de luz solar, e este fato contribui decisivamente para o aumento do tempo

QUADRO 06: Comparação quanto ao tempo de secagem aproximado, entre o experimento de Curitiba e alguns estudos conduzidos em outras partes do mundo.

AUTOR(ES) DA PESQUISA	LOCAL	TUi %	TUf %	Ts dias	÷ça dias
SANTINI	CURITIBA	93,6	12,0	23	-
SIMPSON & TSCHERNITZ ⁵⁸	MADISON	84,0	9,0	54	+ 30
YANG ⁷⁹	ONTÁRIO	60,0	19,0	12*	+ 1
YANG ⁷⁹	ONTÁRIO	60,0	19,0	100**	+ 89
READ et al. ⁴³	GRIFFITH	88,0	16,0	20	0
LUMLEY & CHOONG ³⁰	LOUSIANA	51,0	15,0	18	+ 6
OLIVEIRA ³⁷	VIRGINIA	79,5	6,1	125**	+ 99
VITAL ⁷³	VIÇOSA	55,6	16,0	21	+ 8
BOIS ³	MADISON	60,0	6,0	52	+ 31
PECK ³⁸	MADISON	76,0	20,0	33	+ 18
MALDONADO ³¹	PORTO RICO	50,0	12,0	23	+ 8
CASIN et al. ⁸	FILIPINAS	55,5	12,9	37	+ 22
GOUGH ¹⁷	AUSTRALIA	33,0	12,5	32	+ 23
SHARMA et al. ⁵⁴	DEHRA DUN	80,0	13,0	32	+ 11

TUi - teor de umidade inicial

TUf - teor de umidade final

Ts - tempo de secagem

÷ça - diferença entre o tempo de secagem das pesquisas citadas e o tempo de secagem da estufa solar de Curitiba, corrigido para o mesmo teor de umidade inicial e final

* - secagem de conífera no verão

** - secagem no inverno

de secagem. O efeito do teor de umidade da madeira, já discutido por outros pesquisadores, também foi evidenciado na secagem solar. A umidade é evaporada mais lentamente abaixo do PSF, pois a água de impregnação está retida mais fortemente. Neste estágio, as cargas de madeira perderam em média 1,0% de umidade por dia e o valor mínimo atingido foi 0,5%. Estas variações na taxa de secagem observadas durante o experimento não foram influenciadas pelas aberturas de ventilação, já que as mesmas permaneceram abertas apenas 2,0cm durante toda a pesquisa.

4.2.2.4. CONTRAÇÃO DA MADEIRA

Observou-se que a contração em largura (tangencial) foi sempre maior do que em espessura (radial), sendo que os valores máximos encontrados oscilaram entre 2,2 e 2,5% em espessura e entre 3,5 e 4,1% em largura, ao teor de umidade de 12%. Entretanto, como é possível secar a madeira em estufa solar até o teor de umidade de 6 a 8% (PLUMPTRE⁴⁰), a contração da madeira neste processo pode atingir valores mais elevados do que os obtidos. Por outro lado, não tem sido encontrado na literatura referências sobre a contração da madeira durante a secagem solar.

A medida que diminuiu o teor de umidade da madeira, verificou-se que as contrações em espessura e largura aumentaram proporcionalmente, de maneira que a diferença entre ambas manteve-se praticamente igual no intervalo de 50 a 12% de umidade. Esta proporcionalidade de contração entre a largura e a espessura, provavelmente contribuiu para a minimização de empenamentos na madeira.

4.2.2.5. QUALIDADE DA MADEIRA SECADA

De um modo geral, os defeitos observados na madeira por ocasião da secagem solar não afetaram significativamente a sua qualidade. Apesar de terem surgido algumas rachaduras de topo, o defeito mais frequente foi enpenamentos.

A grande maioria das pesquisas conduzidas em estufa solar destacam a qualidade da madeira resultante da secagem. PLUMPTRE⁴⁰ acredita que o baixo Índice de defeitos na secagem solar deve-se ao condicionamento natural que a madeira sofre diariamente durante o período noturno, devido à mudanças nas condições de secagem. Por outro lado, já foi mencionado neste estudo que os valores críticos de temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio ocorrem nos estágios finais da secagem, o que contribui para o aparecimento de determinados defeitos na madeira.

Dentre os tipos de defeitos, o empeno torcido ocorreu mais frequentemente, o qual se manifesta devido a diferença entre as contrações transversais e a longitudinal (CECH & PFAFF⁹). Além disso, a presença de grã espiralada poderá contribuir para o aumento deste tipo de defeito.

Os defeitos provocados pela secagem solar serão analisados e quantificados com mais detalhe posteriormente.

4.2.3. SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

4.2.3.1. PROGRAMA DE SECAGEM

O programa de secagem empregado neste estudo, foi definido com base em alguns testes preliminares realizados com a mesma espécie, e os valores combinados de temperatura, po

tencial de secagem e umidade de equilíbrio da madeira mais a a dequados neste caso, foram aqueles mostrados no Quadro 01 (Materiais e Métodos).

Mesmo que tenha sido considerado o tempo de secagem e a qualidade do produto final na sua elaboração, o programa de secagem em questão não é necessariamente o ideal para secar comercialmente madeiras de *Ocotea catharinensis* de 25mm de espessura. Modificações na temperatura, como o uso de valores variáveis, e no potencial de secagem podem ser realizados sem afetar significativamente o tempo e a qualidade do material.

Deve-se salientar ainda, que para efeito de comparação com a secagem solar, na elaboração do programa objetivou-se a minimização do tempo de secagem em estufa convencional.

4.2.3.2. TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM

A madeira secada em estufa convencional pode alcançar teores de umidade bem inferiores a 12%, já que os fatores que afetam o processo são perfeitamente controlados. Contudo, para efeito de comparação com os outros métodos, as três cargas de madeira foram secadas apenas até esta percentagem de umidade, após o que sofreram um condicionamento.

O tempo de condicionamento, aplicado para aliviar as tensões internas da madeira, varia principalmente de acordo com a espécie de madeira, espessura e grau de severidade dos esforços de secagem, e segundo WRIGHT⁷⁸ são necessárias entre 18 a 24 horas. Neste estudo contudo, embora insuficiente, a-

plicou-se um tratamento durante apenas 4 horas para que o mesmo não influísse na comparação da qualidade da madeira com os demais métodos.

O teor de umidade inicial médio foi semelhante entre as repetições, ao passo que o teor de umidade final médio de terminado através das amostras de secagem foi praticamente igual, como mostra o Quadro 07.

QUADRO 07: Teor de umidade e tempo de secagem das três repetições na estufa convencional.

CARGA	TEOR DE UMIDADE (%)			TEMPO DE SECAGEM - h -
	TUi	TUa	TUm	
G	86,5	12,0	10,0	167
H	83,3	11,9	10,9	164
I	88,2	12,1	11,0	170

TUi - teor de umidade inicial

TUa - teor de umidade final médio das amostras

TUm - teor de umidade final médio de todas as tábuas, determinado com um medidor elétrico.

O teor de umidade final de cada tábua medido com o medidor elétrico acusou através das médias uma diferença máxima de 1,0% entre as repetições, e os valores das tábuas mais seca e mais úmida foi 7,0 e 15,0% respectivamente.

Comparando os dois métodos de medição, a maior diferença encontrada entre as suas médias foi 2,0% de umidade, como evidencia o Quadro 07, a qual pode ser atribuída a erros

de amostragem e medição.

A diferença de teor de umidade encontrada entre as tábuas mais seca e mais úmida, deve-se provavelmente a teores de umidade inicial diferentes, curto tempo de acondicionamento, ocorrência de bolsas d'água, etc.

O tempo de secagem das três cargas de madeira, apesar de não ser o mesmo, foi bastante semelhante, sendo detectada uma diferença máxima de 6 horas entre as repetições. Como bem evidencia o Quadro 07, o tempo de secagem parece estar relacionado com o teor de umidade inicial, pois as cargas que apresentavam um valor mais elevado levaram relativamente mais tempo para atingir o teor de umidade desejado.

Pode-se afirmar contudo, que o tempo de secagem em estufa convencional depende fundamentalmente do programa a ser utilizado, uma vez que neste são considerados todos os parâmetros inerentes a madeira e ao ambiente de secagem. A partir dos resultados obtidos neste estudo, pode-se deduzir também que usando o mesmo programa de secagem e uma estufa de características semelhantes, é necessário aproximadamente uma semana para secar uma carga de *Ocotea catharinensis* de 25mm de espessura desde verde até o teor de umidade de 12%.

4.2.3.3. TAXA DE SECAGEM

A percentagem de água evaporada por dia na estufa convencional é afetada tanto pelos fatores inerentes à própria madeira como por aqueles relacionados com o ambiente de secagem. Todavia, o teor de umidade e a umidade de equilíbrio da madeira foram sem dúvida os fatores mais influentes na taxa de secagem. Uma variação típica da taxa de secagem média em

função destes dois fatores é mostrada no Quadro 08.

QUADRO 08: Relação entre taxa de secagem, teor de umidade, e umidade de equilíbrio da madeira durante a secagem convencional.

INTERVALO DE UMIDADE - % -	TAXA DE SECAGEM - %/dia-	UMIDADE DE EQUILÍBRIO - % -
até 50	17,5	17,0
50 - 40	14,1	13,0
40 - 30	12,0	10,0
30 - 25	9,0	8,0
25 - 20	7,1	6,5
20 - 15	5,2	5,0
15 - 12	3,1	4,0

Observa-se que no intervalo até 50% de umidade, em que a umidade de equilíbrio foi mantida a 17%, a madeira perdeu 17,5% de umidade por dia, e nos intervalos seguintes este valor diminuiu gradativamente até o final da secagem. A diminuição da taxa de secagem foi aproximadamente linear em função do teor de umidade da madeira em razão de ter sido empregado um potencial de secagem constante, ou seja, porque a umidade de equilíbrio e o teor de umidade da madeira sofreram uma redução simultânea.

As maiores taxas, como era esperado, ocorreram no início da secagem. Os valores médios registrados no primeiro e último dia de secagem foram respectivamente 19,5 e 2,8%.

4.2.3.4. CONTRAÇÃO DA MADEIRA

Observou-se um aumento da contração tanto em largura como em espessura aproximadamente linear no decorrer da secagem até o teor de umidade de 12%, e os valores encontrados nas três repetições oscilaram entre 2,49 a 2,58% em espessura (radial) e entre 3,50 a 3,66% em largura (tangencial). Deve-se considerar contudo, que estes valores aumentam a medida que o teor de umidade da madeira decresce abaixo de 12%. Em estudos realizados com a espécie em questão a 0% de umidade, a contração radial e tangencial média encontrada foi 4,3 e 7,7% respectivamente (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ⁷¹).

O efeito da temperatura de secagem na contração das diferentes direções da madeira deve ser considerado. HANN¹⁹ evidenciou que na secagem a altas temperaturas, a contração da madeira é governada pelo formato do corpo de prova e não pelo eixo anatômico considerado. Estudos posteriores confirmam que acima de 90°C a contração em espessura (radial) é sempre maior do que em largura (tangencial) (SANTINI⁴⁸).

Após o período de acondicionamento, verificou-se uma pequena redução da contração nas duas direções estudadas. Este inchamento é esperado devido ao aumento da umidade de equilíbrio da madeira e da umidade relativa. Contudo, CUEVAS¹¹ detectou um leve aumento na contração radial após o acondicionamento e atribuiu este fato a esforços e deformações das paredes celulares devido ao efeito térmico do tratamento (100°C).

4.2.3.5. QUALIDADE DA MADEIRA SECADA

Na secagem em estufa convencional foram evidenciados os mesmos tipos de defeitos encontrados nos outros dois métodos. Aparentemente, os diferentes tipos de empenos ocorreram com mais frequência do que as rachaduras de topo, provavelmente em função da temperatura usada. Segundo McMILLEN & WENGERT³³ o emprego de temperaturas iniciais acima de 46°C pode produzir empenamentos acima do normal em razão do surgimento de uma compressão residual no interior da madeira.

Além de ocorrer mais raramente, o número de rachaduras por peça foi relativamente pequeno, sendo observado geralmente uma ou no máximo duas em cada tábua, o que possibilita ainda um bom aproveitamento da madeira.

Outros defeitos como colapso, rachaduras internas e superficiais, e descoloração não foram observadas na madeira, e os defeitos encontrados não afetaram significativamente a qualidade, possibilitando, com raras exceções, um aproveitamento quase que total das peças.

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SECAGEM

4.3.1. TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM

Na região de Curitiba, no período compreendido entre os meses de setembro e janeiro, madeira de canela preta de 25mm de espessura pode ser secada satisfatoriamente na estufa solar até o teor de umidade de 12% ou menos.

Analisando os dados do Quadro 04, observa-se que além da estreita variação da insolação diária durante o ano, as

menores médias encontram-se justamente no período mencionado. Como a insolação ao lado da radiação solar é considerada o fator mais importante (Troxell & Mueller⁶⁹), espera-se condições de secagem solar mais favoráveis ainda, ou pelo menos semelhantes, nos demais meses do ano.

Já o teor de umidade da madeira seca ao ar livre nunca foi inferior a 17%, o qual não é baixo o suficiente para a grande maioria dos empregos industriais onde se inclui a indústria moveleira. Como a umidade de equilíbrio média na região de Curitiba é relativamente alta, não foi possível comparar o tempo de secagem dos dois métodos, apesar da notável vantagem da secagem solar.

Através das curvas de secagem de cada repetição, estabeleceu-se um termo comparativo entre os dois métodos de secagem ao teor de umidade de 20%. Projetando o teor de umidade das ordenadas no eixo das abscissas, encontrou-se o tempo de secagem das repetições e calculou-se o valor médio para cada tratamento, os quais são apresentados no Quadro 09. Verificou-se através dos valores médios, que o tempo despendido pela secagem solar para alcançar 20% de umidade corresponde a aproximadamente 35% daquele requerido pela secagem ao ar livre. Este percentual, apesar das notáveis diferenças no que tange a clima e características da estufa, é bem inferior aos 60% encontrado por Peck³⁸ e situa-se dentro do intervalo de 30 a 40% detectado por Casin et al.⁸ para madeira de 25mm de espessura.

A comparação estabelecida entre os métodos de secagem a 20% de umidade contudo, não proporciona informações precisas acerca do tempo de secagem devido basicamente dois aspectos

tos. De um lado, a madeira ainda não se encontra suficientemente seca para a maioria das suas aplicações, e por outro lado, abaixo deste valor a água evapora muito mais rapidamente na estufa solar do que ao ar livre.

QUADRO 09: Tempo de secagem ao ar livre e na estufa solar até o teor de umidade de 20%.

MÉTODO	REPETIÇÃO	TEMPO DE SECAGEM - dias -	TEMPO MÉDIO - dias -
AR LIVRE	A	51,0	
	B	53,0	50,0
	C	46,0	
	D	17,9	
SOLAR	E	17,7	17,4
	F	16,6	

Em consequência desse fato, quanto menor for o valor do teor de umidade da madeira usado para comparação, maior é a diferença de tempo entre a secagem ao ar livre e solar, como mostra o Quadro 10. Estudos conduzidos com materiais de diferentes espessuras, evidenciaram a possibilidade de alcançar na estufa solar o teor de umidade de 15%, na metade ou quarta parte do tempo requerido pela secagem ao ar livre (CHUDNOFF et al.¹⁰).

O Quadro 10 evidencia também que o tempo de secagem solar nos diferentes intervalos de umidade, foi sempre menor ou no máximo igual aquele encontrado para a secagem ao ar li

QUADRO 10: Tempo de secagem ao ar livre, solar e convencional nos diferentes intervalos de umidade da madeira.

MÉTODO	REP.	TEMPO DE SECAGEM EM DIAS						
		Até 50%	50-40	40-30	30-25	25-20	20-15	15-12
AR LIVRE	A	11	5	10	7	18	-	-
	B	11	6	10	16	10	-	-
	C	9	4	8	6	19	-	-
SOLAR	D	9	2	4	1	2	3	2
	E	9	4	2	1	2	3	1,5
	F	9	2	3	1	1,5	2,5	4
CONVENCIONAL	G	50	17	20	14	16	23	23
	H	44	17	23	13	15	24	24
	I	54	16	21	15	17	25	22

vre. Esta observação não coaduna com a informação de que o tempo de secagem nos dois métodos são praticamente iguais até o teor de umidade de 30% aproximadamente (PLUMPTRE³⁹, TROXELL & MUELLER⁶⁹, SCHNEIDER & WAGNER⁵⁰). Entretanto, deve-se considerar que todos os parâmetros envolvidos no processo de secagem variam de acordo com a localização geográfica, no caso do clima, e também com as características de construção e funcionamento da estufa solar, os quais devem ser considerados quando se compara estudos conduzidos em diferentes partes do mundo.

A secagem solar evidentemente não é tão rápida quanto a secagem em estufa convencional. Verificou-se através do tempo médio de secagem, que a madeira secada na estufa solar levou um tempo 3,3 vezes maior do que na estufa convencional para atingir o teor de umidade final de 12%. Em outras palavras, o tempo despendido pela secagem convencional foi aproximadamente 30% daquele requerido pela secagem solar.

PLUMPTRE³⁹ encontrou um tempo 2,5 a 3 vezes maior, ao passo que SIMPSON & TSCHERNITZ⁵⁷ constataram que o tempo de secagem na estufa solar foi $2 \frac{1}{4}$ vezes maior do que na convencional.

As curvas típicas de secagem para os três métodos estudados, correspondentes a média de três repetições, são mostradas na Figura 25.

4.3.2. TAXA DE SECAGEM

Os estudos a respeito de taxa de secagem tem sido conduzidos com pequenos corpos de prova, geralmente para temperatu-

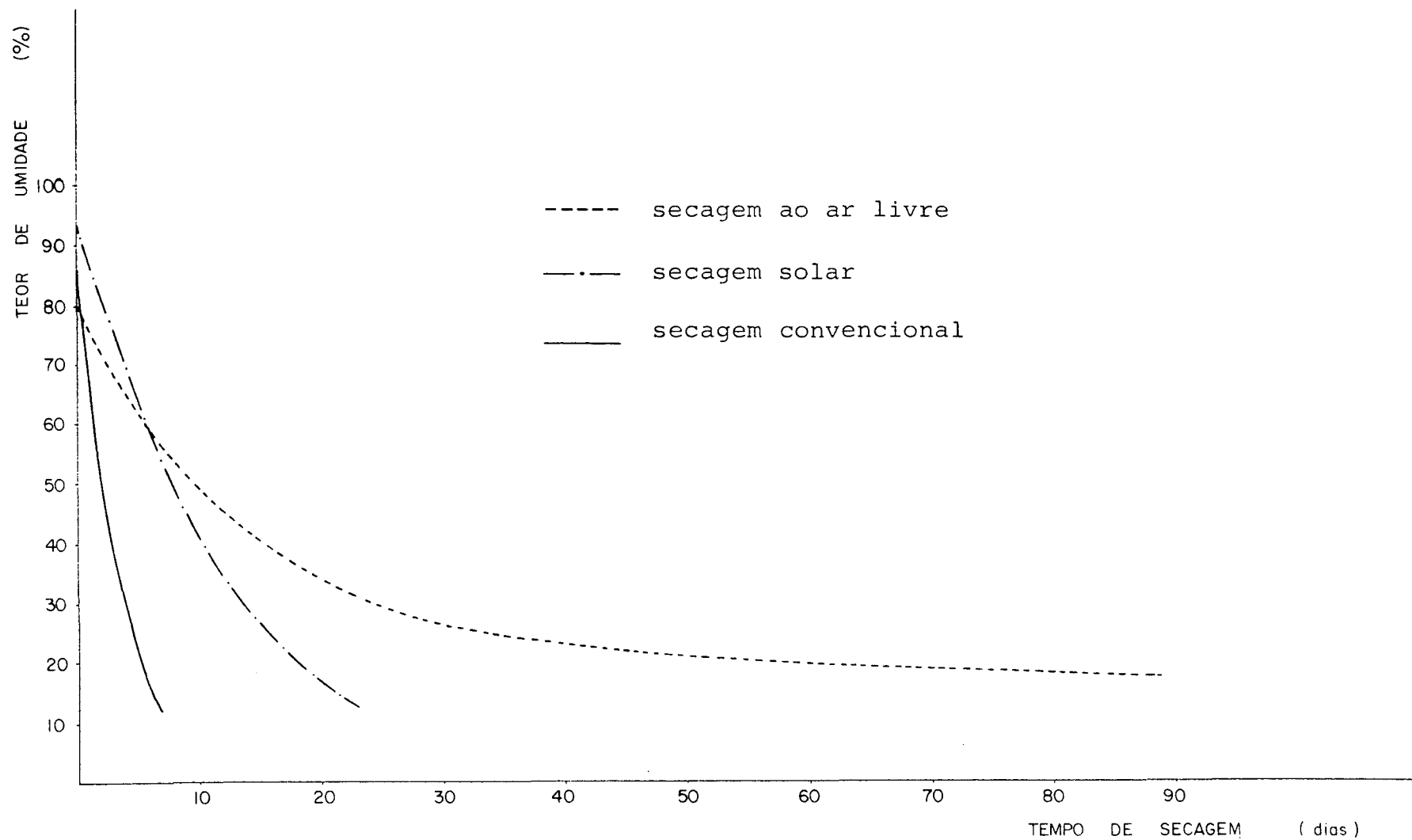


FIGURA 25: Curvas de secagem para os três métodos estudados.

ras acima do ponto de ebulição da água, utilizando as equações propostas por HANN¹⁹. As referidas equações, que consideram o peso de água removida por unidade de área e tempo, não se adaptaram a este estudo devido a impossibilidade de controlar todas as tábuas periodicamente. Por esta razão, utilizou-se a percentagem média de água evaporada por dia das amostras de secagem para determinar a taxa de secagem das pilhas de madeira.

Estabeleceu-se uma comparação entre os três métodos de secagem através do cálculo da taxa de secagem média em diferentes intervalos de umidade, como mostra graficamente a Figura 26. Além da diferença bem evidente entre os métodos, pode-se evidenciar também um decréscimo aproximadamente linear da taxa de secagem em função do teor de umidade da madeira.

A pequena variabilidade nos dados médios da secagem ao ar livre e convencional evidenciada na Figura 26, é devido provavelmente ao teor de umidade inicial das amostras, que foi bastante diferente. Entretanto, o perfeito controle do processo na secagem convencional e o tempo relativamente longo da secagem ao ar livre parecem ser as principais causas da aparente linearidade observada nas curvas nos diferentes intervalos de umidade.

Na secagem solar contudo, esta tendência não foi evidenciada. A variabilidade relativamente grande da taxa de secagem pode ser atribuída aos fatores climáticos, onde se destaca a influência da insolação. A Figura 26 mostra, que no intervalo de 30 a 20% de umidade ocorreu um aumento na taxa de secagem em relação ao valor médio anterior, devido aos razoáveis dados de insolação registrados neste período. O aumento da temperatu

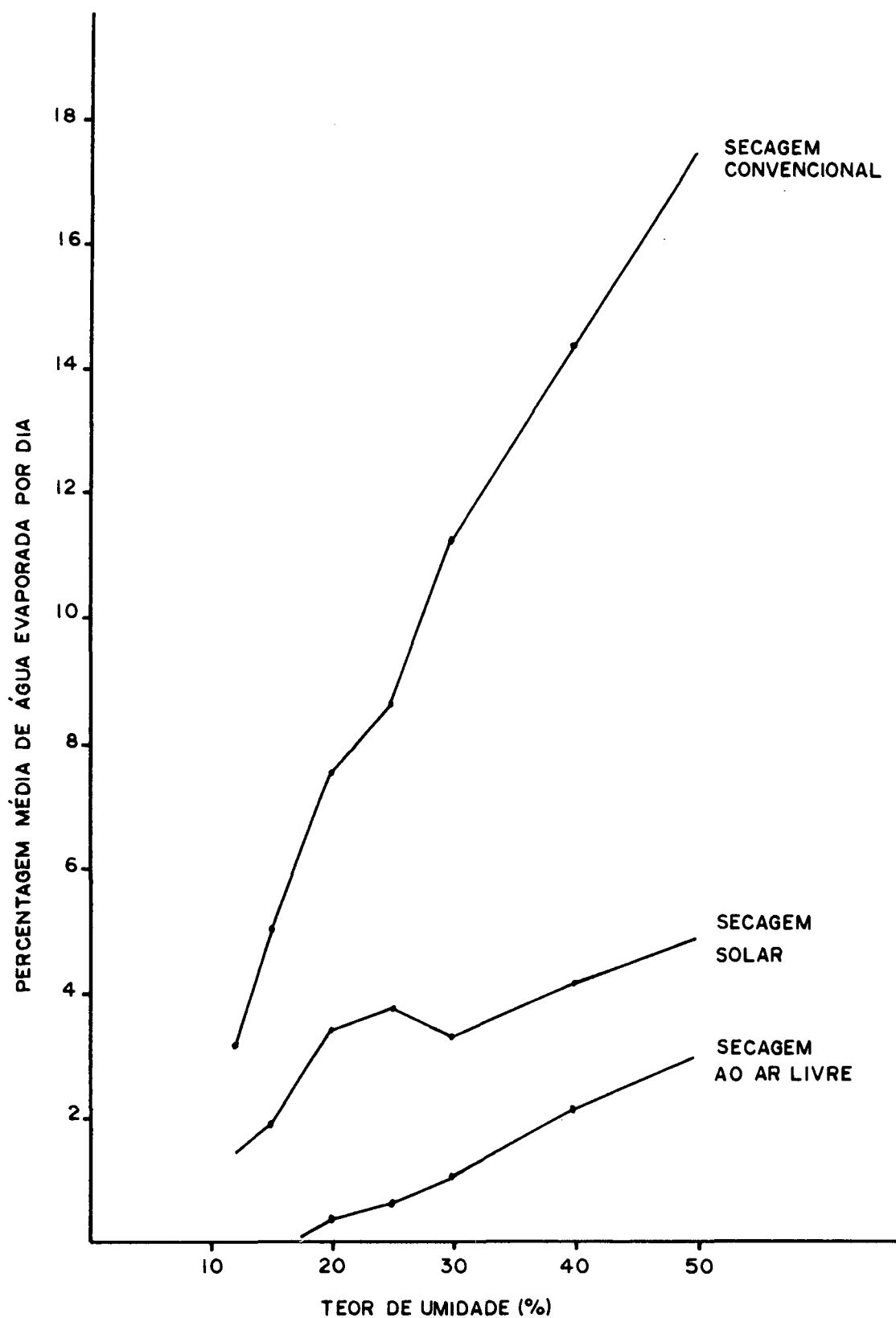


FIGURA 26: Taxa de secagem média observada nos três métodos de secagem, em diferentes intervalos de umidade da madeira.

ra interna intensificou a secagem da madeira, reduzindo assim o tempo de secagem no intervalo de umidade mencionado, o que pode ser confirmado pelo Quadro 10.

A taxa de secagem da madeira secada na estufa solar, como era esperado, foi grande maior do que ao ar livre. Esta diferença foi bem significativa mesmo acima do teor de umidade de 30%, conforme mencionado anteriormente.

Em relação a secagem convencional contudo, observou-se uma diferença bem evidente em favor desta, que decresce com a diminuição do teor de umidade da madeira.

As taxas de secagem encontradas para a estufa solar e secagem ao ar livre podem variar em função da época de secagem da madeira, devido as variações dos fatores climáticos. Por esta razão, os valores mostrados graficamente na Figura 26 são representativos apenas para a época de estudo considerado.

4.3.3. CONTRAÇÃO DA MADEIRA

O teor de umidade da madeira influenciou decisivamente na sua contração, numa relação inversamente proporcional, como mostra a Figura 27. Como a madeira raramente é seca até 0% de umidade, acredita-se que o cálculo da contração máxima neste caso não teria validade prática. Por esta razão, a comparação entre os três métodos de secagem foi estabelecida com os valores obtidos no final de cada processo, os quais são apresentados no Quadro 11.

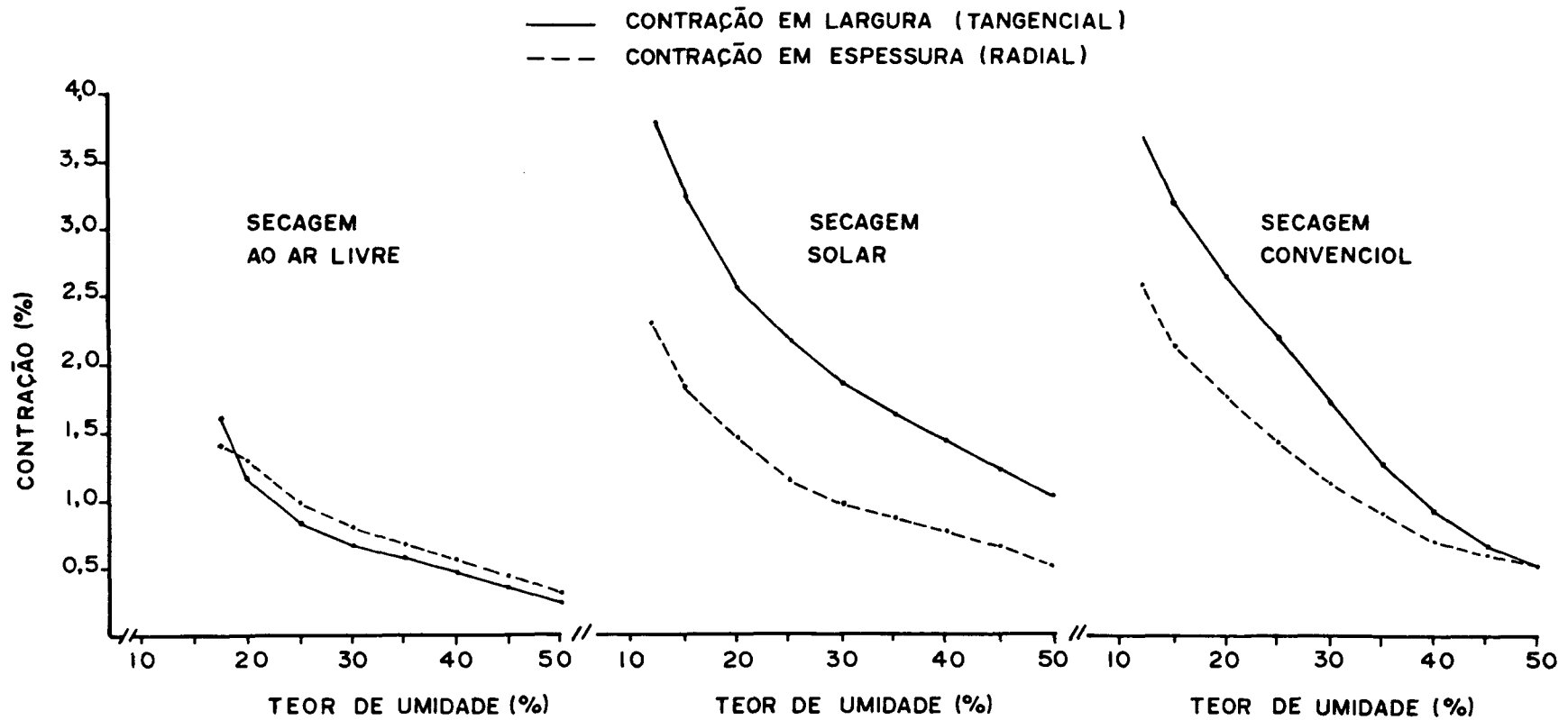


FIGURA 27: Efeito do teor de umidade na contração de *Ocotea catharinensis* submetida a secagem ao ar livre, solar e convencional.

QUADRO 11: Contração média da madeira de *Ocotea catharinensis* observada para os três métodos de secagem.

MÉTODO	TEOR DE UMI- DADE FINAL (%)	CONTRAÇÃO (%)	
		espessura	largura
Ar livre	17,5	1,40	1,58
Solar	12,0	2,34	3,80
Convencional	12,0	2,60	3,67

A Figura 27 revela que a contração no sentido da largura (tangencial) foi sempre maior do que na espessura (radial), tanto na secagem solar como na convencional, em diferentes níveis de umidade da madeira. Na secagem ao ar livre entretanto, acima de 18-20% de umidade observou-se o inverso, ou seja, a contração radial maior do que a tangencial. Como estas curvas foram confeccionadas com base nas médias das amostras de secagem, a diferença observada entre elas na secagem ao ar livre é insignificante. Entretanto, pode ser constatado que a contração máxima, mesmo na secagem ao ar livre, é sempre maior no sentido da largura do que na espessura.

A anisotropia de contração, definida como sendo a razão entre as contrações tangencial e radial, é um parâmetro dentre outros, que pode ser empregado para classificar a madeira sob o ponto de vista de sua utilização. Variações anormais nessas duas direções de crescimento são comumente fonte de defeitos e tornam restrito o uso final da madeira. Segundo NOCK et al.³⁶, o fator de anisotropia situado entre 1,2 e 1,5 é excelente; de 1,6 a 1,9 é considerado normal, e valores acima de 2,0 limitam o emprego da madeira a certos usos. Sa-

lientam ainda que a situação ideal seria que a contração fosse a mesma nos dois sentidos (fator de anisotropia = 1).

Embora a anisotropia de contração média encontrada para a madeira de *Ocotea catharinensis* não tenha sido a mesma na secagem solar e convencional (Quadro 12), os valores indicam que o material pode ser utilizado sem restrições. Por outro lado, o valor médio foi baixo na secagem ao ar livre em razão do teor de umidade final da madeira ser superior aos 12% de secagem ao ar livre que existe uma tendência ascendente da contração tangencial abaixo de 18-20% de umidade, como evidencia a Figura 27. Este fato indica que o fator de anisotropia só é diferente entre os três métodos de secagem devido a impossibilidade da madeira seca ao ar livre alcançar um teor de umidade inferior ao acima mencionado, no local e época de estudo em questão.

QUADRO 12: Anisotropia de contração média observada no final da secagem.

MÉTODO	n	FA	s	$s_{\bar{x}}$
Ar livre	9	1,13	0,040	0,013
Solar	9	1,62	0,030	0,010
Convencional	9	1,41	0,005	0,001

n - número de amostras de secagem

FA - fator de anisotropia médio

s - desvio padrão

$s_{\bar{x}}$ - erro padrão da média

4.3.4. QUALIDADE DA MADEIRA SECADA

Os defeitos da madeira resultantes da secagem nos três métodos utilizados neste estudo são apresentados no Quadro 13. Observa-se que as rachaduras de topo, único tipo de rachadura evidenciado, ocorreram com mais frequência na secagem ao ar livre, onde a percentagem de peças com o defeito foi aproximadamente três vezes maior do que nos demais métodos.

O surgimento de rachaduras na madeira deve-se principalmente a formação de gradientes de umidade durante a sua secagem (JOHNSON²⁶, SKAAR⁶⁰, VILLIERE⁷²). Na secagem ao ar livre, os extremos das pilhas são as mais expostas às condições severas de secagem, uma vez que estão sujeitos à livre circulação do ar e à incidência quase que direta dos raios solares (RIETZ & PAGE⁴⁶). Além disso, como a madeira é consideravelmente mais permeável ao longo da grã, uma tábua seca mais rapidamente nos primeiros 15 a 30cm das suas extremidades do que no centro. Este fato, devido ao gradiente de umidade já mencionado, provoca esforços na madeira capazes de produzir rachaduras nos extremos das peças, o que é confirmado por CECH & PFAFF⁹. Esta, provavelmente tenha sido uma das causas da ocorrência de uma maior percentagem de rachaduras no processo de secagem ao ar livre.

A média do comprimento de rachaduras das tábuas secadas ao ar livre foi maior do que nos demais métodos. Para analisar a diferença entre os três métodos com maior detalhe, foi realizada uma análise da variância utilizando-se os valores médios de cada repetição. Como a análise da variância de-

QUADRO 13: Quantificação dos defeitos resultantes da secagem da madeira nos três processos

TIPO DE DEFEITO	AR LIVRE (154)*			SOLAR (159)*			CONVENCIONAL (116)*		
	n	%	\bar{x} mm	n	%	\bar{x} mm	n	%	\bar{x} mm
RACHADURAS	56	36,0	57,3	21	13,2	16,5	13	11,2	16,8
ARQUEAMENTO	47	30,5	1,92	35	22,0	1,7	21	18,0	1,5
ENCANOAMENTO	6	3,9	0,16	22	13,8	0,6	32	27,5	1,3
TORCIMENTO	13	8,4	0,60	48	30,2	3,2	41	35,3	5,2
TOTAL DE TÁBUAS EMPENADAS	55	35,7	-	85	53,4	-	77	66,3	-
TOTAL DE TÁBUAS COM DEFEITO	94	61,0	-	91	57,2	-	81	69,8	-

n - número de tábuas que apresentaram defeitos

% - percentagem de tábuas que apresentaram defeitos

\bar{x} - razão dada pelo somatório dos defeitos em mm, e o número total de tábuas submetidas à secagem

* - número total de tábuas submetidas à secagem nas três repetições

mostrou haver diferença significativa entre os tratamentos ao nível de 99%, comparou-se adicionalmente o comprimento médio das rachaduras dos três métodos através do teste de Tukey. O resultado da comparação evidenciou uma diferença significativa ao nível de 99% entre a secagem solar e ao ar livre, e entre esta e a secagem convencional, reafirmando a observação inicial de que o defeito foi mais pronunciado na secagem ao ar livre (Apêndice 7).

A ocorrência de uma maior percentagem de rachaduras de topo na secagem ao ar livre em relação a secagem solar também foi detectada por outros pesquisadores (MALDONADO³¹, SHARMA et al.⁵⁴, YANG⁷⁹). Entretanto, VITAL⁷³ verificou através do teste t, que o comprimento médio das maiores rachaduras em madeiras de *Eucalyptus sp.* foi significativamente maior na secagem solar ao nível de 99% e atribui este fato ao elevado teor de umidade da madeira secada ao ar livre.

Foi demonstrado através do mesmo teste de Tukey que não existe diferença significativa entre a secagem solar e convencional ao nível de 95%. Estatisticamente, este fato indica que o comprimento médio das rachaduras nos dois métodos de secagem foi praticamente o mesmo. Comparando ainda as duas estufas de secagem, observa-se no Quadro 13 uma certa diferença quanto ao número e a percentagem de peças com rachaduras. Encontrou-se valores maiores na secagem solar, provavelmente porque neste processo o número total de tábuas submetidas a secagem foi maior do que na estufa convencional (154 contra 116). Estes resultados são muito semelhantes aos obtidos por SHARMA et al.⁵⁴.

Três tipos de empenamentos foram detectados na madeira: arqueamento, encanoamento e torcimento. Arqueamento ou empeno em arco se refere a curvatura da tábua segundo o seu comprimento, ao passo que encanoamento ou empeno em canoa diz respeito à curvatura da peça segundo a sua largura. Por torcimento ou empeno torcido entende-se a distorção de um dos extremos da tábua em que os cantos da mesma se matêm afastados do plano normal, formando ângulos diferentes com a superfície horizontal (RASMUSSEN⁴², GLOSSARY¹⁶, RIETZ & PAGE⁴⁶).

Os empenamentos de um modo geral, se manifestam por ocasião da secagem devido principalmente à diferença entre as contrações radial e tangencial (RASMUSSEN⁴², RIETZ & PAGE⁴⁶, CECH & PFAFF⁹). Segundo RIETZ E PAGE⁴⁶, a contração longitudinal não tem grande influência, exceto quando lenho juvenil ou lenho de reação estão presentes na madeira.

Obteve-se o valor do arqueamento medindo-se a "flecha" do maior afastamento vertical dado pela curvatura longitudinal da tábua. Embora não tenha sido detectado diferença significativa entre os tratamentos (Apêndice 7), em relação aos demais métodos a secagem ao ar livre apresentou uma maior percentagem de tábuas arqueadas (Quadro 13). Como as análises da variância do encanoamento e empeno torcido evidenciaram diferença significativa entre os tratamentos ao nível de 99%, realizou-se adicionalmente o teste de Tukey que também mostrou haver diferença significativa entre as médias ao mesmo nível de probabilidade (Apêndice 7). Esta comparação de médias conduz à constatação que tanto o encanoamento médio como o torcimento médio foram menores em madeira secada ao ar livre do que aquela seca

nas estufas solar e convencional. VITAL⁷³ também encontrou enca^oamento médio significativamente menor na secagem ao ar li^vre, entretanto o torcimento não apresentou diferença signifi^cativa em relação a secagem solar.

Em termos aproximativos, a percentagem total de tábuas empenadas resultantes da secagem ao ar livre correspondeu a 2/3 e 1/2 da percentagem evidenciada na secagem solar e conven^cional respectivamente. É necessário enfatizar contudo, que a madeira secada ao ar livre possuía no final da secagem um teor de umidade superior ao obtido nos demais métodos de secagem. Como a magnitude das contrações, principal causa dos empena^mentos (SKAAR⁶⁰), varia de acordo com o teor de umidade da madeira (RIETZ & PAGE⁴⁶, RASMUSSEN⁴²), pode ser esperado em madeiras mais secas uma maior percentagem de empenamentos.

Embora a análise da variância não tenha detectado dife^rença significativa de arqueamento entre os tratamentos (Apêⁿdice 7), o Quadro 13 mostra que na secagem solar a média do defeito foi ligeiramente superior à média observada na madei^rra seca em estufa convencional. Por outro lado, tanto o enca^oamento médio como o empeno torcido médio foram significati^vvamente maior na madeira seca na estufa convencional do que na solar ao nível de 99% de probabilidade.

De uma maneira geral, a madeira submetida a secagem so^lar apresentou uma menor percentagem de empenamentos do que a madeira seca na estufa convencional. A diferença mostrada no Quadro 13, que poderia ser maior se o número de tábuas fosse o mesmo nos dois processos, pode ser atribuída ao fato que a taxa de evaporação é menor na estufa solar, resultando uma se^ccagem mais lenta e em consequência, uma menor percentagem de

empenamentos (PLUMPTRE⁴⁰).

As tábuas secas nas estufas solar e convencional acusaram invariavelmente a presença de esforços internos, ao passo que na secagem ao ar livre estes esforços praticamente não foram observados. A elevada umidade relativa da região, o curto período de acondicionamento na estufa convencional e, a falta de um mecanismo de umidificação, temperatura interna elevada e menor tempo de secagem na estufa solar podem ter sido as causas desta constatação. CASIN et al.⁸ acreditam que o surgimento de endurecimento superficial na madeira seca em estufa solar deve-se a falta de um condicionamento no final da secagem. TAO & HSIAO⁶⁶ entretanto, não observaram problemas sérios de endurecimento superficial mesmo em espécies susceptíveis ao defeito. Os testes para detectar a presença de esforços na madeira, foram realizados segundo a metodologia normalmente citada na literatura (WRIGHT⁷⁸, VILLIERE⁷², KOLLMANN & CÔTE²⁸).

Analisando o total de empenamentos e rachaduras configurados no Quadro 13, observa-se que a percentagem de tábuas com um ou mais dos diferentes tipos de defeitos foi menor na secagem solar do que nos demais métodos. Este fato, com relação à secagem ao ar livre, foi constatado também por PECK³⁸, MALDONADO³¹, PLUMPTRE³⁹, TROXELL & MUELLER⁶⁹ e YANG⁷⁹. PLUMPTRE⁴⁰ acredita que a umidade relativa relativamente alta nos períodos críticos de secagem e o suave tratamento de acondicionamento que a madeira sofre diariamente durante a noite, contribuem para minimização dos defeitos na estufa solar.

Apesar do número total de tábuas secas na estufa convencional ter sido menor, a percentagem mais elevada de peças

defeituosas foi encontrada neste processo. Conforme mencionado anteriormente, o acelerado programa de secagem utilizado possivelmente tenha contribuído para aumentar o percentual de defeitos. Outros estudos confirmam que a qualidade da madeira secada na estufa solar é pelo menos semelhante a da secagem convencional (SHARMA et al.⁵⁴), e PLUMPTRE³⁹ verificou que a secagem foi tão boa quanto a convencional, mostrando menos tendência a endurecimento superficial, colapso e outros defeitos.

Os defeitos resultantes da secagem da madeira normalmente são analisados através de critérios arbitrários e indefinidos. Afirmações como "12,6% das tábuas secas na estufa solar e 15,4% daquelas secas ao ar livre apresentaram defeitos" (Troxell⁶⁸), são muito comuns em trabalhos científicos. Informações desta natureza não fornecem subsídios concretos acerca da qualidade real da madeira, uma vez que uma tábua considerada defeituosa para um determinado fim pode estar qualificada para outro.

Em razão de não terem sido encontradas referências na literatura e da dificuldade de avaliação dos defeitos de secagem, desenvolveu-se uma metodologia própria para analisá-los e o critério adotado foi aplicado de forma imparcial e individual para todas as tábuas. Como o objetivo da análise dos defeitos foi comparar a qualidade do material seco nos três processos de secagem e não quantificá-los em cada método, adotou-se uma sistemática bastante rigorosa. Para tanto, considerou-se como defeito toda e qualquer anomalia observada na madeira após a sua secagem.

O fato de tábuas com 5,0mm de arqueamento em 2,0m de comprimento estarem incluídas entre as consideradas defeituo-

sas, exemplifica claramente a rigorosidade de comparação empregada. Em consequência disso, pequenos desvios julgados co defeito neste estudo, em muitos casos são desconsiderados in dústriamente.

O emprego desta metodologia contudo, é restrito, sendo indicado apenas para comparar defeitos entre processos de secagem diferentes, e ocasionalmente para evidenciar o tipo mais frequente. Portanto, o elevado número e percentagem de peças defeituosas mostradas no Quadro 13 não significa uma baixa qualidade do material. Os referidos valores tiveram apenas validade comparativa entre os três processos de secagem, conforme mencionado anteriormente.

4.4. CUSTOS DE SECAGEM

O estudo comparativo dos custos entre os três métodos de secagem foi realizado extrapolando-se os dados desta pesquisa para uma produção em escala comercial. O emprego deste artifício teve como objetivo permitir a obtenção de informações mais próximas da realidade industrial no que tange aos custos de secagem da madeira.

Para efeito de comparação, a quantidade de madeira se ca anualmente em cada método de secagem foi fixada em 320m^3 . Levando-se em conta que a secagem ao ar livre na região de Curitiba leva em média 2,5 meses, para obter mensalmente 28m^3 de madeira seca a partir da produção anual, é requerido um estoque de 70m^3 permanentemente no pátio. Como a dimensão es tipulada para as pilhas é de 1,5 x 2,0 x 2,0m de largura, al tura e comprimento respectivamente, que corresponde a um vo-

lume de $3,0\text{m}^3$, seriam necessárias 23 pilhas de madeira constantemente no pátio de secagem.

Considerando que o tempo médio de secagem solar é de 23 dias, o que possibilita secar 16 cargas por ano, seriam necessárias duas estufas com capacidade para 10m^3 cada uma para a secagem de 320m^3 de madeira anualmente. Cada estufa comporta duas pilhas de madeira com $2,5 \times 2,0 \times 2,0\text{m}$ de largura, altura e comprimento respectivamente.

Considerando o tempo de secagem na estufa convencional de aproximadamente uma semana, seria necessário uma unidade com capacidade de $8,0\text{m}^3$. Podem ser confeccionadas na mesma duas pilhas de madeira medindo $1,8 \times 2,0 \times 2,0\text{m}$ de largura, altura e comprimento respectivamente, que corresponde a um volume de $7,2\text{m}^3$. A capacidade da estufa é superestimada para compensar o período de manutenção e limpeza.

4.4.1. INVESTIMENTO

Na secagem ao ar livre é necessário uma fundação suficientemente forte para suportar o peso da pilha, uma cobertura para protegê-la das intempéries e sarrafos para separar as tábuas. A fundação pode ser confeccionada com pilares de $0,50 \times 0,20\text{m}$ de comprimento e diâmetro respectivamente, e ravessas de $1,5 \times 0,10 \times 0,05\text{m}$. São necessários 160 sarrafos separadores de $0,025 \times 0,025 \times 1,5\text{m}$ e uma cobertura de tábuas medindo $0,025 \times 2,0 \times 2,5\text{m}$ para cada pilha. A instalação desses equipamentos requer em média 4 horas de serviço por pilha e o custo do investimento está evidenciado no Quadro 23 do Apêndice 8.

O material necessário para a construção de uma estufa solar com capacidade para 10m^3 e os respectivos custos está listado no Quadro 24 do Apêndice 8. O piso da estufa é formado por uma base de cimento e a parede por chapas de compensado fenólico, ambos isolados com o material lã de rocha. Deve-se salientar que uma unidade pode ser construída por 2 operários em duas semanas.

A secagem convencional pode ser realizada em uma estufa de $2,0 \times 2,2 \times 5,0\text{m}$ de largura, altura e comprimento respectivamente. Os dados acerca dos equipamentos e custos da unidade instalada, fornecidos pelos fabricantes, estão no Quadro 25 do Apêndice 8.

4.4.2. JUROS DE CAPITAL

Para a determinação destes custos, considerou-se para a madeira um valor de Cr\$ $20.000,00/\text{m}^3$ e juros de 6% ao mês. Os custos foram calculados pela seguinte equação:

$$C = \frac{V \times v \times j \times t}{\text{produção anual}} \quad \text{Equação 5.}$$

onde: C = custo de juros sobre capital (Cr\$/ m^3)

V = volume de madeira permanentemente em secagem (m^3)

v = valor da madeira (Cr\$)

j = juro mensal

t = tempo (mês)

Os custos encontrados para secagem ao ar livre, solar e convencional são apresentados comparativamente no Quadro 14, e a sequência dos cálculos para a determinação de cada

QUADRO 14: Custos de secagem* - comparação entre os métodos ar livre, solar e convencional.

PARÂMETROS CONSIDERADOS	AR LIVRE		SOLAR		CONVENCIONAL	
	Cr\$/m ³	%	Cr\$/m ³	%	Cr\$/m ³	%
Controle da secagem	54,66	1,65	144,57	10,66	433,72	18,74
Manutenção	5,54	0,17	12,67	0,94	59,98	2,59
Depreciação	90,67	2,75	263,59	19,44	391,96	16,94
Juros**	3150,00	95,43	900,00	66,36	320,40	13,85
Energia	0,0	0,0	35,31	2,60	1107,74	47,88
TOTAL	3300,87	100,0	1356,14	100,0	2313,80	100,0

* os valores se referem ao mês de julho/1980: 1 UPC = Cr\$ 604,00

** juros sobre o valor do material submetido à secagem

parâmetro é mencionada detalhadamente no Apêndice 8.

Como pode ser observado no Quadro 14, o custo de capital calculado na forma de juros sobre o valor do material submetido a secagem é o fator limitante na secagem ao ar livre por ser extremamente elevado. Apesar de ser significativamente menor, é o principal custo da secagem solar, sendo neste processo aproximadamente 3 vezes maior do que na secagem convencional. A relação aproximada evidenciada entre estes custos na secagem convencional, solar e ao ar livre é de 1 : 3 : 10 respectivamente. A causa principal dessa diferença é o longo tempo de secagem, especialmente ao ar livre, já que os juros são calculados sobre o volume de material permanentemente em secagem.

4.4.3. DEPRECIÇÃO

Os custos de depreciação foram calculados sobre o capital investido em cada método de secagem, através da seguinte equação de depreciação linear:

$$D = \frac{\Sigma \text{ custos}}{\text{vida útil} \times \text{prod. anual}} \quad (\text{Cr}\$/\text{m}^3) \quad \text{Equação 6.}$$

O valor do material usado na secagem ao ar livre para a confecção da fundação, cobertura e sarrafos foi estimado em Cr\$ 15.000,00/m³. O custo de depreciação foi calculado com os dados expressos no Quadro 23 do Apêndice 8, sendo que todos os equipamentos são substituídos após 5 anos de serviço.

Na estufa solar, como os equipamentos tem duração variável, calculou-se a depreciação em função do tipo de mate-

riais e os respectivos custos empregados nos cálculos são mostrados no Quadro 24 do Apêndice 8.

Analisando-se os resultados do Quadro 14, verifica-se que o custo de depreciação da estufa solar foi aproximadamente 30% menor do que o da convencional, e praticamente 3 vezes maior do que na secagem ao ar livre. Deve-se considerar contudo, que em função da falta de informações concretas acerca da durabilidade do plástico, a vida útil atribuída ao mesmo poderá estar superestimada. A substituição deste material após 2 a 3 anos de uso, como sugerem VITAL & COLLOM⁷⁴, certamente acarretaria um aumento dos custos de depreciação da estufa solar. Por outro lado, SHARMA et al.⁵⁴ citam que, mesmo trocando o plástico da estufa solar a cada 1,5 a 2 anos, o custo da substituição será bem menor do que o custo de depreciação normal de uma estufa convencional de produção idêntica.

4.4.4. MÃO-DE-OBRA

Por custos de mão-de-obra entende os referentes a controle e manutenção, operações indispensáveis a todos os processos de secagem, os quais são executados por operários semi-especializados. Este tipo de mão-de-obra, percebe na região de Curitiba um salário médio de Cr\$ 15.000,00 por mês, sobre o qual deve-se computar em torno de 69% de encargos sociais referentes a férias, décimo-terceiro salário, INPS, FGTS, sindicato, etc. Considerando que um operário trabalha em média 200 horas/mês, os custos do mesmo para a empresa é de Cr\$ 126,75/hora.

4.4.4.1. CONTROLE DO PROCESSO

Para controlar uma pilha de madeira na secagem ao ar livre, um operário gasta em média 0,5 hora/mês, ao passo que na secagem solar é consumido durante todo o ano 0,5 hora/dia. Já a estufa convencional necessita um operário trabalhando 3 horas por dia durante o ano inteiro.

O custo de controle da secagem convencional, como era esperado, foi maior do que nos outros dois métodos em função do tempo necessário para medição do teor de umidade e controle do programa de secagem. Além disso, o controle do teor de umidade e, eventualmente a regulagem das aberturas de ventilação na estufa solar, podem ser executados por um operário de outra atividade (SHARMA et al.⁵⁴), o que reduz substancialmente o custo. Os baixos custos encontrados na secagem ao ar livre, são atribuídos ao tempo de apenas 30 minutos gastos mensalmente para medição do teor de umidade e vistoria periódica das pilhas no pátio.

4.4.4.2. MANUTENÇÃO

Para as duas manutenções (capina, limpeza, conservação de estradas e caminhos) realizadas por ano na secagem ao ar livre, são necessárias 7 horas cada uma. Na secagem solar uma limpeza da estufa após a secagem de cada carga, dura uma hora, totalizando 16 manutenções por ano. Na estufa convencional, limpeza, pintura e consertos consomem duas semanas por ano, adicionando-se ainda Cr\$ 5.000,00 para consertos eventuais.

Os custos de manutenção da estufa solar foram aproxi-

madamente o dobro daqueles resultantes na secagem ao ar livre. Entretanto, equivalem a praticamente 1/5 dos custos de manutenção da estufa convencional, onde as operações de limpeza, pintura e reparos são indispensáveis.

4.4.5. ENERGIA

Na secagem ao ar livre os custos de energia são nulos.

Na secagem solar são atribuídos apenas a energia elétrica consumida pelos ventiladores. O consumo médio para cada estufa, equipada com dois ventiladores de 0,5 HP é de 0,546 kWh, que equivale a Cr\$ 1,09/hora. Como o tempo médio de funcionamento dos mesmos é de 324 horas para secar uma carga de madeira, o custo de energia correspondente é de Cr\$ 353,16. A partir destes dados calculou-se o custo de energia conforme mostra o Apêndice 8 .

Na estufa convencional devem ser considerados os custos de energia elétrica para o ventilador e da madeira para a produção de vapor. Considerando que o motor de 5 HP que aciona o ventilador funciona ininterruptamente durante 7 dias de secagem, são dispendidos Cr\$ 917,28 por carga secada. Para produzir a quantidade de vapor necessária (160-180Kgh), a caldeira com uma área de aquecimento de 10m^2 consome em média 29 kg de lenha por hora, totalizando 4872 kg/carga. Considerando que o material usado como combustível possui um peso específico médio de $0,70\text{ g/cm}^3$, são necessários $313,2\text{m}^3$ anualmente para abastecer a caldeira, a um custo regional de Cr\$ 1.000,00/ m^3 . A sequência dos cálculos é indicada no Apêndice 8 .

O custo da energia consumida na estufa solar foi apro

ximadamente 30 vezes menor do que na convencional. Este fato já era esperado uma vez que a única energia requerida na estufa solar é eletricidade para movimentar os ventiladores (SHARMA et al.⁵⁴). O principal responsável pela grande diferença entre os dois métodos contudo, foi o alto custo da produção de vapor, que corresponde a 80% do custo de energia da estufa convencional. Além disso, a potência do motor do ventilador utilizado (5 HP) também contribuiu para elevar os custos neste processo. Por outro lado, pode-se observar no Quadro 14 que enquanto a energia é o principal custo da secagem convencional (48%), na secagem solar é um dos menores, contribuindo com apenas 2,6% dos custos.

Uma análise global dos custos de secagem encontrados nos três métodos evidencia que na secagem solar os mesmos foram respectivamente 60 e 42% menores do que na secagem ao ar livre e convencional. Todavia, os parâmetros de comparação utilizados por outros pesquisadores parecem não serem os mesmos. CASIN et al.⁸ mencionam que os custos de funcionamento da estufa solar se restringem a custos de energia e manutenção dos ventiladores, quando na verdade o controle do processo também deve ser considerado. Por outro lado, PECK³⁸ cita que os custos de secagem solar e ao ar livre são praticamente iguais, o que não corresponde a realidade. Porém, confrontando os custos de secagem das duas estufas, os resultados encontrados por PECK³⁸ se assemelham bastante aos evidenciados neste estudo.

Os custos de secagem solar podem, eventualmente, ser reduzidos em função da diminuição do tempo de secagem, particularmente em épocas do ano mais favoráveis. Nos primeiros

trabalhos conduzidos na Uganda, os custos de secagem foram entre 20 e 40% menor do que na estufa convencional, e em estudos posteriores a diferença aumentou para 60% (LITTLE²⁹).

Ao comparar estes resultados com outros encontrados em diferentes partes do mundo, especialmente em estudos desta natureza, deve-se considerar dentre outros a influência da localização geográfica. PLUMPTRE⁴⁰ menciona que na Inglaterra, onde o período favorável para a secagem solar é 5 meses por ano e os custos de mão-de-obra são altos, os custos por m³ de material seco são 76% maiores do que nos países tropicais em desenvolvimento, onde o salário com mão-de-obra é menor e a madeira pode ser secada o ano todo. Entretanto, apesar da comparação de custos ser restrita a certas pesquisas foi constatado que os custos de secagem solar, quando criteriosamente determinados, são sempre menores do que secagem ao ar livre e convencional. Com base nos dados apurados no Quadro 14, pode-se concluir que os fatores responsáveis pela diferença observada nos custos de secagem foram os juros e energia da secagem ao ar livre e convencional respectivamente.

Os custos referentes ao empilhamento das tábuas não foram computados uma vez que o volume de madeira manuseada anualmente é o mesmo nos três métodos de secagem. Estes custos podem ser considerados iguais na secagem ao ar livre, solar e convencional (SHARMA et al.⁵⁴, PLUMPTRE³⁹). Por esta razão, a inclusão deste item não modificaria os valores encontrados em termos de comparação e implicaria apenas em alterações nos percentuais dos custos dentro de cada método de secagem.

Os custos devido a perdas durante a secagem também foram desconsiderados neste estudo. Os defeitos resultantes da secagem foram eventualmente considerados iguais nos três métodos em razão da otimização dos processos. Por outro lado, caso este item fosse incluído, certamente passaria a representar uma percentagem bastante significativa nos custos de secagem.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos conduzidos mostram que a secagem solar apresenta perspectivas positivas para as condições brasileiras, mesmo em regiões consideradas de baixa insolação como a de Curitiba. As principais conclusões obtidas neste estudo são:

- a) Os testes realizados demonstraram que o emprego de uma cobertura transparente tripla ao invés de dupla, propicia um isolamento mais eficiente da estufa solar contra as perdas de calor sem elevar substancialmente os custos de construção. O material lã de rocha, além de permitir um melhor isolamento das superfícies sólidas da estufa solar, custa aproximadamente 30% menos do que chapas de isopor de mesma espessura.
- b) A temperatura da estufa solar é influenciada pelas horas de insolação numa relação diretamente proporcional. A máxima temperatura atingida neste estudo foi de $83,1^{\circ}\text{C}$. Além disso, a temperatura da estufa solar é altamente influenciada pelo teor de umidade da madeira, o qual afeta também a umidade relativa e a umidade de equilíbrio da estufa. A umidade relativa, e conseqüentemente a umidade de equilíbrio da estufa solar, também são afetadas tanto pela temperatura interna como pela diferença entre esta e a externa.
- c) As temperatura internas mais elevadas foram registradas

quando os raios solares atingiram perpendicularmente o teto transparente da estufa solar. Este fato indica que o ângulo de inclinação do teto está relacionado com a época do ano.

- d) No período compreendido entre os meses de setembro e janeiro, o tempo de secagem solar na região de Curitiba corresponde a aproximadamente 35% daquele obtido na secagem ao ar livre, considerando-se um teor de umidade final de 20%. A secagem solar é aproximadamente 3 vezes mais lenta do que em estufa convencional que utiliza temperatura de 65°C. A madeira secada em estufa solar pode atingir um teor de umidade final de 7,0% sem depreciação substancial do material, enquanto que a secagem ao ar livre dificilmente atinge valores inferiores a 17,0% em Curitiba. Apesar das notáveis diferenças no que tange a localização geográfica, características da estufa e do material submetido a secagem, o tempo aproximado de secagem solar em Curitiba foi menor ou no máximo igual aos obtidos em outras partes do mundo.
- e) A ocorrência de defeitos não afeta significativamente a qualidade do material seco nos três métodos, no entanto a percentagem de tábuas defeituosas foi menor na estufa solar.
- f) Os custos da secagem solar são respectivamente 60 e 42% menor do que na secagem ao ar livre e convencional.

Os resultados obtidos no presente estudo, permitem formular algumas recomendações:

- a) Conduzir novos estudos com pequenos modelos de secador, tipo a mini-estufa usada nesta pesquisa, com o objetivo de

melhor avaliar detalhes construtivos como distância entre plásticos, número de camadas de ar, tipos de plásticos e isolamento dentre outros, visando maximizar o rendimento do equipamento.

- b) Desenvolver uma estufa solar semelhante e com maior capacidade, e otimizar o seu funcionamento para a secagem de ma-deira em escala comercial.
- c) Testar um sistema de armazenamento de calor eficiente e de baixo custo para ser adaptado na estufa solar, visando mi-nimizar as flutuações de temperatura.
- d) Estudar melhor o sistema de ventilação através de abertu - ras, para evitar perdas substanciais de calor para o exte-rior e minimizar as condensações de umidade prejudiciais às paredes internas da estufa solar.
- e) Avaliar outros detalhes construtivos como durabilidade dos materiais empregados na construção e influência de siste-mas de teto móvel e ajustado para incidência perpendicular dos raios solares durante o ano todo.
- f) Realizar estudos comparativos com outras espécies de madei-ra, tanto de folhosas como de coníferas, e confrontar os resultados com os obtidos neste estudo objetivando a avaliação da qualidade do material, variações no tempo de se-cagem, teor de umidade final, etc.
- g) Recomenda-se a difusão da secagem solar junto às pequenas e médias indústrias madeireiras.

RESUMO

O presente estudo envolveu o desenvolvimento de uma estufa para secar madeira, composta basicamente de uma estrutura, uma cobertura tripla de plástico transparente e um sistema de circulação do ar, cujo aquecimento é feito apenas pela energia solar. Os resultados da secagem foram comparados com aqueles obtidos através de dois métodos tradicionalmente empregados - a secagem ao ar livre e a convencional -, principalmente no que tange a tempo de secagem, variação do teor de umidade, taxa de secagem, contração da madeira, qualidade do material e custos de secagem.

A espécie utilizada para este fim foi *Ocotea catharinensis* Mez, sendo que em cada método foram secadas três pilhas de madeira de aproximadamente $0,8\text{m}^3$. O estudo foi desenvolvido em Curitiba, Estado do Paraná/Brasil.

Os resultados de alguns testes previamente realizados demonstraram que o uso de uma cobertura transparente tripla e de um isolamento apropriado para as superfícies sólidas possibilitam um excelente sistema de isolamento da estufa solar contra as perdas de calor. Este fato foi comprovado por ocasião da secagem quando a temperatura interna manteve-se acima de 30°C mesmo durante à noite. Além disso, apesar das diferenças climáticas oriundas da localização geográfica, o tempo aproximado da secagem solar em Curitiba resultou sempre

menor ou no máximo igual obtidos em outras partes do mundo.

Através da análise de regressão, evidenciou-se a influência da insolação e do teor de umidade da madeira na temperatura da estufa solar. Verificou-se também que a temperatura interna, a diferença entre esta e a externa, bem como o teor de umidade da madeira, afetam significativamente tanto a umidade relativa como a umidade de equilíbrio da estufa solar.

Embora não tenha sido possível estabelecer uma comparação precisa, o tempo de secagem solar foi aproximadamente 3 vezes menor do que ao ar livre considerando-se um teor de umidade final de 20%. Por outro lado, a madeira seca na estufa solar demorou aproximadamente 3 vezes mais do que na convencional para atingir o teor de umidade final de 12%.

Através do uso de uma metodologia bastante rigorosa para avaliação dos defeitos, verificou-se que a qualidade da madeira seca foi semelhante nos três processos. A percentagem de tábuas defeituosas contudo, foi levemente menor na secagem solar do que nos demais métodos.

Os custos da secagem solar foram respectivamente 60 e 42% menor do que na secagem ao ar livre e convencional, sendo que os percentuais mais elevados foram os juros sobre capital na secagem solar e ao ar livre, e os custos de energia na secagem convencional.

Os resultados encontrados neste estudo são bastante animadores, no entanto existem vários pontos que devem ser mais pesquisados visando a otimização da secagem solar.

SUMMARY

In this study was developed a solar kiln to dry sawn timber, built using a wooden structure covered with transparent plastic. The equipment performance was compared with the conventional drying kiln and air drying. It was observed the drying time, wood shrinkage, defects and drying costs.

The trials were carried out in Curitiba, Paraná State, Brasil and *Ocotea catharinensis* sawn timber were used. For each drying condition (solar, conventional and air), three stacks with $0,8m^3$ were tested.

A preliminary study showed that an excellent isolating system can be obtained using three plastic layers, and even during the nights the temperature did not drop below 30°C. The efficiency of the equipment was also observed comparing with other solar drying kilns built in several parts of the world.

The internal temperature of the kiln was affected by the insolation and the wood moisture content. The relative humidity and the equilibrium moisture content of the kiln were affected by following factors: internal temperature, internal and external temperature difference, and wood moisture content.

Although a direct comparison of the results obtained

in the solar kiln with those obtained in the other two systems is difficult, the solar drying time can be considered to be roughly 3 times shorter than the air drying and 3 times longer than conventional kiln drying.

In spite of the fact that air drying seems to induce more degrade to the material, no significant difference was observed in the wood quality comparing the three drying conditions.

The drying costs for the solar kiln was 60% lower than the air drying costs and 42% lower than that for the conventional kiln.

The results obtained in this study have shown that solar drying is an good option, nevertheless there are still areas that it should be better investigated in order to maximize the efficiency of the equipment.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUBREVILLE, A. A floresta de pinho do Brasil. An. Bras. Econ. Flor., 2(2):21-36, 1949.
2. BANKS, C.H. Solar drying of timber - a development study. CSIR Subject Survey O/Hout 10, Pretoria, 1969. 27 p.
3. BOIS, P.J. Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer. U.S. Forest Service, Technical Report n. 7, 1977. 12 p.
4. BRENNAN, L.J.; FRICKE, K.W.; KAUMAN, W.G. & WRIGHT, G.W. Predrying in Australia. Austr. Timber J., 32(11):360-66, 1966.
5. BROWN, H.P.; PANSHIN, A.J. & FORSAITH, C. C. Wood in relation to moisture. In: Textbook of wood technology. New York, McGraw-Hill, 1952. v.2, p. 61-98.
6. BROWN, N.C. & BETHEL, J.S. El secado de la madera. In: La industria maderera. México, Limusa, 1975. p. 179-234.
7. CASIN, R.F. Solar dryer for lumber. Philippines. For. Prod. Res. Inst., Technical Note, n.76, 1967. 3p. (resumo)
8. ____; ORDINARIO, E.B. & TAMAYO Jr, G.Y. Solar drying of apitong, narra, red lauan and tanguile. The Philippi-Lumberman, 15(4):23-30, 1969.
9. CECH, M.Y. & PFAFF, F. Kiln operator's manual of Eastern Canada. Ontario, Eastern For. Prod, Lab., 1977. 189 p.
10. CHUDNOFF, M.; MALDONADO, E.D. & GOYTIA, E. Solar drying of tropical hardwoods. U.S. Forest Service Research Paper ITF - 2, 1966. 26 p.
11. CUEVAS, L.E. Shrinkage and collapse studies on *Eucalyptus viminalis*. J. Inst. Wood Sci., 4(5):29-38, 1969.
12. CUPPETT, D.G. Use of solar energy in drying lumber. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For Prod. Res. Soc., 1977. p. 62-4.
13. ECKELMAN, C.A. & BAKER, J.L. Heat and air requirements in the kiln drying of wood. West Lafayette. Purdue University, Agric. Exp. Station Res. Bulletin, n.933, 1976. 19 p.

14. GALVÃO, A.P.M. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. IPEF, 11:53-65, 1975.
15. GHISI, O.A.A. Anuário Meteorológico. Curitiba, Inst.Pesq. Agrop. Meridional, 1974. 140 p.
16. GLOSSARY of terms related to the drying of wood. Madison, For. Prod. Res. Soc., 1977. 81 p.
17. GOUGH, D.K. Timber seasoning in a solar kiln. "Paper presented to the Conference of IUFRO". Oxford, 1980. 9 p. (não publicado).
18. GUENEAU, P. Une expérience de séchage solaire du bois. Bois et Forêts des Tropiques, 131: 69-78, 1970.
19. HANN, R.A. Drying Yellow-Poplar at temperatures above 100°C. For. Prod. J., 14(5):215-20, 1964.
20. HART, C.A. The drying of wood. Raleigh, North Carolina Agricultural Extension Service, 1966. 24 p.
21. _____. Principles moisture movement in wood. For. Prod. J. 14(5): 207-14, 1964.
22. HILDEBRAND, R. El secado de madera aserrada. Espanha, Comercial Sagrera S.A., 1964. 159 p.
23. HOLZMANN, M. & GUARITA, C.F. Contribuição à agrometeorologia do Paraná. Curitiba, Secretaria da Agricultura, 1964. 52 p.
24. HUGHES, F. Prof. Yang's solar-heated kilns. Can.For.Ind. 98(3):62-3, 1978.
25. JOHNSON, C.L. Wind-powered solar-heated lumber dryer. Southern Lumberman, 203(2532):41-4, 1961. (Resumo).
26. JOHNSON, D.D. Timber drying - the principles involved. J. Inst. Wood Sci., 5(2):3-8, 1970.
27. KOLLMANN, F.F.P. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. 2 ed. Madrid, Graficas Reunidas, 1959. 675 p.
28. _____. & CÔTÉ Jr, W.A. Principles of wood science and technology. New York, Springer, 1968. v.1, 592 p.
29. LITTLE, R.L. Design and performance of foreign solar lumber dryers. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For. Prod. Res. Soc., 1977. p. 35-48.
30. LUMLEY, T.G. & CHOONG, E.T. Technical and economic characteristics of two solar kiln designs. For. Prod. J., 29(7):49-56, 1979.

31. MALDONADO, E.D. Radiacion solar para secar caoba em Puer to Rico. Puerto Rico, Trop. For. Res. Center, Apuntes Forestales Tropicales, n. 14, 1962. 5 p.
32. _____ & PECK, E.C. Drying by solar radiation in Puerto Ri-co. For. Prod. J., 12(10):487-8, 1962. (Resumo).
33. McMILLEN, J.M. & WENGERT, E.M. Drying eastern hardwood lumber. Madison, USDA For. Prod. Lab., 1978. 104 p. (Agriculture handbook, 528).
34. MOSELEY, T.D. Experience with solar collector designs, operation, and maintenance. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For. Prod. Res. Soc., 1977. p. 7-13.
35. NOACK, D. Holzphysik. Vorlesungsmanuskript, Hamburg, 1967. 100 p.
36. NOCK, H.P.; RIGHTER, H.G. & BURGER, L.M. Tecnologia da Madeira. Curitiba, Dep.de Engenharia e Tecnologia Ru-rais, UFPR, 1975. 200 p.
37. OLIVEIRA, L.C.S. Secagem solar de madeira de carvalho. Preservação de Madeiras, 8/9(1):52-60, 1977/78.
38. PECK, E.C. Drying 4/4 red oak by solar heat. For. Prod. J., 12(3):103-7, 1962.
39. PLUMPTRE, R.A. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the equator in Uganda. Commonw.For. Rev., 46(4):298-309, 1967.
40. _____. Simple solar heated timber dryers: design, perfor-mance and commercial viability. Commonw. For. Rev., 58(4):243-51, 1979.
41. _____. Solar kilns: their suitability for developing coun-tries. "Paper presented at the UNIDO Technical Meeting on the Selection of Woodworking Machinery". Vienna, 1973. 38 p.
42. RASMUSSEN, E.F. Dry Kiln operator's manual. Madison, USDA For. Prod. Lab., 1961. 197 p. (Agriculture Handbook , 188).
43. READ, W.R.; CHODA, A & COPPER, P.I. A solar timber kiln. Solar Energy, 15(4):309-16, 1974.
44. RESCH, H. & ECKLUND, B.A. A statistical analysis of the variability in the drying rate of redwood. For. Prod. J., 14(9):430-34, 1964.
45. REHMAN, M.A. & CHAWLA, O.P. Seasoning of timber using solar energy. Indian Forest Bulletin (New series), n. 229, 1961, 17 p.

46. RIETZ, R.C. & PAGE, R.H. Air drying of lumber: a guide to industry practices. Madison, USDA For. Prod. Lab., 1971. 110 p. (Agriculture Handbook, 402).
47. RILEY, T. Solar timber kiln. Austr. For. Ind. J., 46(1): 25-6, 1980.
48. SANTINI, E.J. Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento. Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1980. 15 f. (Série Técnica, FUPF, 5).
49. SATTAR, M.A. The feasibility of solar drying of timber in East Pakistan. Forest-Dale News, 1(3):48-56, 1969. (Resumo).
50. SCHNEIDER, A. & WAGNER, L. Vergleichende Untersuchungen über die Freilufttrocknung und Dolar-trocknung von Schnittholz unter mitteleuropäischen Wetterverhältnissen. Teil 2: Ergebnisse in zweitem Versuchsjahr; Erkenntnisse und Folgerungen für die solartrocknung in der Praxis. Holz als Roh-und Werkstoff, 38:313-30, 1980.
51. SCHNEIDER, A.; ENGELHARDT, F. & WAGNER, L. Vergleichende Untersuchungen über die Freilufttrocknung und solartrocknung von Schnittholz unter mitteleuropäischen Wetterverhältnissen, Teil 1: Versuchsanlage und Ergebnisse der ersten Trocknungsversuche. Holz als Roh-und Werkstoff, 37:427-33, 1979.
52. SHARMA, S.N. Feasibility of solar timber drying in tropical locations. "Paper presented to the Conference of IUFRO". Oxford, 1980. 22 p. (não publicado).
53. _____. Solar timber drying. In: Seminar on Industrial Application of solar energy, Madras, June/1975. Proceedings. 6 p.
54. _____; PREM, N. & BALI, B.I. A solar timber seasoning kiln. J. Timber Devel. Assoc. India, 18(2):10-26, 1972.
55. SHERWOOD, G.E. & GATZ, W.A. Performance of wood in a do-it-yourself solar collector. U. S. Forest Service, Research Note FPL - 0240, 1976. 6 p.
56. SIAU, J.F. Flow in wood. Syracuse. Syracuse University Press, 1971. 131 p. (Syracuse Wood Science Series, 1).
57. SIMPSON, W.T. & TSCHERNITZ, J.L. Design and performance of a solar lumber dryer for tropical latitudes. "Paper presented to the Conference of IUFRO". Oxford, 1980. 14 p. (não publicado).
58. _____. Solar lumber dryer designs for developing countries. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Pro-

- cessing. Blacksburg, For. Prod, Res. Soc., 1977. p. 56-61.
59. SINGH, Y. Studies on a solar timber seasoning kiln. IPIRI Journal, 6(1):42-4, 1976. (Resumo).
 60. SKAAR, C. Water in wood. Syracuse. Syracuse University Press, 1972. 218 p. (Syracuse Wood Science Series, 4).
 61. STAMM, A.J. Movement of fluids in wood - Part 1: Flow of fluids in wood. Wood Science and Technology, 1:122-41, 1967.
 62. _____. Movements of fluids in wood - Part 2: Diffusion. Wood Science and Technology, 1:205-30, 1967.
 63. _____. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood products. Wood Science, 14(2):114-28, 1971.
 64. _____. Wood and cellulose-liquid relationships. Raleigh. North Carolina Agricultural Experiment Station, 1962. 56 p.
 65. _____. Wood and cellulose science. New York, Ronald Press, 1964. 549 p.
 66. TAO, Y. & HSIAO, C. Lumber solar drying experiment at Taichung. Taiwan Provincial Chung-Hsing Univ. Bull., n.63 - n.49, 1964. 14 p. (resumo).
 67. TOMASELLI, I. The influence of high-temperature drying on some physical and mechanical properties of *Pinus Radiata* D. Don. Melbourne, 1977. 283 p. Tese. Ph.D. University of Melbourne.
 68. TROXELL, H.E. An application of solar energy for drying lumber in the Central Rocky Mountain Region. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For. Prod. Res. Soc., 1977. p. 49-55.
 69. _____. & MUELLER, L.A. Solar lumber drying in the Central Rocky Mountain Region. For. Prod. J., 18(1):19-24, 1968.
 70. TSCHERNITZ, J.L. & SIMPSON, W.T. Solar-heated, forced-air, lumber dryer for tropical latitudes. Solar Energy, 22:563-66, 1979.
 71. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Centro de Pesquisas Florestais. Estudo das alternativas técnicas, econômicas e sociais para o setor florestal do Paraná; subprograma tecnologia, relatório final, Curitiba, 1979. 335 f.
 72. VILLIERE, A. Séchage des Bois. 6.ed. Paris, Dunod, 1966. 410 p.

73. VITAL, B.R. Utilização de energia solar para secagem de madeira. Rev. Ceres, 23(125):1-10, 1976.
74. _____ & COLLOM, J.L. Secador solar para madeira. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1974. 34 p.
75. WENGERT, E.M. The application of solar energy to air drying. In: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For. Prod. Res. Soc., 1977. p. 33-4.
76. _____. Improvements in solar dry kiln design. U.S. Forest Service, Research Note FPL - 0212, 1971. 10 p.
77. _____. Processing trees to lumber for the hobbyist. Madison, 1979. 7 p. (CRAFT REVISION).
78. WRIGHT, G.W. Brief notes on moisture gradients, drying stresses and movement on re-cutting. South Melbourne, CSIRO, For. Prod. Lab., 1961. 6 p.
79. YANG, K.C. Solar kiln performance at a high latitude, 48°N. For. Prod. J., 30(3):37-40, 1980.

A P Ê N D I C E S

A P Ê N D I C E 1

DESENHO DA ESTUFA SOLAR

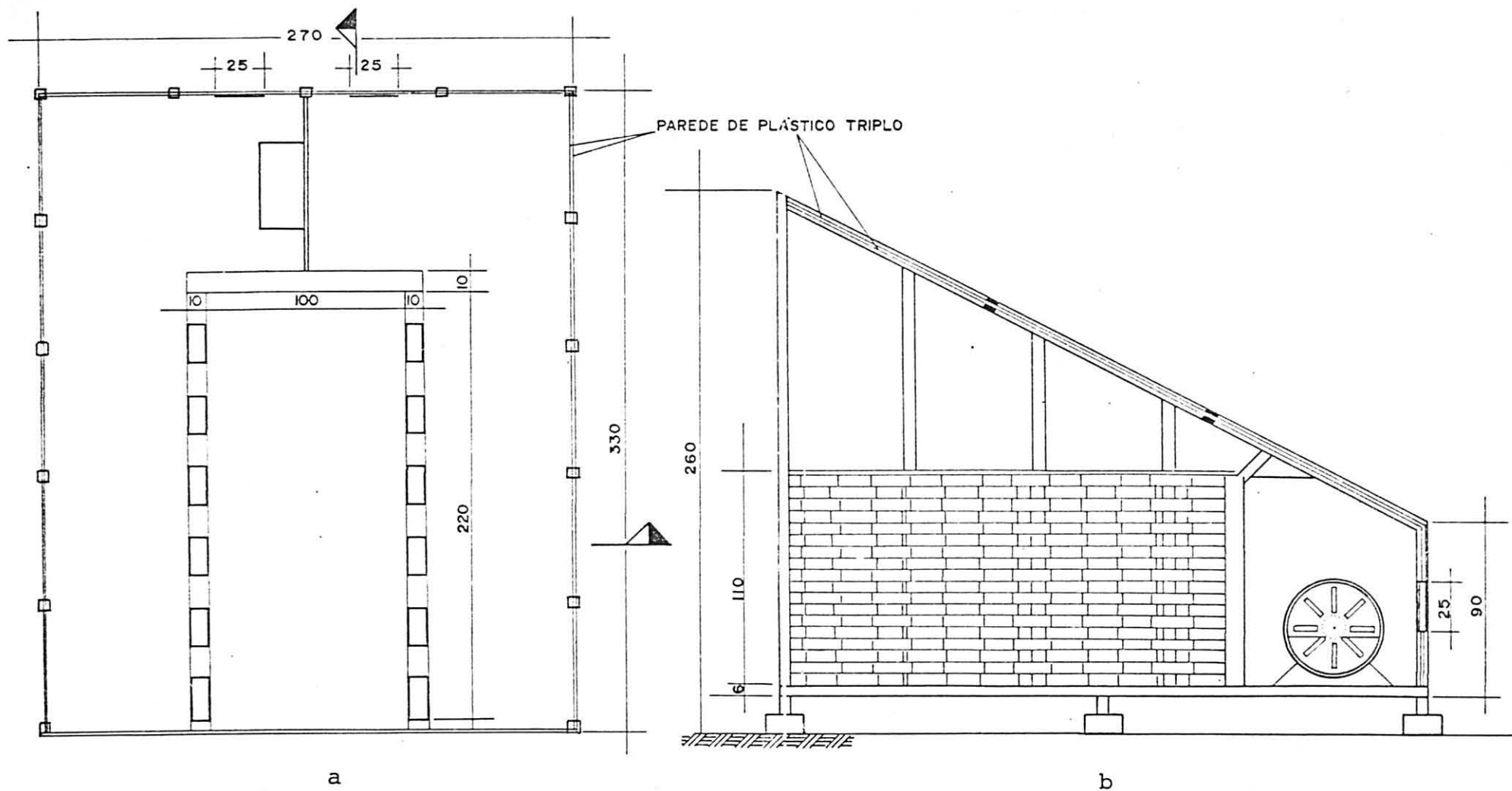


FIGURA 28: Estufa solar desenvolvida para a execução do experimento.

a) vista superior, b) vista lateral

A P Ê N D I C E 2

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE
ISOLAMENTO DA ESTUFA SOLAR

QUADRO 15 - Avaliação do sistema de isolamento da mini-estufa através do tempo de queda da temperatura, em horas, de 60° até 30°C.

TRATAMENTO	R E P E T I Ç Ã O		
	I	II	III
2 plásticos* lã de rocha**	3,0	2,8	3,2
3 plásticos* lã de rocha**	7,0	7,4	6,5
3 plásticos* isopor**	2,5	2,8	2,4

* - isolamento das superfícies transparentes

** - isolamento das superfícies sólidas (porta e assoalho).

A P Ê N D I C E 3

QUADRO DOS DADOS DA VARIAÇÃO DIÁRIA DA TEMPE-
RATURA INTERNA E EXTERNA DA ESTUFA SOLAR VAZIA

QUADRO 16 - Variação diária da temperatura interna e externa da estufa solar vazia durante parte de setembro/outubro de 1980 (dias ensolarados).

HORAS	T E M P E R A T U R A ° C								
	estufa solar			ar livre			diferença (Δt)		
	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.
08:00	18,0	29,1	38,0	8,0	16,4	21,0	8,0	12,7	17,0
09:00	20,0	37,9	50,0	9,0	17,7	24,0	11,0	20,2	26,0
10:00	28,5	47,4	60,0	11,0	20,3	25,0	17,0	27,0	35,0
11:00	37,0	56,8	68,0	12,0	22,3	31,0	21,0	34,2	42,0
12:00	49,0	64,9	76,0	15,0	24,2	32,0	31,0	40,4	49,0
13:00	56,0	71,2	81,5	16,0	24,9	32,0	38,0	46,1	53,5
14:00	60,5	73,0	83,1	17,0	25,3	32,0	42,0	47,6	54,0
15:00	60,0	72,3	80,0	16,5	24,3	31,0	40,0	47,0	53,0
16:00	60,0	69,5	77,0	14,0	23,1	30,0	38,0	45,1	51,0
17:00	56,5	63,0	70,0	13,0	21,5	27,0	36,0	41,5	47,0
18:00	48,0	52,6	57,5	11,0	19,0	25,0	29,0	33,5	41,0
19:00	38,0	43,1	47,0	9,5	17,6	24,0	22,0	25,5	32,5
20:00	31,0	36,7	40,0	8,0	16,8	23,0	16,0	19,1	26,5
22:00	27,0	30,4	33,0	7,5	16,0	22,0	10,0	14,4	18,0
24:00	23,0	26,3	30,0	6,5	15,5	20,0	6,0	10,8	13,5
02:00	20,0	23,6	27,0	6,0	14,8	17,5	5,0	8,8	10,5
04:00	20,0	22,3	25,0	5,0	14,5	17,5	4,0	7,8	9,5
06:00	19,0	21,1	24,0	5,0	13,9	17,5	4,0	7,2	8,5

A P Ê N D I C E 4

DADOS METEOROLÓGICOS MÉDIOS
PARA A REGIÃO DE CURITIBA

QUADRO 17 - Dados meteorológicos médios para Curitiba (1946 / 61) (adaptado de HOLZMANN & GUARITA²³).

FATORES	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.
Temperatura média (°C)	20,4	20,1	19,0	16,3	14,2	13,1	12,8	14,1	15,4	16,2	17,6	18,9
Temperatura máx.média (°C)	26,6	26,1	24,6	22,5	20,4	19,3	19,1	21,2	21,8	22,5	23,9	25,1
Temperatura mín. média (°C)	16,5	16,3	15,6	12,9	10,5	9,2	8,2	9,5	11,2	12,5	13,4	14,9
Umidade Rel. média (%)	82	83	84	83	82	84	79	77	79	82	79	79
Precipitação média (mm)	203,2	188,3	137,3	85,3	90,8	99,8	91,0	80,0	128,7	126,9	101,1	152,8

A P Ê N D I C E 5

CORRELAÇÃO PARCIAL

QUADRO 18 - Efeito do teor de umidade da madeira na correlação entre a insolação e Δt .

EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	R	R ²	S _{xy}	F	Correl. parcial para χ_2	Teste de hipótese F
$Y_1 = 13,14524 + 1,09350\chi_1$	0,69	0,48	4,275	62,1	-	-
$Y_2 = 18,53405 + 1,01707\chi_1 - 0,12189\chi_2$	0,83	0,69	3,314	74,1	- 0,64	44,8**

Y_1 e Y_2 - diferença de temperatura (t)

χ_1 - insolação

χ_2 - teor de umidade da madeira

** - significante ao nível de 99%

A P Ê N D I C E 6

QUADRO DAS MÉDIAS DE COMPRIMENTO DAS RACHA-
DURAS, EMPENOS EM ARCO, EM CANOA E TORCIDO,
EM mm, NOS TRÊS PROCESSOS DE SECAGEM

QUADRO 19 - Comprimento médio das rachaduras em mm, nos três processos de secagem.

MÉTODOS	R E P E T I Ç Ã O		
	I	II	III
Ar livre	63,8	56,7	49,7
Solar	16,4	13,6	20,1
Convencional	19,8	16,5	14,5

QUADRO 20 - Média dos empenos em arco em mm, nos três processos de secagem.

MÉTODOS	R E P E T I Ç Ã O		
	I	II	III
Ar livre	1,62	2,01	2,06
Solar	1,86	1,70	1,69
Convencional	1,55	1,40	1,76

QUADRO 21 - Média dos empenos em canoa em mm, nos três processos de secagem.

MÉTODOS	R E P E T I Ç Ã O		
	I	II	III
Ar livre	0,18	0,17	0,14
Solar	0,62	0,59	0,57
Convencional	1,51	1,32	1,26

QUADRO 22 - Média dos empenos torcido em mm, nos três processos de secagem.

MÉTODOS	R E P E T I Ç Ã O		
	I	II	III
Ar livre	0,64	0,71	0,46
Solar	3,15	3,38	3,14
Convencional	5,45	4,85	5,15

A P Ê N D I C E 7

ANÁLISE DA VARIÂNCIA E TESTES DE TUKEY

A₁ - Avaliação do sistema de isolamento da mini-estufa.

ANÁLISE DA VARIÂNCIA

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	35,28	17,64	196**
Erro	6	0,58	0,09	
TOTAL	8	35,86		

TESTE DE TUKEY: Comparação de médias (horas)

	3 plásticos lã de rocha (6,9)	2 plásticos lã de rocha (3,0)	3 plásti- cos isopor (2,5)
3 plásticos isopor (2,5)	4,4**	0,5 ^{ns}	-
2 plásticos lã de rocha (3,0)	3,9**	-	
3 plásticos lã de rocha (6,9)	-		

** - significante ao nível de 99%

ns - não significante.

A₂ - Comprimento médio das rachaduras (mm) -

Comparação entre a secagem ao ar livre, solar e convencional.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA:

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	3186,76	1593,38	70,8**
Erro	6	135,00	22,5	
TOTAL	8	3321,76		

TESTE DE TUKEY:

		Ar livre (56,7)	Convencional (16,9)	Solar (16,7)
Solar	(16,7)	40,0**	0,2 ^{ns}	-
Convencional	(16,9)	39,8**	-	
Ar livre	(56,7)	-		

** - significante ao nível de 99%

ns - não significante.

A₃ - Média dos empenos em arco (mm)

Comparação entre a secagem ao ar livre, solar e convencional.

ANÁLISE DA VARIÂNCIA:

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,16	0,080	2,42 ^{ns}
Erro	6	0,20	0,033	
TOTAL	8	0,36		

ns - não significativa.

A₄ - Média dos empenos em canoa (mm)

Comparação entre a secagem ao ar livre, solar e convencional.

ANÁLISE DA VARIÂNCIA:

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	2,22	1,11	222**
Erro	6	0,03	0,005	
TOTAL	8	2,25		

TESTE DE TUKEY:

		Convencional (1,36)	Solar (0,59)	Ar livre (0,16)
Ar livre	(0,16)	1,20**	0,43**	-
Solar	(0,59)	0,77**	-	
Convencional	(1,36)	-		

** - significante ao nível de 99%

A₅ - Média dos empenos torcido (mm)

Comparação entre a secagem ao ar livre, solar e convencional.

ANÁLISE DA VARIÂNCIA:

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	31,24	15,62	372**
Erro	6	0,25	0,042	
TOTAL	8	31,49		

TESTE DE TUKEY:

		Convencional (5,15)	Solar (3,22)	Ar livre (0,60)
Ar livre	(0,60)	4,55**	2,62**	-
Solar	(3,22)	1,93**	-	
Convencional	(5,15)	-		

** - significante ao nível de 99%

A P Ê N D I C E 8

- 1) QUADROS DOS CUSTOS DE INVESTIMENTO
PARA OS TRÊS PROCESSOS DE SECAGEM
- 2) CÁLCULO DOS CUSTOS DE SECAGEM

QUADRO 23 - Investimento para a secagem ao ar livre.

DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE m ³	VIDA ÚTIL anos	CUSTO Cr\$
Fundação	0,1167	5	1.750,50
Cobertura	0,12	5	1.800,00
Sarrafos	0,15	5	2.250,00
Instalação	-	5	507,00
INVESTIMENTO TOTAL/PILHA			6.307,50

QUADRO 24 - Investimento para a secagem em estufa solar.

DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	VIDA ÚTIL anos	CUSTO Cr\$
Plástico PVC	227m ²	5	33.369,00
Madeira p/estrutura	-	5	59.057,00
Chapa compensado	14m ²	5	6.000,00
Tinta, prego, etc.	-	5	4.075,00
Instalação	-	5	28.392,00
Isolante lâ de rocha	36m ²	10	4.320,00
Tijolos	3.000	10	15.000,00
Cimento	-	10	2.000,00
Ventilador 0,5HP	2	10	30.000,00
Base de cimento	21,32m ²	10	10.660,00
Termostato	1	10	3.000,00
Carrinho transport.	1	10	20.000,00
Sarrafos	0,5m ³	1	7.500,00
INVESTIMENTO TOTAL/ESTUFA			223.373,00

QUADRO 25 - Investimento para a estufa convencional.

DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	VIDA ÚTIL anos	CUSTO Cr\$
Acessórios essenciais (ventilador, radiador, tubulações, porta, painel de controle, carrinho, etc.)	-	5	341.000,00
Motor	1	10	10.000,00
Caldeira	1	10	388.540,00
Construção alvenaria	22,75m ²	10	113.750,00
Sarrafos separadores	0,4m ³	1	6.000,00
INVESTIMENTO TOTAL			859.290,00

CÁLCULO DOS CUSTOS DE SECAGEM

1) Controle do processo: cálculos através da equação 5.

1.1. Secagem ao ar livre

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{0,5 \text{ h/mês} \times 12 \text{ meses} \times 23 \text{ pilhas} \times 126,75}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 54,66/\text{m}^3 \end{aligned}$$

1.2. Secagem solar*

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{2(0,5 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias} \times 126,75)}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 144,57/\text{m}^3 \end{aligned}$$

1.3. Secagem convencional

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{3 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias} \times 126,75}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 433,72/\text{m}^3 \end{aligned}$$

* Numerador sempre multiplicado por 2 porque são duas estufas.

2) Manutenção: cálculos através da equação 5.

2.1. Secagem ao ar livre

$$\text{Custo} = \frac{14 \text{ h/ano} \times 126,75}{320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 5,54/\text{m}^3$$

2.2. Secagem solar

$$\text{Custo} = \frac{2 (16 \text{ manutenções} \times 126,75)}{320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 12,67/\text{m}^3$$

2.3. Secagem convencional

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{(14 \text{ dias} \times 8 \text{ h} \times 126,75) + 5.000,00}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 59,98/\text{m}^3 \end{aligned}$$

3) Depreciação: cálculos através da equação 6.

3.1. Secagem ao ar livre (dados do Quadro 23).

$$D_{5 \text{ anos}} = \frac{6.307,50 \times 23 \text{ pilhas}}{5 \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 90,67/\text{m}^3$$

3.2. Secagem solar (dados do Quadro 24).

$$D_1 = \frac{2 (7.500,00)}{1 \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 46,87/\text{m}^3$$

$$D_5 = \frac{2 (130.893,00)}{5 \text{ anos} \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 163,61/\text{m}^3$$

$$D_{10} = \frac{2 (84.980,00)}{10 \text{ anos} \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 53,11/\text{m}^3$$

$$D_{\text{solar}} = \text{Cr\$ } 263,59/\text{m}^3$$

3.3. Secagem convencional (dados do Quadro 25).

$$D_1 = \frac{6.000,00}{1 \text{ ano} \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 18,75/\text{m}^3$$

$$D_5 = \frac{341.000,00}{5 \text{ anos} \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 213,12/\text{m}^3$$

$$D_{10} = \frac{512.290,00}{10 \text{ anos} \times 320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 160,09/\text{m}^3$$

$$D_{\text{convencional}} = \text{Cr\$ } 391,96/\text{m}^3$$

4) Juros sobre Capital: cálculos através da equação 7.

4.1. Secagem ao ar livre

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{70\text{m}^3 \times 20.000,00 \times 0,06 \times 12 \text{ meses}}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 3.150,00/\text{m}^3 \end{aligned}$$

4.2. Secagem solar

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{20\text{m}^3 \times 20.000,00 \times 0,06 \times 12 \text{ meses}}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 900,00/\text{m}^3 \end{aligned}$$

4.3. Secagem convencional

$$\begin{aligned} \text{Custo} &= \frac{7,12\text{m}^3 \times 20.000,00 \times 0,06 \times 12 \text{ meses}}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 320,40/\text{m}^3 \end{aligned}$$

ENERGIA

a) Secagem ao ar livre: nulo

b) Secagem solar

$$\text{Custo} = \frac{2 (16 \text{ cargas} \times 353,16/\text{carga})}{320 \text{ m}^3} = \text{Cr\$ } 35,31/\text{m}^3$$

c) Secagem convencional

$$\begin{aligned} \text{Custo}_{\text{eletricidade}} &= \frac{45 \text{ cargas} \times 917,28/\text{carga}}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 128,99/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Custo}_{\text{vapor}} &= \frac{313,2 \text{ m}^3 \text{ de lenha} \times 1.000,00/\text{m}}{320 \text{ m}^3} = \\ &= \text{Cr\$ } 978,75 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Custo de energia da estufa convencional} = \text{Cr\$ } 1.107,74/\text{m}^3$$