



SONIA ROSE COSTA ARAUJO DOS SANTOS

**HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE
SECAGEM DE MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL**

**CAMPINAS
2012**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

SONIA ROSE COSTA ARAUJO DOS SANTOS

**HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE
SECAGEM DE MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL**

Orientador Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia civil, na área de Estruturas.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DE
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA SONIA ROSE COSTA
ARAUJO DOS SANTOS E ORIENTADA PELO PROF. DR. MAURO
AUGUSTO DEMARZO.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

So59h Santos, Sonia Rose Costa Araujo dos
Histórico e evolução dos equipamentos de secagem de
madeira para uso estrutural / Sonia Rose Costa Araujo
dos Santos. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Mauro Augusto Demarzo.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

I. Madeira - Secagem. I. Demarzo, Mauro Augusto,
1948-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.
III. Título.

Título em Inglês: History and evolution of equipment of wood drying for structural use

Palavras-chave em Inglês: Wood drying

Área de concentração: Estruturas

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora: Francisco Antonio Rocco Lahr, Gilmar de Oliveira Machado

Data da defesa: 23-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

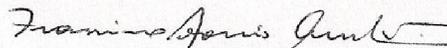
**HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE SECAGEM DE
MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL**

SONIA ROSE COSTA ARAUJO DOS SANTOS

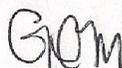
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo
Presidente e Orientador/FEC/UNICAMP**



**Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
EESC/USP**



**Prof. Dra. Gilmara de Oliveira Machado
UNICENTRO/PR**

Campinas, 23 de novembro de 2012

Dedicatória

Ao meu marido, Juarez, por seu profundo e sereno amor,
e a meus filhos, Érick e Larissa, razão do meu viver.

Agradecimento

- Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por seu ilimitado e misericordioso amor, proporcionando esperança, conforto e paz em todos os momentos;
- Ao Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo, por acreditar em mim tomando-me pela mão e mostrando-me o caminho da ciência. Fez parte da minha vida, sendo um exemplo de competência, paciência e carinho: nunca me esquecerei;
- À UNICAMP por proporcionar condições para o estudo e progresso no conhecimento da Secagem da Madeira;
- À querida amiga Profa. PhD. Francisca pela ajuda nas orientações técnicas de formatação, mas, principalmente pela amizade e palavras de incentivo: sempre;
- À Ms. Célia, minha tia querida, pelo carinho e atenção dados a todos meus pedidos de revisão, correção e tradução: você mora no meu coração;
- Ao Prof. Ms. Ronaldo Marinho dos Santos, pelo apoio “*on time*”, incentivos e orientações sempre prontos, desde o curso de graduação. Sigo seu exemplo;
- Ao estimado Prof. PhD. Rodrigo Silva, sua ajuda sábia, precisa e eficiente contribuiu maravilhosamente no início da minha pesquisa: palavras seriam poucas para agradecê-lo;
- À Madeireira Santa Rita (Itu), pela oportunidade, sem restrições, que abriu as portas para minha compreensão em secagem de madeira;
- À Benecke (Timbó), pela visita técnica que me ajudou no entendimento do equipamento da secagem da madeira;

- À Madeireira Uliana e Indusparket (Tietê), pela permissão da visita, e em especial o controlador Sebastião por ter me auxiliado no entendimento dos equipamentos e processo da secagem;
- À minha querida amiga Suzete, pela companhia e ajuda nos momentos que precisei: você é especial;
- Ao meu marido, por proporcionar condições para que conseguisse estudar e realizar as visitas: sou eternamente grata;
- Aos meus filhos queridos, Érick e Larissa, pelo carinho e compreensão quando me ausentava para estudar: meu coração bate por vocês;
- Aos meus pais, eternos professores e exemplos de vida, Prof. Ms. Wandyr Pires de Araujo e Profa. Clarice Costa Araujo, pelo ensino diário, vocês são a minha fonte de inspiração e sabedoria;
- Às minhas irmãs: Teté e Celinha, por sempre me estimular e encorajar ao crescimento intelectual, com compreensão e muito amor;
- Às amigas e irmãs do coração desde a infância: Ellen e Liliana, pelo incentivo e afeição sempre presentes;
- À Suzana, por me auxiliar, cuidando do meu lar, com dedicação e carinho, enquanto me dedicava a escrever esta dissertação;

“Na força dAquele que é a fonte de toda sabedoria,
toda graça, podem-se vencer defeitos e ignorância”

WHITE, E. G.

Resumo

SANTOS, Sonia Rose C. A. Histórico e Evolução dos Equipamentos Secagem de Madeira para Uso Estrutural. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2012. 132p. Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia Civil, 2012.

A variabilidade natural, a trabalhabilidade, as propriedades físicas e mecânicas, bem como características de utilidades estéticas e ambientais da madeira, encantam até hoje os pesquisadores no mundo. Ao longo dos séculos, a arte de secar a madeira em fornos foi sendo desenvolvida junto com as descobertas científicas e tecnológicas, com a associação de conhecimento elétrico e mecânico, chegando-se ao que temos hoje em dia. As razões fundamentais para secagem da madeira são: melhorar a estabilidade dimensional; redução de peso; possibilitar o processamento secundário; assegurar um melhor desempenho em uso de seus produtos. O objetivo deste trabalho é descrever a evolução dos equipamentos de secagem de madeira, considerando suas vantagens e desvantagens, por intermédio de visitas a empresas que possuem secadores, e entrevistar especialistas na área de secagem de madeira (nacionais e internacionais). Concluiu-se que os operadores são peças fundamentais para conduzir eficientemente o programa de secagem e interagir as variáveis do processo conseguindo um produto de qualidade para o uso estrutural ou manufaturado. E que, as propriedades físico-mecânicas da madeira devem ser consideradas para que seja alcançado um melhor desempenho do produto em uso.

Palavras-chave: secagem de madeira; equipamentos; madeira estrutural; processos.

Abstract

SANTOS, Sonia Rose C. A. History and Evolution of Equipment of Wood Drying for Structural Use. Campinas: Faculty of Civil Engineering - UNICAMP, 2012. 132p. Dissertation Faculty of Civil Engineering, 2012.

The natural variability, the workability, the physical and mechanical properties as well as aesthetic characteristics and environmental utilities of the timber, enchant up today the researchers in the world. Over the centuries, the art of dry wood in stoves was being developed with the scientific and technological discoveries, with the combination of electrical and mechanical knowledge, reaching up to what we have today. The fundamental reasons for drying wood are: improved stability, weight reduction, enabling secondary processing; ensure better performance in use of its products. The objective of this paper is to describe the evolution of wood drying equipment considering its advantages and disadvantages, through visits to companies that have dryers, and interviewed experts in the field of wood drying (national and international). It was concluded that operators are fundamental to efficiently conduct the drying program and interacting process variables getting a quality product for structural use or manufactured. And that the physical and mechanical properties of the wood, should be considered, order to reach a better performance of the product in use.

Keywords: wood drying; equipment; structural wood; processes.

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 1a Palhoça construída com técnicas primitivas	04
FIGURA 1b Construção de pau a pique	04
FIGURA 2 Construção casa de taipa na zona rural no município de Indiaroba-SE	05
FIGURA 3 Caravela Portuguesa, construída em madeira.....	07
FIGURA 4 Aparelho a vapor para secagem de madeira	14
FIGURA 5 Circulação forçada de ar com ventilador axial	15
FIGURA 6 Primeiros medidores elétricos.....	17
FIGURA 7 Controle de estufa com computador integrado a distância	18
FIGURA 8 Estufa a vapor da Serraria Lumber	19
FIGURA 9 Estufa de alta temperatura da Laminarco	20
FIGURA 10 Tora de Eucalipto de 30 anos	21
FIGURA 11 Secagem de madeira ao ar livre	22
FIGURA 12 Secador solar construído em Curitiba.....	28
FIGURA 13 Modelo de estufa solar	29
FIGURA 14 Madeira tabicada em secador convencional	32
FIGURA 15 Estufa convencional com portas de alumínio.....	33
FIGURA 16 Secador Convencional	34
FIGURA 17 Ventiladores laterais	35
FIGURA 18 Radiadores da secagem convencional	36
FIGURA 19 Termômetros: seco e úmido do secador convencional	38
FIGURA 20 Caldeira do secador convencional	39
FIGURA 21 <i>Dampers</i>	40

FIGURA 22	Empilhamento de madeira em estufa convencional.....	42
FIGURA 23	Pilha de madeira tabicada.....	44
FIGURA 24	Gabarito para o tabicamento da madeira.....	45
FIGURA 25	Tabiques	46
FIGURA 26	Estufas com câmaras por compartimento com portas de alumínio.....	47
FIGURA 27a	Estufa com carregamento por empilhadeira	48
FIGURA 27b	Estufa com carregamento por vagonete	49
FIGURA 28	Eixos e Planos fundamentais da madeira	58
FIGURA 29	Tipos de desdobro: Paralelo, Tangencial e Radial.....	64
FIGURA 30	Defeitos na madeira.....	71
FIGURA 31	Secagem e suas variáveis	75
FIGURA 32	Ponte de madeira em Marília-SP	76
FIGURA 33	Pilares e Vigas de madeira usados em construção.....	77
FIGURA 34	Cobertura com treliça de madeira.....	77
FIGURA 35	Piso de madeira	78
FIGURA 36	Porta de madeira	79
FIGURA 37	Blocks e Blanks.....	79
FIGURA 38	Deck de madeira.....	80
FIGURA 39	Moldura – Rodapé	80
FIGURA 40	Painel colado lateral.....	81
FIGURA 41	Ferramentas com cabo de madeira	81
FIGURA 42	Móveis destacando o pé da mesa central.....	82
FIGURA 43	Toras de madeiras de eucaliptos	83
FIGURA 44	Secador de alumínio	88
FIGURA 45	Madeira para batentes de portas	89
FIGURA 46a	Tabicamento da empresa 1	92
FIGURA 46b	Tabicamento da indústria 2.....	92
FIGURA 46c	Tabicamento da indústria 3.....	93
FIGURA 47	Secador convencional com capacidade para 150m ³	97

LISTA DE TABELAS

	página
TABELA 1 Dimensões e distâncias entre os tabiques, em função da espessura das peças e do tipo de madeira que compõe a carga.....	43
TABELA 2 Classes de Umidade.....	57
TABELA 3 Classes de resistência das coníferas	59
TABELA 4 Classes de resistência das folhosas.....	60
TABELA 5 Informações gerais das indústrias pesquisadas	94
TABELA 6 Custo dos equipamentos convencional, solar e á vácuo	96
TABELA 7 Custo operacional por m ³ de madeira em estufas convencionais.....	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	História da Secagem da Madeira.....	13
3.2	Secagem da Madeira Serrada.....	21
3.2.1	Secagem Natural ou ao Ar livre.....	22
3.2.2	Desumidificadores ou Secadores a baixas temperaturas	25
3.2.3	Secagem com aquecimento solar.....	27
3.2.4	Secagem Convencional	31
3.2.4.1	Câmaras de Secagem.....	33
3.2.4.2	Sistema de Ventilação.....	34
3.2.4.3	Meio de Aquecimento.....	35
3.2.4.4	Controle da Temperatura	37
3.2.4.5	Controle da Umidade Relativa do Ar	40
3.2.4.6	Empilhamento da Madeira nas Câmaras	42
3.2.4.7	Classificação das Estufas.....	46
3.2.5	Secagem a Alta Temperatura	50
3.3	Secagem de Madeira	52
3.3.1	Conceituando Secagem de Madeira	52
3.3.2	Considerações sobre o uso da madeira como material estrutural	53
3.3.2.1	Densidade	54

3.3.2.2	Umidade	55
3.3.2.3	Resistência.....	57
3.3.2.4	Rigidez	61
3.3.2.5	Combustão	61
3.3.3	Localizando água na madeira.....	62
3.3.4	Corte e desdobramento das toras	63
3.3.5	Fatores que Influenciam na Secagem da Madeira.....	65
3.3.6	Potencial de secagem	65
3.3.7	Rapidez de Secagem.....	66
3.3.8	Consequências da secagem de madeira.....	67
3.3.9	Defeitos de Secagem	69
3.4	Programas de Secagem.....	71
3.5	A Secagem da Madeira no Brasil e seus Produtos	73
4	METODOLOGIA	85
4.1	Consulta prévia.....	86
4.2	Levantamento em campo.....	87
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
5.1	Empresas visitadas	91
5.2	Entrevistas realizadas.....	98
5.3	Comentários sobre os desafios e oportunidades da secagem de madeira	104
6	CONCLUSÕES	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

A madeira dentre os materiais usados pelo homem, desde o início das civilizações até os dias de hoje, não só tem proporcionado à humanidade desenvolvimento vital quando falamos de defesa, aquecimento (fogo), moradia e instrumentos para aumentar a produção de alimento, mas também quando possuímos um material capaz de produzir desenvolvimento econômico-industrial que movimenta bilhões de dólares no mundo todo.

A variabilidade natural, a trabalhabilidade, as propriedades físicas e mecânicas, bem como características de utilidade estéticas e ambientais da madeira, encantam até hoje os pesquisadores no mundo. Além de ser um material privilegiado, pois é disponível em quase todo globo terrestre, é também uma fonte que pode ser renovável.

A cada ano, novos estudos desse valioso produto florestal nos setores primário e secundário da economia passam por constantes modificações e são muito oportunos, pois visam obter maior conhecimento e aprimoramento dos diversos processos que envolvem a industrialização da madeira para melhorar sua utilização.

A madeira sempre desempenhou um papel importante e significativo ao longo dos períodos da História. Foi utilizada desde o início da civilização e é considerada a mola propulsora do progresso e do desenvolvimento da humanidade. Historicamente e culturalmente, o lenho entrelaça os acontecimentos do mundo de modo vital e harmônico. A capacidade do homem em transmitir de geração para geração suas

experiências com relação à sua utilização, proporciona condições de contínuo progresso.

Perlin (1992) afirma que a madeira “é o herói não reconhecido da revolução tecnológica que nos impulsionou da cultura da pedra e do osso para nossa época presente”.

Desde a existência de animais, peixes, insetos, répteis, aves e propriamente o ser humano, a utilização das árvores se faz presente no desenvolvimento histórico do mundo. Como, por exemplo, as aves construindo seus ninhos, animais que passam a maior parte da vida nas copas das árvores e construções para abrigar o homem (PAULA e ALVES, 1997).

Todavia, a madeira utilizada nos primórdios, sem preservativos ou técnicas para aumentar sua utilidade, comprometia sua durabilidade e apressava sua deterioração; com isto, os arqueólogos até hoje encontram poucos artefatos ou produtos de madeira usados no início das civilizações.

De acordo com Lima (1919), na Mesopotâmia, entre os vales do Rio Nilo e Eufrates, foram encontrados os primeiros documentos escritos, instrumentos de pedra, louça de barro, que datam em torno de 4.000 antes de Cristo; entretanto, sabe-se que a madeira já era utilizada entre os primórdios dos povos.

Existem algumas hipóteses com relação às primeiras utilizações da madeira; contudo, na periodização clássica, a mais aceita supõe que o homem a usou como arma e combustível, no período da Idade da Pedra.

O uso da madeira como fonte de calor permitiu que seres humanos readaptassem o planeta Terra para o uso, como por exemplo: climas frios tornaram-se habitáveis; o barro foi convertido em cerâmica, para que pudessem ser fabricados

recipientes para o cozimento dos alimentos; importante fonte alimentícia como os cereais crus que puderam ser transformados em assados.

O fogo transformou a vida do homem, pois, além de aquecimento e meio de melhorar a alimentação, tornou-se arma de defesa contra animais. Os progressos técnicos foram sendo alcançados. Aprendeu-se a talhar madeira, trançar cestos, aprimorar ferramentas e aumentar o rendimento do trabalho (RESENDE e MORAES, 1975).

A necessidade do homem em abrigar-se, após o uso das cavernas (abrigo natural), em que se protegia de animais e intempéries, fez com que suas construções, de modo intuitivo e empírico, fossem executadas de madeira e pedra, com fundações simples, sem registro de conhecimento algum sobre comportamento ou preservação do material utilizado nesta época. Segundo Resende e Moraes (1975), cabanas de taipa foram construídas próximas ao trabalho do homem, estimuladas pelo plantio de alimentos.

Cunha (2009) relata que os povos primitivos faziam abrigos, feitos com galhos, cascas e troncos de árvores com ossos de animais abatidos, fixados no terreno de forma ordenada, com a ajuda de pedras quebradas e seixos rolados. Por vezes, utilizavam barro misturado com capim para vedar os orifícios deixados pelo entrelaçamento do material e pele de animais.

Por sua vez, as construções de cabanas eram basicamente compostas de uma estrutura formada por esteios de varas flexíveis fixadas no chão, e amarradas na parte superior pelas pontas podendo ser de vários formatos. A ilustração das Figuras 1a e 1b mostram uma construção com base retangular. O conhecimento para a construção dependia da cultura dos povos, etnia, tradição da aldeia e do uso de arbustos disponíveis na vegetação do entorno (CUNHA, 2009).



FIGURA 1a Palhoça construída com técnicas primitivas. (foi utilizado ramas de capim seco sobre galhos de madeira, com a cobertura em duas águas). Região de Caxito, situada 50 km ao norte de Luanda, Angola.

Fonte: Cunha, 2009.



FIGURA 1b Construção de pau a pique. Estrutura de base retangular. África.

Fonte: Cunha, 2009.

Muitas destas construções são utilizadas até hoje em várias partes do mundo, como na África, Portugal e no Brasil (principalmente região nordeste). A Figura 2 mostra uma casa de taipa no nordeste.



FIGURA 2 Construção casa de taipa na zona rural no município de Indiaroba-SE.
Site: www.infonet.com.br, 2012.

As primeiras civilizações que se tem conhecimento, instaladas na Mesopotâmia e Egito, iniciaram também com madeira, as construções de barcos, que possibilitaram as migrações para diversas partes do globo, como América do Norte e posteriormente a América do Sul (MORAES, 1993).

A Idade do Bronze e a Idade do Ferro foram marcadas pela fundição dos metais bronze e ferro, retirados das rochas, para fabricação de instrumentos, revolucionando as ferramentas usadas na agricultura, embarcações e nas construções. A associação dos metais com a madeira alavancou as mudanças que vinham se processando, pois o que seria dos arqueiros se faltasse madeira para seus arcos, a indústria de lã sem

madeira para seus teares e dos camponeses que cultivavam a terra sem as ferramentas com cabos de madeira? (PERLIN, 1992).

O período da Idade Média, século V (476 d.C.) a XV (1453 d.C.), onde os senhores feudais, o clero eram os dominantes sociais e as guerras e pestes eram frequentes, foi considerada época da escuridão, isto é, pouco desenvolvimento e descobrimentos científicos.

Inicia-se então a Idade Moderna, do século XV ao século XVIII, onde se abarca a invenção da imprensa, muitos descobrimentos marítimos com o aperfeiçoamento das embarcações de madeira, o Renascimento e a Gênese do Capitalismo. Nesta época, a madeira continuava a ter um papel muito importante no comportamento das sociedades e na economia. Portugal e Espanha se destacaram neste setor econômico (RESENDE e MORAES, 1975).

Nesta época, Portugal, em especial, se encontrava na liderança dos descobrimentos, porque era o primeiro entre os países contemporâneos a transformar a pesquisa tecnológica e científica em política de estado. As caravelas portuguesas tinham 20m a 30m de comprimento, 6m a 8m de largura, capacidade para carregar 50 toneladas levava entre 40 a 50 homens a bordo e eram feitas de troncos de madeira atados entre si (Figura 3). Os cascos eram reforçados e montados segundo indicações precisas e para sua construção eram utilizadas madeiras às vezes de até oito tipos de árvores diferentes, uma para cada parte da estrutura. As árvores só eram cortadas em uma determinada hora do dia e em alguns casos os troncos eram enterrados na areia durante um período de cerca de um ano para adquirirem uma textura ressecada e desta maneira eram capazes de resistir à umidade e a corrosão (PERLIN, 1992).



FIGURA 3 Caravela Portuguesa, construída em madeira.

Site: www.brasilecola.com, 2012.

A atração que a madeira desempenhou entre os europeus, levou a Inglaterra a se interessar pela América do Norte durante os séculos XVII e XVIII. O zelo dos ingleses se deve principalmente pela escassez de seu estoque de madeira de lei e a conscientização da enorme quantidade de árvores que havia na América do Norte. As causas e os objetivos de revoluções de romanos, gregos e franceses ficaram claros quando se levava em conta a presença ou ausência do abastecimento da madeira. Por isso, muitos escritores relatam “que as florestas sempre retrocedem à medida que as civilizações se desenvolvem e crescem” (PERLIN, 1992).

De acordo com Souza (1947), na América do Sul e, mais especificamente, no Brasil, é fato comprovado que logo após o descobrimento, em 1500, as florestas já começaram a ser exploradas. Tanto que a origem do nome do Brasil foi oriunda do pau-brasil, nome científico *Caesalpinia echinata L.*, em menção à cor de brasa da madeira.

O monopólio da coroa Portuguesa no Brasil perdurou até 1822; até lá, a madeira do Brasil era um importante artigo de comércio e foi cruelmente explorada. Os lucros auferidos pelos negócios iriam atrair navios franceses, espanhóis e ingleses para contrabandear a tão preciosa madeira do Brasil. Entretanto, com a colonização, as capitâneas tomaram providências para evitar a saída ilegal do pau Brasil, através de regulamentos e providências adotadas pelo governo. Infelizmente, foram atitudes com poucos resultados, no que diz respeito ao controle de saída do valioso material (SOUZA, 1947; PAULA e ALVES, 1997).

A Idade Contemporânea teve seu início no final do século XVIII até nossos dias, e uma de suas características é o desenvolvimento do capitalismo, onde ocorreram grandes desenvolvimentos científico e industrial. Nesta época, aconteceram descobertas e avanços tecnológicos que trouxeram auxílio substancial no progresso da transformação da madeira, tanto na técnica que envolve o maquinário de transformação (medição, corte, colagem, etc.) como também no processo da secagem em si. Pesquisadores e cientistas inventavam seus aparelhos e os utilizavam para o crescimento de vários setores produtores.

O microscópio, por exemplo, inventado pelo holandês fabricante de óculos em 1590, ganhou lentes de aumento em 1825, proporcionando uma visão fantástica e compreensão incrível da estrutura e composição química da madeira (LEPAGE, 1986).

A eletricidade também desempenhou um papel muito importante no processo de secagem, pois possibilitou o uso dos ventiladores e motores que auxiliaram no tempo de secagem da madeira serrada nas câmaras.

Ao longo dos séculos, a arte de secar a madeira em fornos foi sendo desenvolvida junto com as descobertas científicas e tecnológicas que pesquisadores e estudiosos foram experimentando, com a associação de conhecimento elétrico e mecânico, chegando-se ao que temos hoje em dia. É também importante salientar o

uso correto de programas de secagem conforme o tipo de madeira, para obter o teor de umidade requerido para o uso.

O desenvolvimento da tecnologia da secagem de madeira, de modo a competir com produtos de melhor qualidade para o consumidor brasileiro, aconteceu próximo ao surgimento do movimento pela proteção e defesa dos direitos do consumidor.

Enquanto que nos Estados Unidos e na Europa o consumismo data do final do século XIX e já se firmava nas primeiras décadas do século XX, no Brasil, até a década de 1970, as iniciativas nesta área surgiram de forma isolada e pouco consolidadas, sendo lideradas pelo poder público. No fim da década de 1970, o governo estabeleceu firmemente órgãos públicos de proteção ao consumidor como o PROCON. Mas, somente na década de 1980 que o movimento se fortaleceu e fixou-se a Lei nº 8.078 de 11/09/1990 do Código de Defesa do Consumidor – CDC. Desde a promulgação do CDC, muitas mudanças aconteceram, especialmente no cenário sócio econômico do setor madeireiro (Porto, et al., 2012).

Nestes últimos anos, a adaptação das empresas ao novo perfil da sociedade e o melhoramento da comunicação e do relacionamento com o consumidor foram decisivos para o desenvolvimento da tecnologia da madeira, com produtos de melhor qualidade para construção civil.

O uso da madeira como elemento estrutural, em que o desenvolvimento de equipamentos para controle o teor de umidade trouxe avanços substanciais e efetivos com relação à secagem, têm na Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190/1997 - Projeto de estruturas de madeira, as orientações e recomendações a serem seguidas em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas. Levando-se em consideração as classes de umidade, com a função de ajustar as propriedades físicas, de resistência e de rigidez através de ensaios normalizados.

Mas, para atingir padrões rígidos de qualidade exigidos, é necessário um equilíbrio entre a madeira, o equipamento e a forma como é conduzido o processo de secagem. Isto é, ter conhecimento sobre as características da madeira, funcionamento do equipamento e o conhecimento sobre a termodinâmica da secagem (JANKOWSKY, 1995).

A adequada secagem da madeira serrada, antes de se transformar em bens e produtos, é reconhecidamente a fase mais importante de todo processo de secagem, pois agrega maior valor ao produto final (JANKOWSKY, 1995). Com o processo realizado por estufas e conduzido de maneira correta, obtém-se considerável redução do tempo, apresenta produtos com melhores índices de qualidade e assegura maior controle sobre os defeitos (ANDRADE, 2000).

O caminho do desenvolvimento é longo para o objetivo final de estufas inteligentes, no qual deverá ser considerado o alto custo dos equipamentos, pesquisas, acompanhamentos e discussões de novas técnicas que possam ter como objetivo perceber e ajustar os programas por si só. Mas, observa-se que a intervenção humana (presença do controlador) sempre terá importância vital no processo de secagem.

Pode-se afirmar que para os próximos anos, ou mesmo décadas, existirá uma demanda com ritmo forte no desenvolvimento de equipamentos de secagem confiáveis, e que ofereçam produtos capazes de satisfazer as elevadas expectativas dos compradores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi descrever a evolução dos equipamentos de secagem de madeira, considerando as vantagens e desvantagens através de revisão bibliográfica, visitas a empresas que possuem secadores e entrevistas com especialistas na área de secagem de madeira.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Descrever a história da secagem da madeira;
- b) Identificar os equipamentos utilizados;
- c) Comparar os modelos, relacionando pontos favoráveis e desfavoráveis.
- d) Visitas técnicas a empresas que realizam a secagem de madeira;
- e) Importância da secagem da madeira para uso estrutural na construção civil;
- f) Entrevistas com especialistas em secagem de madeira (nacionais e internacionais).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 História da Secagem da Madeira

A secagem da madeira, que se tem registro, inicialmente era feita ao ar livre. Mas, com a percepção da importância comercial, industrial e econômica relacionada à madeira, a secagem ao ar foi sendo substituída quando o volume de produção de madeira serrada aumentou. O tempo tornou-se um fator limitante para atender à demanda, e os requisitos de qualidade eram solicitados pelo seguimento madeireiro (LOUZADA, et al., 2002). Entretanto, muitos estudos e pesquisas apostam na associação desses dois métodos (secagem ao ar e a secagem em estufas), para obter produtos de qualidade e livre de defeitos.

A primeira instalação técnica registrada na literatura de aceleração do processo de secagem ocorreu no fim da Idade Moderna e início da Idade Contemporânea, no século XVII. Duhamel du Monceau¹, em 1777, aplicou calor em pilhas de madeiras para agilizar a secagem. Não havia a circulação forçada de ar, pois não havia energia elétrica e motores para o funcionamento dos ventiladores. Por conseguinte, as primeiras câmaras tiveram que usar a convecção natural a fim de alcançar um resultado razoável de secagem (Figura 4). A convecção natural é a transmissão do calor nos líquidos pelo movimento devido a gradientes de temperatura ou circulação das partes

¹ Henri-Louis Duhamel du Monceau, botânico e químico francês, pai fundador da silvicultura (1700-1782).

aquecidas, no qual o movimento do fluido não é gerado por fonte externa (WELLING e VANEK, 1999).

De acordo com Alzueta (1942), nos métodos antigos, as peças de madeira eram colocadas em estufas submetidas à ação direta ou indireta de calor num só lugar, o que apresentava certos inconvenientes, porque a temperatura não ficava uniforme dentro da estufa. Algumas peças secavam primeiro que as outras.

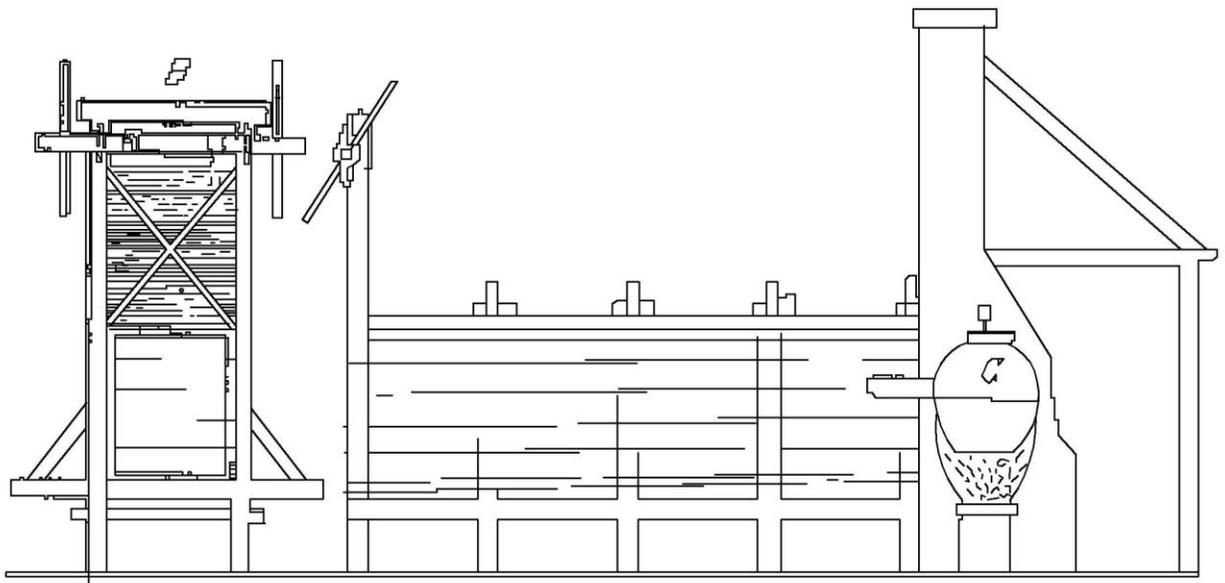


FIGURA 4 Aparelho a vapor para secagem de madeira (Diário comercial na Bavária, 1816).

Fonte: Welling e Vanek, 1999.

Um importante progresso na arte de estufas de secagem foi alcançado pela aplicação de eletricidade nos ventiladores (Figura 5). A circulação forçada de ar conduziu a um aumento na velocidade de secagem. Como consequência, o processo teve que ser controlado com mais precisão através de termômetros tanto para controle

da temperatura como para instrumentos controladores de umidade da estufa, para que os defeitos da madeira pós-secagem fossem minimizados.

Os primeiros equipamentos elétricos foram empregados a partir das primeiras décadas do século XX, mas os tipos mais modernos que se tem hoje em dia foram introduzidos somente em 1950.

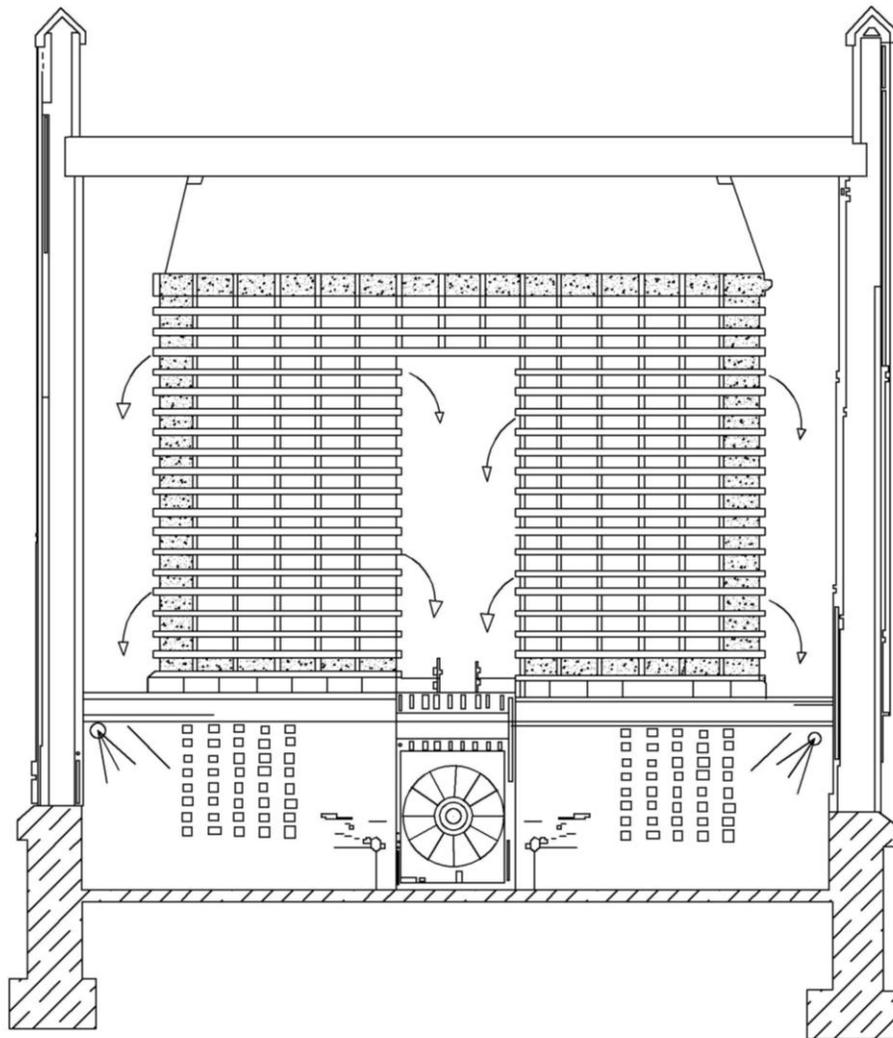


FIGURA 5 Circulação forçada de ar com ventilador axial (secagem em estufa manual em 1923).Fonte: Welling e Vanek, 1999.

Controladores mecânicos foram inventados, e estes facilitaram a inspeção das condições de secagem, que conduziram para redução do tempo de secagem. Habilidades individuais e perícia dos operadores foram transformadas em regras práticas escritas que conduziram à repetitividade de resultados e tornaram previsível o tempo de secagem. Isto é, os resultados da secagem da madeira estavam intimamente ligados à experiência do operador, pois ele julgava o processo de secagem, a madeira inserida na estufa, examinava a carga e estimava a temperatura que deveria atingir (WELLING e VANEK, 1999).

Com isso, foram sendo desenvolvidos programas de secagem de madeira, que permitem atualmente agrupar espécies que têm características similares de comportamento, pelo conhecimento anatômico e estrutural das fibras. O agrupamento de espécies deve ser considerado pelas indústrias e atualmente apresenta vantagens como redução de estoque, pois não é mais necessário ter estoques altos de material homogêneo. Ainda predispõem à utilização de um número maior de espécies, favorecendo melhor aproveitamento dos recursos florestais (ANDRADE, 2000).

O progresso da tecnologia que envolve as câmaras de secagem ao longo do tempo trouxe euforia para os fabricantes, pois poderiam até substituir os operadores com auto ajuste independentes e auto controladores. Entretanto, logo este otimismo desapareceu porque a complexidade do processo de secagem combinada com a alta variabilidade das propriedades das madeiras tornou quase impossível uma fórmula universal com parâmetros relevantes e precisão suficiente para controlar o processo de secagem (WELLING e VANEK, 1999).

Simultaneamente a este progresso, os ventiladores, depois de algumas experiências, foram colocados no teto ou posicionados na lateral em relação à madeira, e até hoje esta mesma disposição ocorre na maioria das instalações industriais de secagem com calor e ventilação.

Somente depois da introdução do medidor elétrico para determinar o teor de umidade, foi possível maiores avanços técnicos de secagem. O teor de umidade baseado no tempo de secagem e os controladores de temperatura promoveram redução do tempo de secagem de meses para semanas, e um controle mais próximo das condições de secagem. Novamente, uma parte importante da habilidade individual e perícia do operador foram transformadas em regras (WELLING e VANEK, 1999).



FIGURA 6 Primeiros medidores elétricos.

Fonte: Welling e Vanek, 1999.

Na Europa Ocidental, os projetos de fornos mudaram consideravelmente. A construção de tijolos predominava e eram pobres em propriedades de isolamento, que requeriam alta manutenção e corroíam. Então se idealizou uma construção completa de alumínio, porque apresentava excelentes propriedades anticorrosivas quando eram submetidas a duras condições de temperatura alta e a presença de umidade (ALZUETA 1942).

Outro impulso importante nos equipamentos de secagem aconteceu com a invenção do computador. Talvez não somente importante, mas uma revolução fantástica no controle da secagem de madeira pois, em poucos minutos, monitoramentos completos são mostrados, possibilitando uma avaliação detalhada das condições de umidade do material e posterior ajuste e decisões de extrema importância a serem tomadas, para se conseguir um produto de qualidade.



FIGURA 7 Controle de estufa com computador integrado a distância.

Fonte: Welling e Vanek.1999.

De acordo com Bardi (1982), o Brasil no começo do século XX desenvolveu equipamentos para atender o mercado madeireiro e com isso grande desmatamentos

de florestas eram realizados, aquecidos pelo crescimento industrial, felizmente, no mesmo período pensou-se no eucalipto da Austrália. Quando se menciona eucalipto, imediatamente se associa à figura de Edmundo Navarro de Andrade. Navarro de Andrade, como era conhecido, era um botânico ativo e consciente, foi nomeado aos 23 anos como diretor do horto Florestal da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Visionário, identificou o consumo de milhões de metros cúbicos de lenha para as caldeiras das locomotivas, construções de vagões, dormentes, postes e até estações, então importando da Austrália centenas de espécies, escolheu as que mais se adaptavam ao solo brasileiro.

Com isso, o cultivo precisou de intensa atividade científica para ajustar as características das espécies, com relação à qualidade da semente, técnica de semeadura, enraizamento e enxertia. Observa-se na Figura 8, uma estufa a vapor em 1918 e Figura 9 uma estufa de alta temperatura (BARDI, 1982).

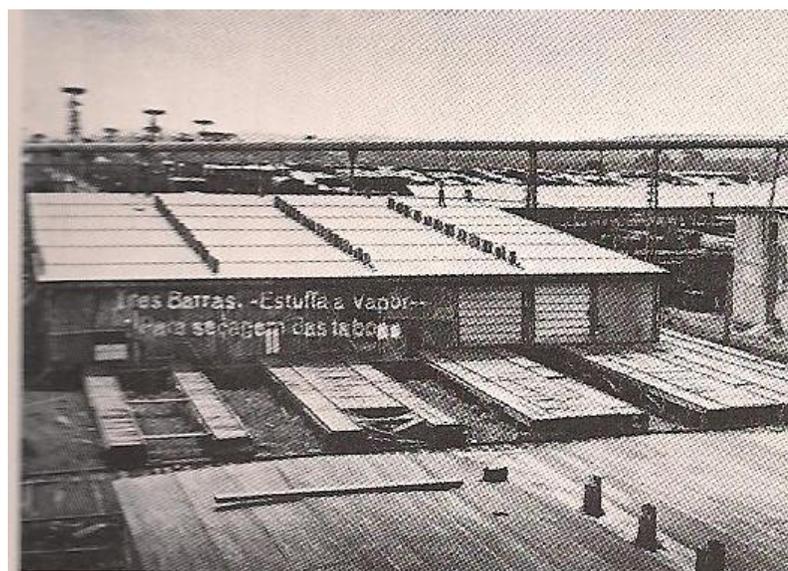


FIGURA 8 Estufa a vapor da Serraria Lumber, Três Barras (SC), 1918.

Fonte: P. M. Bardi, 1982.

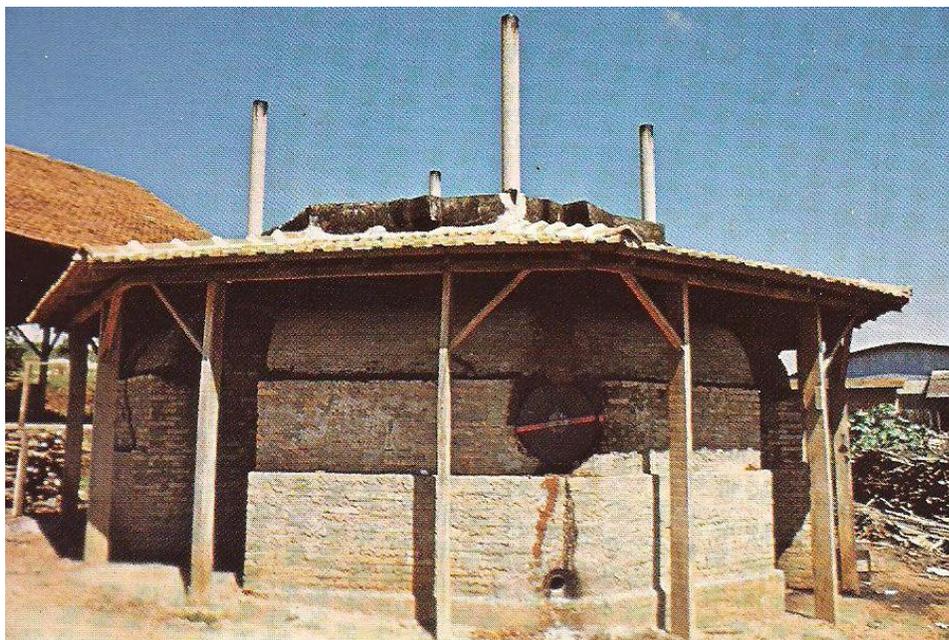


FIGURA 9 Estufa de alta temperatura da Laminarco Madeira Industrial,
Itararé-SP.

Fonte: Bardi , P. M, 1982.

Hoje as florestas plantadas são resultado de uma história de aprendizado recente. Existem no Brasil há aproximadamente um século. Entretanto, o seu uso sustentável foi introduzido no país há 50 anos, quando os cursos superiores começaram a formar profissionais especializados. As árvores são cultivadas seguindo planos de manejo sustentável, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e promover o desenvolvimento econômico e social das comunidades vizinhas (BARDI, 1982).

O aumento de florestas plantadas no planeta indica a sua capacidade de proporcionar benefícios à humanidade no sentido vital: manutenção da biodiversidade, proteção da água e equilíbrio do clima. A madeira como material renovável é uma fonte inesgotável para o abastecimento humano se seu uso acontecer de forma sustentável e eficiente nos processos onde ela se faz necessária (Figura 10).



FIGURA 10 Tora de Eucalipto de 30 anos. Madeireira Santa Rita – Itu. 2011.
(Foto da autora).

3.2 Secagem de Madeira Serrada

Klitzke (2003) classifica a secagem de acordo com a temperatura: secagem natural ou ao ar livre, secagem a baixas temperaturas, secagem convencional e secagem a altas temperaturas.

3.2.1 Secagem Natural ou ao Ar livre

A secagem natural ou ao ar livre baseia-se na exposição da madeira à ação dos fatores climáticos de um determinado local, com o objetivo de remover a maior quantidade de água possível por meio das forças da natureza (PONCE e WATAI,1985).

Na secagem ao ar, o controle é limitado ou inexistente, mas considerando a qualidade do produto final, não é inferior à estufa. No Brasil, devido às condições climáticas favoráveis, esse tipo de secagem é muito utilizado como pré-secagem ou secagem definitiva, dependendo do produto final que se deseja, mas é variável conforme a estação do ano. O investimento é baixo em relação à secagem convencional e se processa num período de tempo relativamente longo (SANTINI, 1981).



FIGURA 11 Secagem de madeira ao ar livre.

Site: www.madeireirafalsarella.com.br, 2012.

A formação do pátio de secagem deve considerar as condições climáticas do local (umidade relativa e temperatura), regime de chuvas, localização e velocidade do ar (ventos). Quando a umidade relativa e a temperatura forem constantes, a velocidade do ar é um fator determinante na velocidade da secagem. Por isso, é necessário que o pátio de secagem seja formado na orientação predominante dos ventos (KLITZKE, 2003).

Para Gomide (1974), a velocidade da secagem é afetada por alguns fatores como:

- Modo como são empilhadas: deixar espaços vazios entre as tábuas acelera a secagem;
- Localização das pilhas nos pátios: nas margens do pátio secam mais rápido;
- Distância entre o solo e as bases das pilhas: deve ser de 30 cm para que aconteça livre movimento de ar na parte inferior e a renovação de ar sob as mesmas;
- Superfície do pátio de secagem: plano, sem vegetação ou poças de água e coberto por materiais escuros apressam a secagem;
- Localização do pátio: lugar alto, bem drenado e longe de edificações e árvores favorecem a redução do tempo de secagem;

Klitzke (2003) afirma que a maneira de executar o empilhamento da madeira também é um fator básico para a secagem ao ar. Diferentes tipos de empilhamento permitem maior amplitude no controle sobre a secagem. Os principais tipos de empilhamento são:

- Pilhas planas com separadores;
- Pilhas verticais com separadores;
- Empilhamento horizontal em gaiola;
- Tesouras.

O principal objetivo da secagem da madeira ao ar livre é fazer com que a maior quantidade possível de água evapore utilizando-se as forças da natureza (PONCE e WATAI, 1985).

Conforme Gomide (1974) na secagem ao ar livre a madeira atinge a umidade de equilíbrio lenta e suavemente. A evaporação da umidade superficial é absorvida pela atmosfera local e, ao mesmo tempo, a movimentação da umidade interior para as zonas superficiais.

Além dos fatores ambientais, há também a influência de fatores inerentes à madeira que devem ser considerados na secagem ao ar como: componentes anatômicos, massa específica, espécie, dimensões da peça, permeabilidade e presença de casca (KLITZKE, 2003).

As vantagens e desvantagens da secagem ao ar livre com relação à secagem convencional podem ser listadas a seguir (STEIN, 2003):

- Vantagens
 - Redução da umidade inicial da madeira;
 - Diminuição dos custos de transporte;
 - Minimiza o ataque de fungos manchadores;
 - Aproveitamento das condições ambientais.

- Desvantagens
 - Impossível controlar as condições ambientais;
 - Necessita de grandes áreas para estocagem e empilhamento da madeira;
 - Ocorrência de defeitos devida à falta de controle das condições de secagem;
 - Tempo de secagem elevado;
 - Teor de umidade final alto, limitando em muitos casos o uso.

3.2.2 Desumidificadores ou Secadores a baixas temperaturas

Para Jankowsky (1995), os desumidificadores são similares aos secadores convencionais, mas existem diferenças que devem ser analisadas em separado. O equipamento consiste de um compressor, uma válvula de decompressão e de dois trocadores de calor (vaporizador e o condensador), dutos e ventiladores para que o ar frio e úmido seja retirado da câmara e insuflado o ar quente e seco. O ar desumidificado é aquecido por intermédio de um resistor elétrico.

Normalmente os ventiladores são posicionados acima das pilhas de madeira e não existe a troca de ar entre a câmara e o ambiente exterior, pois a umidade do ar é retirada pelo desumidificador. O ar circula através das pilhas de madeira e, à medida que o ar retira a umidade da superfície, torna-se frio e ocorre a sucção pelo desumidificador (JANKOWSKY, 1995).

Conforme Klitzke (2003), os ventiladores operam a uma velocidade baixa e o movimento do ar no interior da câmara é em torno de 0,5 até 1,0 m/s e deve ser constante. Estes equipamentos possuem grandes capacidades de secagem: em torno de 1000 m³ e o tempo de secagem acontece em algumas semanas. O equipamento é de baixo custo em relação à secagem convencional.

A secagem de madeira tem como finalidade reduzir a umidade da madeira até o teor de umidade de equilíbrio. O tempo de secagem fica em torno de semanas e quando bem conduzido é possível conseguir um produto de qualidade. Como a capacidade para armazenar a madeira é grande existe a facilidade em secar espessuras diferentes de madeira. Apresenta duas portas, permitindo a entrada de madeira fresca e saída de madeira seca sem interrupção do processo de secagem (KLITZKE, 2003).

De acordo com Jankowsky (1995), a temperatura atinge em torno de 50°C e a umidade relativa em torno de 65% e pode ser controlada de duas maneiras distintas:

- através de sensores ou umidostatos que medem a umidade do ar, e que são regulados para acionar o compressor quando a umidade relativa alcança um valor pré-determinado;
- através de temporizadores que regulam um intervalo de tempo para o funcionamento e desligamento do compressor.

Apesar de nenhum dos dois sistemas de controle avaliar a umidade da madeira, a utilização de umidostatos permite algum controle no processo e aplicação de um programa simplificado de secagem (KLITZKE, 2003; JANKOWSKY, 1995).

As vantagens e desvantagens segundo Jankowsky (1995), em relação aos secadores convencionais, são:

- Vantagens
 - não há necessidade de caldeira para aquecimento do fluido térmico;
 - boas condições de controle do processo para madeiras consideradas de difícil secagem, especialmente as que requerem baixas temperaturas e altas umidades relativas;
 - requerem menor investimento, por serem, a maioria, de simples construção.
- Desvantagens
 - temperatura limitada a no máximo 80°C, sendo que a maior parte dos equipamentos operam a temperatura de 50°C;
 - o processo é exclusivamente com energia elétrica, gerando aumento nos custos de secagem;
 - a presença eventual de substâncias químicas no condensado.

Conforme Klitzke (2003), as vantagens e desvantagens dos desumidificadores comparadas com a secagem ao ar livre estão listadas a seguir:

- Vantagens
 - aplicar à madeira as condições ideais da secagem ao ar livre de maneira constante ao longo de toda secagem;
 - redução do tempo de secagem em até 5 vezes;
 - economia nos custos de transporte porque se diminui o peso da madeira rapidamente;
 - diminuição dos defeitos causados pela secagem ao ar livre devido a exposição das intempéries, prevenindo as descolorações e manchas da madeira.

- Desvantagem
 - alto investimento inicial.

3.2.3 Secagem com aquecimento solar

A secagem da madeira com aquecimento solar é um dos métodos à baixa temperatura (< 50°C), é um processo intermediário entre a secagem ao ar livre e a secagem à estufa convencional e difundida no mundo todo. Vem sendo recomendada por pesquisadores como alternativa de substituição aos métodos que exibem elevado custo de investimento, consumo energético e manutenção (SANTINI, 1981).

Em 1958, alguns cientistas do Laboratório de Produtos Florestais de Madison, Estados Unidos, ficaram muito entusiasmados com a possibilidade de usar a energia solar para secar madeira em estufa. Nos últimos 30 anos, as pesquisas foram intensificadas e tiveram um impulso muito grande na direção de desenvolver métodos intermediários que sejam paralelamente eficientes e de baixo custo (SANTINI, 1981).



FIGURA 12 Secador solar construído em Curitiba.

Fonte: Santini, 1981.

A estufa solar consiste fundamentalmente de um sistema de coleta de energia para o aquecimento do ar que é composto por material absorvente e cobertura transparente (plástico ou vidro fixadas em uma estrutura de madeira) e de distribuição de ar aquecido realizado por ventiladores (STANGERLIN et al, 2009). O plástico normalmente empregado é fino, de 0,05 mm a 2,0 mm de espessura, como poli vinil cloreto (PVC), poli vinil fluoreto (PVF), poliéster resistente (Figura 12). Menos frequentes, usam-se materiais mais rígidos como fibra de vidro e o próprio vidro e também a associação deles (BAUER, 2003).

Existem dois tipos básicos de secadores solares: modelos com coletor solar incluído na estrutura e modelos que estão localizados fora da câmara de secagem. Câmaras do tipo “greenhouse”, segundo sua denominação na literatura, são os que possuem o coletor dentro do secador (BAUER, 2003; SANTINI, 1981).

De acordo com Stangerlin et al (2009), o aquecimento acontece através da passagem dos raios solares na cobertura transparente e as perdas de calor são minimizadas pelos fechamentos da estufa, assim como a colocação de paredes duplas de plástico ou vidro, conforme mostrado na figura 13.



FIGURA 13 Modelo de estufa solar.
Fonte: Stangerlin *et al*, 2009.

A confecção do assoalho da estufa normalmente é feita com tábuas e podem ser cobertas com chapas de isopor de espessura 2 cm e chapas de compensado de 1 cm, visando obter um isolamento térmico satisfatório, diminuindo consideravelmente as perdas de calor (STANGERLIN et al, 2009).

Com a finalidade de maximizar o aumento da temperatura interna do secador, os materiais como a madeira, alumínio e o aço são pintados de preto, O aço da superfície coletora de energia pintada com tinta preta fosca, serve para absorver a radiação de ondas curtas e evitar a reflexão. Entretanto, os grandes problemas do

sistema são o armazenamento, a transferência e o controle do calor solar no processo (SANTINI, 1981).

Um aspecto relevante é a orientação da estufa. Para receber insolação máxima, quando no hemisfério sul, a estufa deve ser orientada paralelamente à linha do Equador, direção norte-sul. Em outros continentes, a direção poderá ser Leste-Oeste. É necessário considerar que o eixo principal da estufa deve coincidir com o comprimento da pilha da madeira (STANGERLIN et al, 2009).

O ângulo de inclinação da cobertura da estufa deve coincidir com a latitude local, para que seja possível a incidência dos raios solares perpendicularmente ao teto transparente (SANTINI, 1981).

O emprego da energia solar, no início, era muito discutido e analisado. Vários resultados indicavam que é um método eficiente em regiões onde, por razões climáticas desfavoráveis, a secagem ao ar não era um processo exequível. Entretanto, atualmente com o aperfeiçoamento do método, com a utilização da energia natural e ilimitada do sol, o equipamento pode ser utilizado em muitas partes do mundo.

Estudos com estufas solares como os de Santini (1981), na cidade brasileira de Curitiba – PR comprovam a eficiência dos secadores solares em relação ao tempo de secagem, pois não foi maior, ou pelo menos foi igual ao obtido em outras partes do mundo. Bauer (2003), em sua pesquisa, afirma que há uma menor incidência de defeitos na secagem em estufa solar em relação ao processo ao ar livre.

Considerando-se o menor tempo de secagem, menor teor de umidade final e menor percentual de degradação da madeira, a secagem solar apresenta vantagem em relação à secagem ao ar livre. Em relação à secagem de estufas convencionais, o custo geralmente é mais baixo considerando que o tempo de secagem solar é maior. Já, com relação à avaliação dos defeitos nas peças que foram submetidas à secagem solar, foi

semelhante aos métodos ao ar livre e ao método convencional de estufas (SANTINI, 1981).

3.2.4 Secagem Convencional

A secagem convencional ou artificial é o processo de secagem mais utilizado no mundo inteiro. Neste equipamento, é possível controlar:

- temperatura;
- umidade relativa do ar;
- velocidade do ar.

O objetivo fundamental da secagem artificial é incentivar o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as várias reações comportamentais da madeira durante o processo, de modo a promover a secagem de modo rápido, com perdas minimizadas e com padrão de qualidade admissível para o produto que se destina (JANKOWSKY, 1995).

A secagem convencional é definida com sendo o processo de madeira serrada em secadores, com um sistema de aquecimento (temperatura entre 35º e 90º), um equipamento para umidificação do ar, janelas ou *dampers* para que haja troca de ar entre o interior da câmara de secagem e o ambiente externo, e ventiladores que forçam o ar através das pilhas de madeira. Podem ser de alvenaria ou metálica, sendo que são usadas mais as de alumínio por impedirem a corrosão provocada pelo ar de secagem (JANKOWSKY, 2009).

Para Melo et al. (2008), a temperatura pode ser fixa ou variável. Se for fixa, a mesma temperatura é aplicada em todo processo até atingir o teor de umidade desejado. A temperatura variável é utilizada em madeiras que tem tendência a defeitos graves nas peças. A temperatura inicial deve ser moderada no intervalo correspondente ao teor de umidade inicial e o PSF, e ir aumentando gradativamente até o final da secagem. Também se deve levar em conta as dimensões das peças e seu uso final.

Para esquentar as câmaras, são utilizadas diversas fontes térmicas, vapor d'água, água quente, elétricos e a óleo térmico, sendo o vapor d'água o sistema de aquecimento mais comum e o mais utilizado pelas indústrias. A madeira serrada é gradeada em forma de pilha e armazenada adequadamente no interior das câmaras de secagem (Figura 14).



FIGURA 14 Madeira tabicada em secador convencional. Madeireira Uliana. 2012. (Foto da autora).

Seguindo um programa previamente estabelecido, a secagem de madeira se processa em etapas climáticas progressivamente mais secas e quentes. O controle das condições climáticas se efetua mediante termômetros de bulbo úmido e seco e os sensores do equilíbrio do conteúdo de umidade que permitem, por uma parte, manter o sistema mediante controles manuais, semiautomáticos ou automáticos das condições ambientais desejadas.

3.2.4.1 Câmaras de Secagem

As câmaras são compartimentos hermeticamente fechados e equipados com sistema de aquecimento (radiadores), ventiladores para que haja circulação do ar, equipamento de umidificação, válvulas para troca de ar (entrada e saída de ar) para variar e controlar o clima dentro da câmara. Os compartimentos poderão ser construídos de tijolos (estufas mais comuns), concreto e elementos pré-fabricados de alumínio ou aço inoxidável. (JANKOWSKY, 1995).



FIGURA 15 Estufa convencional com portas de alumínio. Madeireira Uliana 2012.

(Foto da autora).



FIGURA 16 Secador Convencional. Madeireira Santa Rita. 2011. (Foto da autora).

3.2.4.2 Sistema de Ventilação

A ventilação pode ser superior ou inferior. Na ventilação superior, o ar sai no sentido de cima para baixo e os ventiladores são axiais, quase sempre com giro reversível para se conseguir uma ótima distribuição do fluxo de ar na largura e na altura do secador. Localiza-se sobre um falso teto que forma a câmara separada do recinto onde se empilha a madeira. Dependendo do diâmetro e distância dos ventiladores, pode-se conseguir uma velocidade do ar entre 1 a 7 m/s. Os motores devem ser

construídos para suportar temperaturas e umidades relativas muito altas, pois se localizam dentro da câmara sobre o falso teto (KLITZKE, 2003).

Na ventilação lateral, os ventiladores se instalam em uma parede lateral, podendo ser de diâmetro igual ao da pilha de madeira. Não exigem falso teto como no caso anterior. O ar é projetado horizontalmente, atravessando a pilha de madeira na direção transversal (Figura 17).



FIGURA 17 Ventiladores laterais. Madeireira Santa Rita. 2011. (Foto da autora).

3.2.4.3 Meio de Aquecimento

O aquecimento deve ser realizado de forma indireta. Para isto, são usadas algumas fontes de calor como: gases, ar ou vapor quente, sendo o vapor d'água o mais

comumente utilizado. O uso da energia elétrica é uma exceção; entretanto, ela é utilizada no sistema de ventilação.

No interior da câmara, o aquecimento acontece através dos radiadores (Figura 18). Existem vários tipos de radiadores, como: tubos para gases quentes, resistência elétrica e radiadores para vapor e água quente. O fluido mais comum é o vapor de pressões entre 3,0 e 8,0 kgf/cm² (300 a 800 KPa) e, por esta razão, esses secadores convencionais são também chamados de secadores a vapor. A obtenção da umidificação do ar é conseguida pela liberação de vapor de baixa pressão ou com a aspersão de água fria dentro do secador (JANKOWSKY, 1995).



FIGURA 18 Radiadores da secagem convencional. Madeireira Santa Rita 2011.
(Foto da autora).

O radiador para conduzir o vapor e a água quente pode ter tubos com diâmetro entre 2 e 7 cm, e estão conectados nos extremos a outros de maior diâmetro, um para alimentar o vapor e outro para que aconteça a drenagem dos condensados. Estes radiadores devem ter aletas em forma de lâminas ou espiraladas denominadas de serpentinas. Para que não seja necessária manutenção frequente e com o objetivo de ajudar na distribuição do calor de forma eficiente, com o prolongamento da duração do calor é feito serpentinas bimetálicas, isto é, serpentinas de ferro e as aletas de alumínio. Devem ser projetadas para aquecer uniformemente a câmara, e à medida que o vapor circula por entre eles, estes vão transferindo seu calor ao meio ambiente que o rodeia e no caso do vapor, vai se condensando (KLITZKE, 2003).

A colocação e distribuição do aquecimento devem ser de tal forma que permita um aquecimento uniforme com um consumo mínimo de calor durante o processo de secagem, proporcionando uma secagem correta.

3.2.4.4 Controle da Temperatura

Com o fornecimento de energia, a água da madeira irá proporcionar um gradiente que favorecerá a difusão e a evaporação. A temperatura, da mesma forma, influencia a umidade relativa do ar, capacitando-a a receber maior quantidade de vapor d'água que é evaporado da madeira. Quando a temperatura aumenta e não se introduz vapor d'água, promove-se, segundo Galvão e Jankowsky, (1985):

- a redução da umidade relativa, aumentando a rapidez da retirada da água superficial;
- o aumento do coeficiente de difusão da água higroscópica e do vapor d'água;
- a alteração do gradiente de umidade.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), dois tipos de temperaturas devem ser identificados na secagem convencional (Figura 19):

- temperatura de termômetro seco (TS) – fornece a temperatura do ar no interior do secador;
- temperatura de termômetro úmido (TU) – possibilita o cálculo da umidade relativa do ar;



FIGURA 19 Termômetros: seco e úmido do secador convencional.
Madeira Santa Rita. Itu - SP. 2011. (Foto da autora).

Os termômetros que possibilitam as leituras podem ser de dilatação (gás ou metal), medidores baseados nas propriedades elétricas de condutores e de mercúrio

com leitura direta (este último mais comum). Os termostatos acionam ou desligam as chaves magnéticas, que por sua vez, conduzem resistências elétricas ou válvulas de fornecimento de vapor para o sistema de radiadores (KLITZKE, 2003).

Conforme Andrade (2000), mediante o acionamento das serpentinas do radiador, a temperatura é automaticamente elevada devido ao funcionamento dos termostatos e moto-válvulas. O aquecimento pode ser alcançado por meio de sistemas a vapor, a óleo térmico ou elétrico. O mais utilizado é a caldeira a vapor (Figura 20).



FIGURA 20 Caldeira do secador convencional. Madeireira Santa Rita. Itú-SP. 2011. (Foto da autora).

Conforme Jankowsky (1995), o incremento na temperatura e decréscimos na umidade relativa irá permitir um aumento na taxa de secagem sem ocasionar maior incidência de defeitos.

3.2.4.5 Controle da Umidade Relativa do Ar

Nos secadores convencionais, o controle da umidade relativa do ar é obtido de diferentes maneiras: pelo sistema de aquecimento, através do fornecimento do vapor, pela entrada de ar mais seco e frio do exterior e pela retirada de ar úmido do interior da estufa. O primeiro sistema controla o termômetro seco e os demais, controlam o ajuste do termômetro úmido (Figura 21). (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).



FIGURA 21 *Dampers*. Madeira Santa Rita. 2012. (Foto da autora).

Por intermédio de um psicrômetro, verificando a diferença das leituras entre os dois termômetros TS e TU (TS- termômetro bulbo seco e TU- termômetro bulbo úmido) pode se controlar a umidade. Os dois termômetros devem ser colocados próximos um do outro. Deve-se tomar o cuidado com relação à leitura do TU, isto é, o recipiente de água e a malha de algodão que o mantém úmido deve estar livre de incrustações porque irão alterar a leitura (KLITZKE, 2003).

Durante o processo de secagem é necessário, no início e nas etapas intermediárias, a injeção de umidade (vapor) no interior da câmara. Isto evitará danos ocasionados por tensões de secagem. Após a madeira alcançar o PSF - ponto de saturação das fibras, isto é, quando toda a água livre saiu do lúmen, valor em torno de 28%, a secagem pode ser mais agressiva.

No final do processo de secagem, aplica-se o tratamento de homogeneização da umidade e equilíbrio das tensões, sendo indispensável injetar vapor novamente ou aspergir água para melhorar a umidade relativa do ar, evitando o aparecimento de defeitos nas peças e acentuado gradiente de umidade entre a superfície e o seu interior. O condicionamento ao final do processo permitirá a recuperação de parte da madeira colapsada e o relaxamento das tensões residuais da secagem (JANKOWSKY, 1995).

A elaboração ou modificação de programas deve auxiliar para que os gradientes acarretem tensões que não excedam ao limite de proporcionalidade da madeira. De acordo com Galvão (1976), as tensões máximas de tração das camadas externas são alcançadas num período relativamente curto de secagem. Após esta etapa, há uma reversão, isto é, as camadas superficiais apresentam tensões de compressão.

3.2.4.6 Empilhamento da Madeira nas Câmaras

A preparação da carga de madeira a ser colocada nas estufas é de vital importância para que se obtenha bom desempenho da secagem (Figura 22). Existem critérios básicos para que o carregamento resulte em madeira de qualidade, livre de defeitos e possivelmente com um processo de secagem mais rápido.



FIGURA 22 Empilhamento de madeira em estufa convencional. Madeireira Uliana, 2012. (Foto da autora).

A utilização de tabiques é um dos critérios básicos para que seja minimizada a presença de defeitos na madeira. São utilizados no empilhamento, para separar as

camadas do material em secagem, proporcionam espaços para que o ar possa circular durante o processo de retirada da umidade. Os tabiques devem ser, preferivelmente, de lenho em que a grã é reta sem a presença de defeitos e de peças que são estáveis e duras. São colocados exatamente no início e no fim de cada camada de madeira, de forma a facear a extremidade da peça, e secos em estufas antes da sua utilização (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Galvão e Jankowsky (1985) recomendam que as dimensões e distâncias entre os tabiques podem ser observados na tabela 1; quanto maior a espessura das peças, mais espessos devem ser os tabiques. Com isto, é possível favorecer uma secagem mais rápida e uniforme.

TABELA 1 Dimensões e distâncias entre os tabiques, em função da espessura das peças e do tipo de madeira que compõe a carga. Galvão e Jankowsky, 1985.

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

Contudo, Galvão e Jankowsky (1985) também salientam a importância da diminuição da distância dos tabiques em espécies com tendência a empenamento, e se foram feitos com espécies de madeiras de baixa densidade (Figura 23).

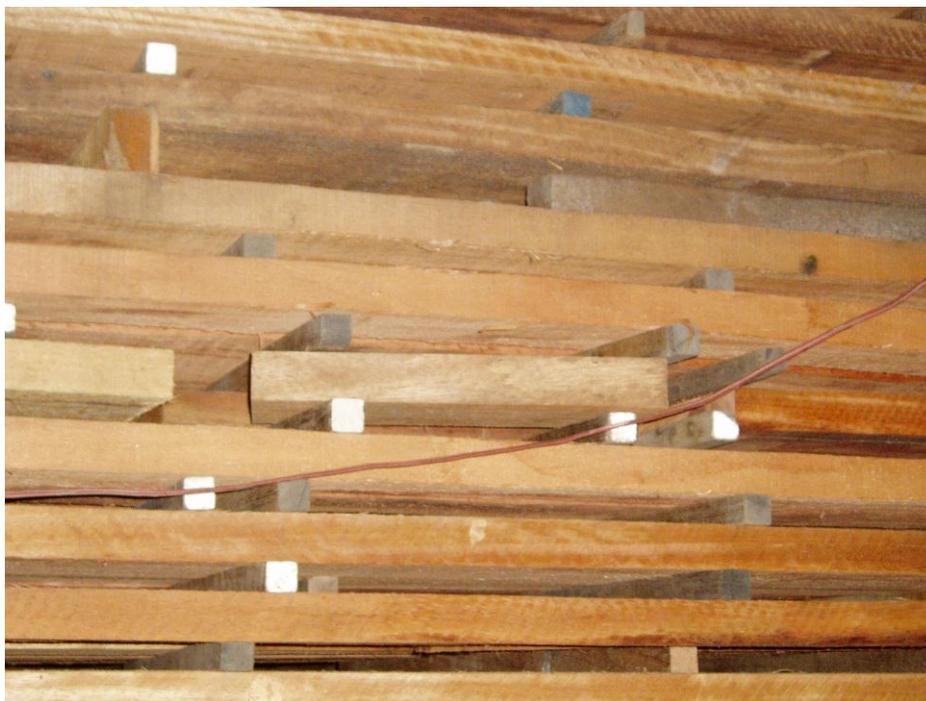


FIGURA 23 Pilha de madeira tabicada. Empresa Uliana – 2012.
(Foto da autora).

De acordo com Ponce e Watai (1985), nas áreas de contatos dos tabiques com as peças, a secagem é retardada. Portanto não convém usar mais tabiques do que o necessário. A falta de contato entre a tábuas e o tabique pode provocar empenos como encanoamento e torção, resultando em um fluxo de ar desuniforme através da pilha da madeira. Para que ocorra redução dos empenamentos das tábuas durante o processo de secagem, as fileiras dos tabiques devem ser alinhadas verticalmente.

Para facilitar a execução de empilhamento e manter a uniformidade das fileiras e dos tabiques separadores, Klitzke (2003) recomenda a utilização de algumas guias portáteis que acomodam os tabiques. A seguir pode-se observar na Figura 24, o desenho esquemático para construção do suporte base para o tabicamento correto.

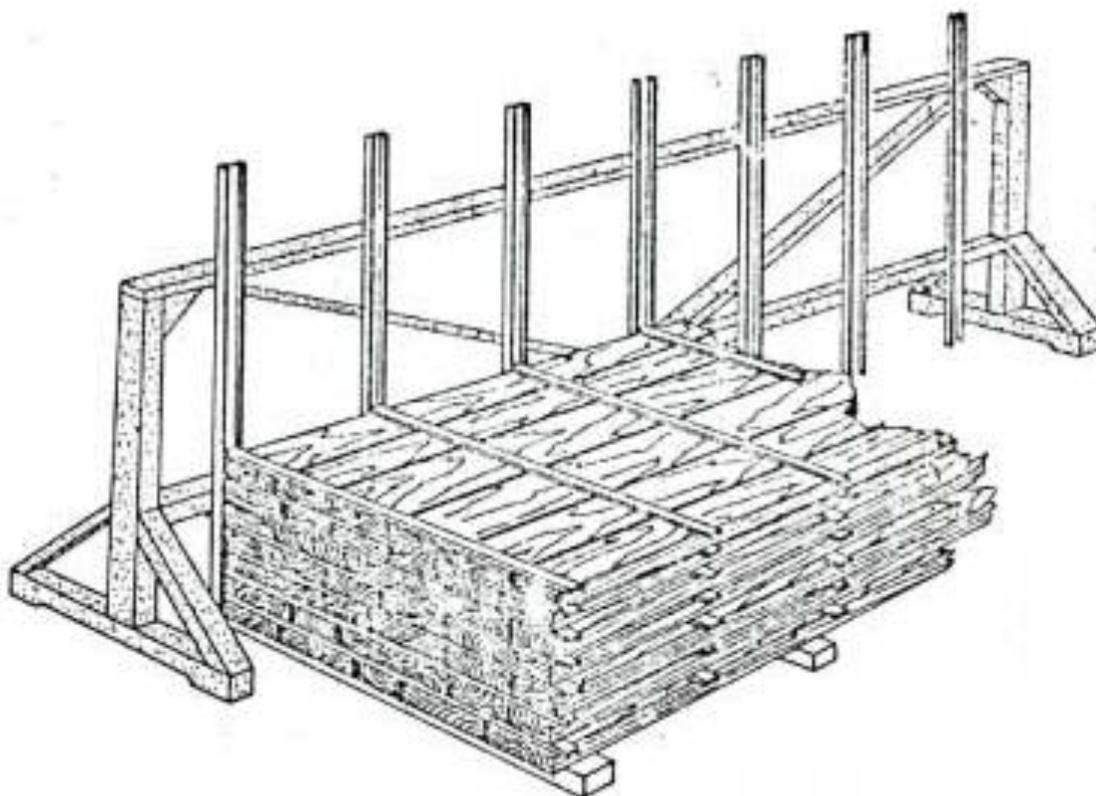


FIGURA 24 Gabarito para o tabicamento da madeira. Klitzke (2003).

A seleção das peças simplifica a operação de tabicamento e ajuda na obtenção de peças similares em termos de características de secagem. Para tanto, Melo et. al. (2008) e Galvão e Jankowsky (1985) relatam que:

- O carregamento seja composto por uma só espécie de madeira, ou por espécies com características semelhantes;
- Não é recomendável misturar peças verdes com peças secas parcialmente ao ar;
- É vantajoso separar peças de madeira de cerne e de alburno, pois eles apresentam diferentes teores de umidade;
- Selecionar as peças com espessuras e comprimentos iguais, para facilitar o tabicamento e ficarem bem apoiadas e alinhadas, proporcionando maior estabilidade à pilha de madeira.

Os tabiques separadores são elementos valiosos na secagem e devem ser manipulados com cuidado, e por isso, os mesmos dispensam tempo para serem preparados, podendo ser reutilizados muitas vezes na secagem da madeira.(Figura 25).



FIGURA 25 Tabiques. Madeireira Santa Rita, 2011. (Foto da autora).

3.2.4.7 Classificação das Estufas

As estufas de secagem convencional, de acordo com Kollmann e Côté (1968) podem ser classificadas de modo geral quanto a sua forma de carregamento e à circulação de ar no seu interior. Devido à maneira de carregamento podem ser: câmaras descontínuas ou de compartimento, e câmaras progressivas ou túnel. Entretanto, quanto à circulação de ar, podem ser classificadas como câmaras de circulação de ar natural ou forçadas.

A estufa descontínua é um compartimento que é completamente preenchido pela madeira em uma única operação. Fecha-se a porta e inicia-se o processo de secagem. A madeira permanece parada. A temperatura e umidade relativa são variadas de acordo com o programa. As câmaras classificadas por compartimento operam separadamente, como mostra a Figura 26.



FIGURA 26 Estufas com câmaras por compartimento com portas de alumínio. Empresa Indusparquet, 2012. (Foto da autora).

Neste tipo de estufa, as mesmas condições de secagem são realizadas simultaneamente em todas as partes do forno. Quando o teor de umidade é alcançado, o forno é desligado e deixa-se esfriar e depois a carga é removida. São constituídos em diferentes tamanhos e são quase universalmente utilizados em serrarias e indústrias da madeira (KOLLMANN E CÔTÉ, 1968).

As principais vantagens das estufas em compartimento, segundo Kollman e Côté (1968) são:

- Controle adequado das condições de secagem;
- Possibilidade de secar a qualquer momento;
- Baixas perdas de calor durante a secagem, porque as portas são mantidas fechadas durante todo o processo;
- Como regra geral, secagem rápida e uniforme.

Possuem como desvantagens o custo. São geralmente mais caros do que os fornos progressivos e é necessário operador experiente. Empresas nacionais utilizam empilhadeiras ou vagonetes para colocar a carga no compartimento, como mostrado nas Figuras 27a e 27b.



FIGURA 27a. Estufa com carregamento por empilhadeira.

Fonte: www.fimacodoBrasil.com.br, 2012.



FIGURA 27b. Estufa com carregamento por vagonete. Madeireira Santa Rita. 2012. (Foto da autora).

Kollmann e Côté (1968) descrevem como ocorre a secagem nas câmaras progressivas ou de túnel, como mostra a Figura 9. A madeira empilhada sobre vagonetas avançam no sentido inverso da corrente de ar. É movida progressivamente cada dia ao longo do forno. Cada pilha em uma trilha é submetida à nova condição de secagem, finalmente alcançando o calor na parte seca da descarga do forno. Este procedimento progressivo é conveniente para grandes quantidades de peças de tamanho regular, pois estufas progressivas geralmente são longas de até 75 m de comprimento. São usadas principalmente em serrarias que utilizam madeiras macias. Suas vantagens em comparação com as estufas de compartimento são:

- Equipamentos com construção barata;
- Facilidade de operação;

- Produção estável.

Existem as seguintes desvantagens em relação à estufa de compartimento:

- Utilizada para produção grande;
- Inflexibilidade em uso;
- Necessidade de dia e noite para executar;
- Séria influência externa das condições meteorológica;
- Perda de calor durante o carregamento;
- Dificuldades no alívio das tensões.

De acordo com ambos os autores, Oliveira (1981) e Jankowsky (2009), a secagem convencional é o processo mais utilizado e apresenta vantagens em relação à secagem natural:

- Redução do tempo de secagem, favorecendo em última análise, um maior giro de capital;
- Maior controle sobre os defeitos;
- Redução da umidade da madeira em qualquer época do ano, bem inferiores à umidade de equilíbrio, de acordo com as condições ambientes;
- Dispensar a utilização de grandes pátios necessários para secagem natural de grandes volumes da madeira.

3.2.5 Secagem à Alta Temperatura

A secagem à alta temperatura tem sido imposta em alguns países do mundo devido à necessidade das indústrias de incrementarem sua produção de madeira a custo muito competitivo.

Os materiais utilizados são diferentes daqueles usados em câmaras convencionais. São materiais não corrosivos como o alumínio puro ou aço inoxidável. As instalações devem ter um alto grau de isolamento e o fluxo de ar é o dobro da requerida na secagem convencional; comumente varia em torno de 4 a 10 m/s. O ar deve ter uma distribuição uniforme, e circular entre a madeira equitativamente (KLITZKE, 2003).

Os cuidados e controles de acordo com Klitzke (2003) são maiores do que na secagem convencional, porque se retira mais quantidade de água por unidade de tempo e com mais eficiência térmica. O processo dura a metade ou a terça parte da requerida na secagem convencional. As instalações devem ter um alto grau de isolamento e sua capacidade gira em torno de 20 a 60 m³. É muito utilizado em espécies altamente permeáveis, como o pinus. O uso de peso em cima da pilha de madeira é imprescindível, numa razão de 500 kg/m².

Pesquisador da EMBRAPA/CPATU (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Aguiar (2012) relata que patenteou um método com estudos realizados em secagem acelerada de madeira a altas temperaturas. O método é baseado nas propriedades reológicas da madeira caracterizada pela fluidez molecular de seus polímeros naturais quando aquecida à determinada temperatura. Ao aquecer a lignina (substância orgânica complexa que está presente nas paredes celulares do lenho que confere dureza e rigidez à madeira), geralmente à temperatura superior a 70°C, ocorre a transição vítrea, isto é, ela se torna viscosa e elástica deixando a madeira mais flexível, permitindo o relaxamento das tensões da secagem tradicional, tornando o processo mais rápido e homogêneo.

Nesta condição vítrea, espera-se que a madeira “sofra” menos o impacto das tensões de secagem inerentes no processo de diminuição de seu teor de água e, conseqüentemente, apresente menos defeitos, como as rachaduras. Um novo teor de

umidade é conseguido e mantido após a temperatura ser baixada. Se o aquecimento for acima da faixa de transição vítrea a madeira toda estará perdida.

3.3 Secagem de Madeira

3.3.1 Conceituando secagem de madeira

O material lenhoso recém-abatido apresenta consideráveis quantidades de água que, para um determinado uso, devem ser em parte removidas por meio da secagem. De acordo com Alzueta (1942), a secagem de madeira pode ser definida sucintamente como a retirada de água dos vasos da madeira.

A madeira é um material higroscópico e anisotrópico e suas dimensões se alteram em função de variações no teor de umidade. As propriedades físicas e mecânicas, bem como as estéticas, também sofrem variação. Portanto, a água contida no lenho, resumidamente, tem sido retirada para conseguir estabilidade dimensional, redução de peso, prevenção à deterioração pelo ataque de micro-organismos, para possuir o teor de umidade compatível com o uso pretendido e estar livre de defeitos, objetivando o aproveitamento máximo do material.

Na construção civil, a madeira pode ser utilizada de diversas formas em uso temporário: fôrmas para concreto, andaimes, escoramentos; ou, de modo definitivo, como: esquadrias (portas e janelas), estruturas de cobertura, forros e pisos. No uso temporário, a madeira tem seu menor grau de processamento; já no modo definitivo é quando se agregarem maior valor às mesmas (ZENID, 2009).

Martins (1988) escreve de uma forma mais completa o conceito de secagem de madeira como sendo um processo de redução do teor de umidade a fim de levá-la a um valor pré-determinado, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível e economicamente realizável ao uso que se propõe.

Como a água tem profunda influência nas propriedades da madeira, a madeira verde, impregnada de seiva, não está em condições de ser vantajosamente utilizada na maioria de suas aplicações. Por isso, o aperfeiçoamento da técnica da retirada da água se faz tão importante hoje em dia.

3.3.2 Considerações sobre o uso da madeira como material estrutural

Na construção civil, a madeira é utilizada de diversas formas. Pode ser usada em usos temporários (formas para concreto, andaimes ou escoramentos) ou de forma definitiva (coberturas, vigas, pilares, esquadrias, forros e pisos).

A escolha da madeira correta para um determinado uso deve-se considerar quais propriedades e os respectivos níveis requeridos para que a madeira possa ter um desempenho satisfatório (MELO et al., 2010). É um procedimento essencial principalmente em países tropicais, onde a variedade e o número de espécies de madeiras existentes são manifestados na biodiversidade.

A madeira é um excelente material estrutural, por sua resistência mecânica elevada e baixa massa específica quando comparada com outros materiais utilizados em estruturas como o ferro, aço, concreto, tijolos, etc. Em termos de comparação como o aço e concreto, a relação resistência/massa específica para a madeira é aproximadamente três vezes maior que no aço e dez vezes maior que o concreto (CALIL JR. E DIAS, 1997).

As propriedades físico-mecânicas mais relevantes para a utilização da madeira como material estrutural considerada são: densidade, umidade, resistência, rigidez (medido pelo valor médio do módulo de elasticidade nas direções paralela e normal às fibras) e combustão.

3.3.2.1 Densidade

O conceito físico de densidade é a quantidade de massa contida na unidade de volume. Hellmeister (1982) assegura que a densidade é a propriedade física mais significativa para caracterizar madeiras designadas à construção civil.

Shimoyama e Barrichelo (1991) também mostraram que a densidade é um dos mais importantes parâmetros para a avaliação da qualidade da madeira, não só pela facilidade da determinação, mas porque está relacionada com as demais propriedades do material, apresentando-se essencial para o conhecimento e utilização da madeira.

Usualmente a densidade da madeira é determinada de duas maneiras: densidade básica - massa seca/volume saturado, ou seja, teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF) e densidade aparente - massa específica/volume para o mesmo teor de umidade (TU).

A densidade aparente é a mais importante para o dimensionamento estrutural, pois possui alta correlação com a resistência e a rigidez mecânica da madeira e é utilizada na determinação do peso próprio do madeiramento da estrutura. Com o objetivo de comparação, pela alta variação de resultados conseguidos, a Norma Brasileira, NBR 7190/1997, adota a condição-padrão de umidade (U= 12%). A densidade aparente pode ser calculada:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (1)$$

onde:

ρ_{ap} = densidade aparente;

m = massa específica;

V = volume para o mesmo teor de umidade.

Pesquisadores como Kollmann e Côté (1968) e Hellmeister (1982) já afirmavam a existência da relação linear entre a densidade e a dureza da madeira e com a tenacidade e também a rigidez da madeira. O que confirma que as propriedades físico-mecânicas da madeira estão correlacionadas com a densidade. Isto auxilia para que a densidade seja utilizada como uma estimativa aproximada do valor de uma propriedade mecânica através da outra.

3.3.2.2 Umidade

A madeira poderá trocar umidade com o ar, em decorrência da sua natureza higroscópica. Isto ocorre, principalmente, em função da temperatura e da umidade relativa do ar.

O teor de umidade tem influência importante nas características físico-mecânicas da madeira. A variação do teor de umidade causa alterações nas dimensões da madeira, quando o teor de umidade está abaixo do PSF. Esse fenômeno é nomeado de retração e inchamento higroscópico, porque as alterações volumétricas acontecem como resultado de variações no teor de água higroscópica. (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Além do teor de umidade ter importância nas características físico-mecânicas, é também considerado para avaliação de suas propriedades e ao uso que se destina. Como as propriedades básicas da madeira variam muito entre as espécies, é mostrado, por exemplo, as propriedades físicas e mecânicas da madeira de balsa e da madeira de aroeira tomando-se a densidade aparente à 15% de teor de umidade, encontram-se os

valores como 200 kg/m³ e 1100 kg/m³ respectivamente. Isto é, são totalmente distintas (IPT, 2009).

O teor de umidade da madeira é expresso como uma porcentagem do peso da madeira completamente seca (base seca). O cálculo é dado por:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Pode ainda ser escrita de modo a facilitar o cálculo como:

$$U = \left(\frac{M_u}{M_s} - 1 \right) \cdot 100 \quad (3)$$

onde:

U = teor de umidade;

M_u = massa madeira úmida;

M_s = massa da madeira seca.

Quando a madeira é abatida e seu teor de umidade varia de 100% a 30% as propriedades mecânicas são constantes e não acontecem variações volumétricas. Mas, variando-se do PSF ao teor de umidade aproximado de 12%, as propriedades mecânicas aumentam e a retração volumétrica acontece na madeira.

Em uso, o teor de umidade da madeira depende principalmente da umidade relativa e da temperatura do meio. Essas variáveis sendo fixadas, o teor da madeira se ajusta a um valor denominado de umidade de equilíbrio (U_{eq}). Com isto é possível se conseguir uma estimativa da umidade da madeira utilizada em diferentes condições ambientais (GALVÃO, 1975).

De acordo com NBR 7190 (1997), o projeto de estruturas de madeira deve ser realizado admitindo uma das classes de umidade especificadas na Tabela 2, e têm por objetivo ajustar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira no exercício das condições do ambiente em que as estruturas permanecerão.

TABELA 2 Classes de Umidade. Fonte: NBR 7190 (1997).

Classes de Umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75 \%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85 \%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ longos períodos	$\geq 25\%$

O teor de umidade é muito importante, por exemplo, na secagem convencional, pois se busca o equilíbrio entre as condições do ar de secagem ao teor de umidade final (JANKOWSKY, 2009).

O ajuste dos equipamentos acontece através do uso de programas de secagem. Estes, genericamente são regidos pelo teor de umidade ou em programas de intervalos de tempo. Com relação aos programas ajustados pelo teor de umidade, pode-se dizer que evoluem para os programas de tempo, pela facilidade em se fazer as modificações pelos intervalos de tempo do que pelo teor de umidade (MENDES et al., 1998).

3.3.2.3 Resistência

As considerações sobre resistência na madeira requerem antes uma abordagem fundamental quanto ao comportamento da madeira. As madeiras sofrem

retração e inchamento com a variação de umidade. Suas variações dimensionais correspondem à dessorção ou adsorção da água higroscópica localizada na parede celular (KOLLMAMM E CÔTÉ, 1968).

As alterações na geometria, decorrentes da eliminação de moléculas de água de adesão, dependem da espécie e do eixo da madeira segundo o qual é determinado (anisotropia). A madeira apresenta três planos ortogonais principais de simetria física, como se observa na figura 28:

- Plano RT (corte transversal);
- Plano LR (corte longitudinal a partir da medula);
- Plano LT (corte longitudinal tangente à casca).

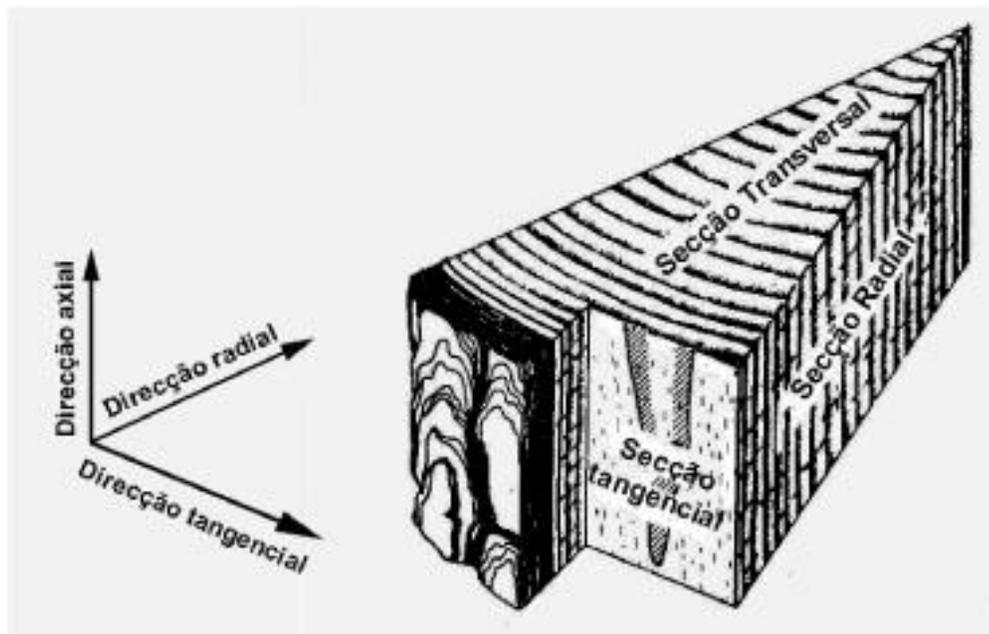


FIGURA 28 Eixos e Planos fundamentais da madeira.

Fonte: www.saporiti.com.br, 2012.

A retração volumétrica é aproximadamente igual à soma das três retrações lineares ortogonais e depende da espécie considerada. O fenômeno mais importante acontece na direção tangencial, depois na direção radial e por último na direção longitudinal ou axial (PFEIL E PFEIL, 2008).

NBR 7190 (1997, p.12), relata que:

“a resistência é a aptidão de a matéria suportar tensões, e é determinada, convencionalmente, pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos de prova isentos de defeitos do material considerado, até o aparecimento de fenômenos particulares de comportamento, além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais.”

Na resistência, os valores podem ser obtidos em ensaios de caracterização de espécies realizados em laboratório, ou valores de resistências fornecidos pela norma citada, que apresenta as propriedades de diversas espécies, ou de acordo com a classe de resistência, como mostra a Tabela 3 e 4.

TABELA 3 Classes de resistência das coníferas. Fonte: NBR 7190 (1997).

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%)				
Classes	f c0,k MPa	f v0,k MPa	Ec0,m MPa	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

TABELA 4 Classes de resistência das folhosas. Fonte: NBR 7190 (1997).

Folhosas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%)				
Classes	f c0,k MPa	f v0,k MPa	Ec0,m MPa	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	9500	650
C30	30	5	14500	800
C40	40	6	19500	950
C60	60	8	24500	1000

Os resultados das propriedades de resistência foram corrigidos para a umidade padrão de referência, como designados pela norma NBR 7190/1997, pela equação (4):

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

onde:

f_{12} = resistência corrigida para umidade de 12%;

$f_{U\%}$ = resistência para umidade U%;

U% = teor de umidade.

3.3.2.4 Rigidez

De acordo com ABNT (1997), a rigidez dos materiais é medida pelo valor médio de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear. Os ensaios realizados para obter o módulo de elasticidade E_{w0} na direção paralela às fibras são medidos no ensaio de compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade E_{w90} na direção normal às fibras é alcançado no ensaio de compressão normal às fibras. Como na resistência, os valores foram corrigidos para a umidade padrão de referência (Equação 5).

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (5)$$

onde:

E_{12} = módulo de elasticidade corrigido para umidade 12%;

E_{w0} = módulo de elasticidade para umidade U%;

U% = teor de umidade.

A umidade presente na madeira pode alterar as suas propriedades de resistência e elasticidade. Por isso, essas propriedades devem ser ajustadas em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas, segundo as normas.

3.3.2.5 Combustão

Os estudos de capacidade de resistência ao fogo devem ser feitos com temperaturas altas. O comportamento da madeira nessas condições deve ser estudado na forma preventiva. Por ser combustível a madeira é repetidamente considerado um material de pouca resistência ao fogo. Entretanto, quando adequadamente projetadas e construídas, apresentam um excelente desempenho sob a ação do fogo (PFEIL E PFEIL, 2008).

Segundo a NBR 7190/1997, para o estudo da madeira exposta ao fogo, as propriedades relacionadas à resistência e à rigidez são as que influenciam no seu uso. E eles estão relacionados aos fatores intrínsecos (densidade, teor de umidade, permeabilidade, condutividade térmica, orientação da grã, composição química) e os fatores extrínsecos (temperatura, ventilação do ambiente, exposição ao fogo).

A norma citada afirma que a madeira exposta ao fogo pode conseguir manter a alma da seção fria a uma pequena distância da zona queimada, conseguindo assim conservar grande parte das propriedades físicas e mecânicas da madeira, não perdendo a capacidade resistente, mesmo após ter sido exposta a altas temperaturas.

3.3.3 Localizando água na madeira

A origem e localização da água na madeira nos oferece compreensão de como acontece o processo de secagem da madeira serrada. As árvores absorvem água e sais minerais do solo e são conduzidos pelos elementos condutores (vasos, parênquimas, traqueídes, etc.) até as folhas constituindo assim a seiva bruta. Após a fotossíntese, a seiva elaborada, constituída de água e produtos elaborados na fotossíntese, se desloca das folhas em direção às raízes, alimentando a árvore.

A água aparece em duas formas distintas:

- água livre – localizada no lúmen das células e possíveis espaços intercelulares (fácil eliminação);
- água de adesão ou higroscópica – localizada na parede celular (difícil eliminação).

Logo após a derrubada, a madeira começa a secar; primeiramente acontece a remoção de água existente no interior das cavidades celulares, saindo de uma célula para outra até atingir a superfície externa da madeira. A força motriz atuante é a de capilaridade. O fluxo de água livre depende da temperatura, da presença de bolhas de ar no interior dos lumes e do diâmetro máximo das pontoações (STAMM, 1967).

A perda de água livre apresenta valores de teor de água entre 25% e 35%, sendo variável entre as espécies (Kolmann e Côté, 1968). Este teor de água designa-se por Ponto de Saturação das Fibras (PSF), isto é, quando se tem o máximo de água higroscópica, sem a presença de água livre (JANKOWSKY, 2009).

Segundo Andrade (2000), o fator inicial mais importante da secagem é a transferência de calor do ambiente para a superfície. Isto se deve ao fato que, ao perder umidade, esta transferência de calor da superfície para o interior passa a ser um fator limitante, sendo necessárias altas velocidades de ar na primeira fase de secagem comparando-se com a fase final.

A água de adesão se encontra no interior das células de madeira, entre as microfibrilas de celulose e hemicelulose, ligadas por forças elétricas conhecidas como pontes de hidrogênio; por isso, o processo geralmente é mais lento, sendo necessária a utilização de energia. Geralmente, é considerada como sendo um processo de difusão, ou seja, a água das camadas mais internas se difunde na forma de vapor, preenchendo os espaços vazios que a água livre deixou, e se deslocam até a superfície da madeira por capilaridade (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985).

3.3.4 Corte e desdobramento das toras

As árvores, ao serem abatidas, apresentam alto teor de umidade (madeira verde: mais de 80% de umidade) que imediatamente começa a reduzir-se

espontaneamente e lentamente. Depois desta etapa, as toras de madeira vão para o desdobro, que é o corte da madeira para fins industriais (IPT, 2009).

O desdobro é realizado por meio de cortes longitudinais, transversais ou radiais, com o emprego de fita de serra (mais comumente utilizada) que possui comandos mecânicos que garantem a espessura uniforme das lâminas (PEIFL, 2008).

De acordo com Pfeill e Pfeil (2008), preferencialmente as árvores devem ser abatidas quando alcançam a maturidade, por ocasião em que o cerne preenche a maior porcentagem do tronco, levando à madeira de melhor qualidade. A melhor época do ano para o abate é a estação seca, pois o lenho tem sua umidade reduzida e, com isto, minimizam-se os defeitos decorrentes da secagem da madeira.

São utilizados principalmente três tipos de desdobramentos: paralelo, tangencial e radial (Figura 29). As dimensões mínimas das peças de madeiras construtivas de seções retangulares são especificadas pela Norma Brasileira 7190/2012.

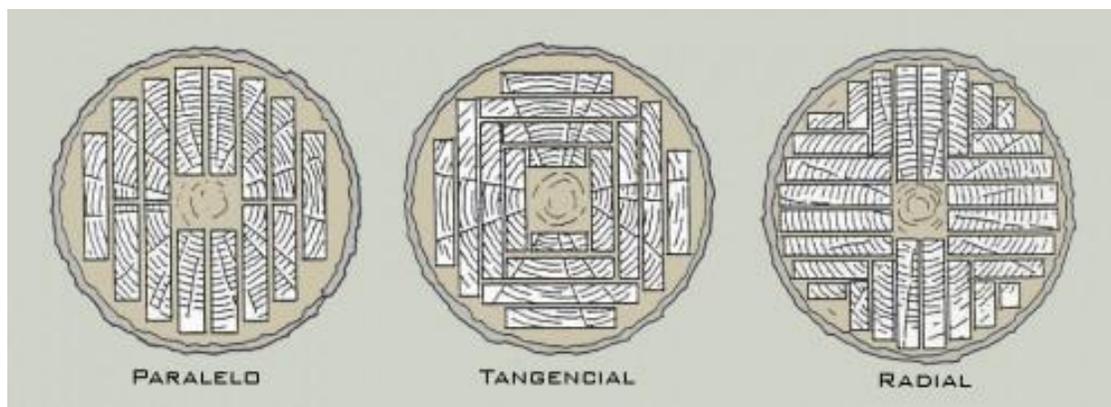


FIGURA 29 Tipos de desdobro: Paralelo, Tangencial e Radial.

Site: coisasdaarquitetura.files.wordpress.com, 2012.

3.3.5 Fatores que Influenciam na Secagem da Madeira

Existem fatores internos e externos que influenciam na secagem da madeira. Os fatores internos dizem respeito à própria madeira e os fatores externos são relativos ao ar atmosférico.

Entre os fatores internos destacam-se: espécie da madeira, tipo de madeira, teor de umidade, e direção das fibras. Já os fatores externos, que também são influenciados por condições locais (elevação, topografia, drenagem do terreno e massas de água existentes nas proximidades) são considerados: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar e precipitação (STEIN, 2003).

Para Louzada et al (2002), a influência da estrutura anatômica da madeira, a espécie, a complexidade da composição, e consequentes alterações de propriedades, determinam dificuldades acrescidas e específicas no estudo da secagem da madeira.

3.3.6 Potencial de secagem

Mello (2008) afirma que a elaboração de um programa de secagem requer primeiramente a definição de variáveis fundamentais como a temperatura e o potencial de secagem.

O potencial de secagem (PS) pode ser definido pela relação entre o teor de umidade médio da carga (T_u) e o teor de umidade de equilíbrio num dado instante (T_{ue}).

Assim:

$$PS = \frac{T_u}{T_{ue}} \quad (6)$$

onde:

PS = potencial de secagem;

T_u = teor de umidade médio da carga;

T_{ue} = teor de umidade de equilíbrio.

Os programas de secagem, quando regidos pelo teor de umidade, tomam como referência as temperaturas inicial e final, bem como o potencial de secagem.

O potencial de secagem segundo Mendes et al (1998) “expressa a severidade ou a suavidade das condições de secagem às quais a madeira está sujeita num determinado momento”. Entretanto, o potencial de secagem não é explícito e é mostrado somente teores de umidade médios da madeira e de equilíbrio, as temperaturas de bulbo seco e úmido, e as umidades relativas do ar.

3.3.7 Rapidez de Secagem

Para Galvão e Jankowsky (1985) a rapidez de secagem (r_s) depende da retirada da umidade superficial que diz respeito à difusão da água higroscópica. Pode ser expressa pela relação entre a redução do teor de umidade (u) e o tempo (t) utilizado para que esta redução ocorra.

Assim:

$$u = \frac{P_a}{P_s} \quad (7)$$

$$r_s = \frac{\Delta u}{\Delta t} \Rightarrow r_s = \frac{u}{t} \quad (8)$$

Portanto,

$$r_s = \frac{P_a}{t} \cdot \frac{1}{P_s} \quad (9)$$

onde:

u = teor de umidade;

P_a = peso da água;

P_s = peso seco;

T = tempo de secagem.

A madeira mais densa requer período de secagem maior do que as de menor densidade, nas mesmas dimensões. A enorme complexidade da composição, da estrutura e heterogeneidade da madeira, e consequentes alterações de propriedades como a anisotropia, higroscopicidade e fatores inerentes a todo material lenhoso, determinam as dificuldades no estudo da circulação de fluídos no processo da secagem de madeira (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985; PONCE e WATAI, 1985).

3.3.8 Consequências da secagem de madeira

Para obtenção de produtos com qualidade, a madeira bruta e úmida deve ser seca antes de ser processada. De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), após o desdobro, o produto final deve atingir valores inferiores a 30% de umidade. Somente o desconhecimento das consequências da secagem fará com que as pessoas utilizem a madeira no estado verde (acima do Ponto de saturação das fibras).

Como pontos positivos de se fazer adequadamente a secagem da madeira para seu emprego, sobretudo na construção civil, Geraldo (1999) e Tomazelli (2012) citam os seguintes aspectos:

- Substancial redução de peso. Conseqüentemente, diminuição dos custos de transporte;
- Aumento da resistência elétrica da madeira, tornando-a isolante elétrico e melhorando suas propriedades de isolamento térmico;
- Melhoria das propriedades mecânicas como: resistência à flexão estática, compressão, dureza (na flexão dinâmica, a madeira fica frágil);
- Importância vital para usinagem da madeira, principalmente torneamento, molduragem, furação, lixamento;
- Maior facilidade para colagem, pintura, verniz e tratamento de conservação;
- Menor ocorrência de defeitos na madeira;
- Controle da instabilidade dimensional;
- Auxílio no equilíbrio da umidade do ar, retirando água quando o ar está úmido, e cedendo umidade para o ar quando este está extremamente seco.

Com todas estas vantagens, deverá ser levada em consideração a adequação dos modelos de equipamentos de secagens, pois secadores mal dimensionados ou com funcionamento inadequado podem estimular variações de umidade relativa e temperatura dentro das estufas que resultarão em perdas que não poderão ser atribuídas às características anatômicas da madeira ou ao processo da secagem em si (JANKOWSKY, 1995). Bons equipamentos irão originar produtos cada vez melhores, a custo baixo, respeitando a variabilidade pertinente à matéria-prima, e atendendo à demanda do progresso dessa área.

3.3.9 Defeitos de Secagem

A causa fundamental dos defeitos de secagem tem origem nas tensões que se desenvolvem na madeira (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

De acordo com Galvão (1975), o controle da velocidade de secagem é de suma importância, porque evitará o aparecimento de defeitos mecânicos, devido a tensões que a madeira desenvolve, podendo afetar a qualidade e conseqüentemente seu valor final. Como a perda de água é mais fácil na direção longitudinal do que a transversal, devido à direção do plano e ao eixo que se apresenta, poderão aparecer defeitos que impedirão o seu uso.

Na secagem convencional, Jankowsky (1995) relata que a madeira perde umidade da superfície seguindo em direção ao centro da peça, dando origem a um gradiente de umidade no sentido da espessura. Isto causa retrações diferenciadas, denominadas tensões de secagem, tanto de tração, como de compressão, perpendiculares à grã (fibras).

A ocorrência de defeitos na secagem convencional está ligada quase sempre à adequação do programa utilizado, pois diversos fatores afetam o comportamento da madeira durante a secagem. A seguir, de acordo com Arganbright (1981) e Mendes (1998), os defeitos usuais são:

- Rachaduras de topo e superfície – as rachaduras aparecem quando as tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras desenvolvem-se na superfície, devido a uma secagem inicial rápida produzindo diferença acentuada entre os teores de umidade da superfície e o centro da madeira;

- Rachaduras internas ou em “favos de mel” – surgem na peça quando se desenvolvem as tensões de tração no interior; estas tensões causam rachadura internas. O ideal é uma secagem lenta e uniforme.
- Endurecimento – ocorrem quando as capas superficiais da madeira perdem umidade rapidamente enquanto que o centro da peça permanece ainda úmido. Este defeito deve-se a aplicação de um tempo reduzido ao iniciar-se o processo a alta temperatura. O processo de acondicionamento é realizado para diminuir os esforços que ocasionam o endurecimento. É feito elevando-se a temperatura e a umidade relativa para aumentar a elasticidade e reduzir o gradiente de umidade na fase final da secagem;
- Colapso – aparecem quando os esforços da tensão capilar excedem a resistência à compressão perpendicular à grã da parede celular a qual ocorre normalmente quando os meniscos se movem através das pontuações da parede celular. Pode ser resultado da secagem muito rápida com elevado teor de umidade na madeira (acima do PSF no início da secagem)
- Empenos – é uma deformação que experimenta uma peça de madeira pela curvatura de seus eixos longitudinal, transversal ou ambos: pode ser encanoamento, arqueamento, encurvamento ou encurvamento complexo.

A figura (30) demonstra os defeitos que acontecem na madeira devido à má condução de programa de secagem.

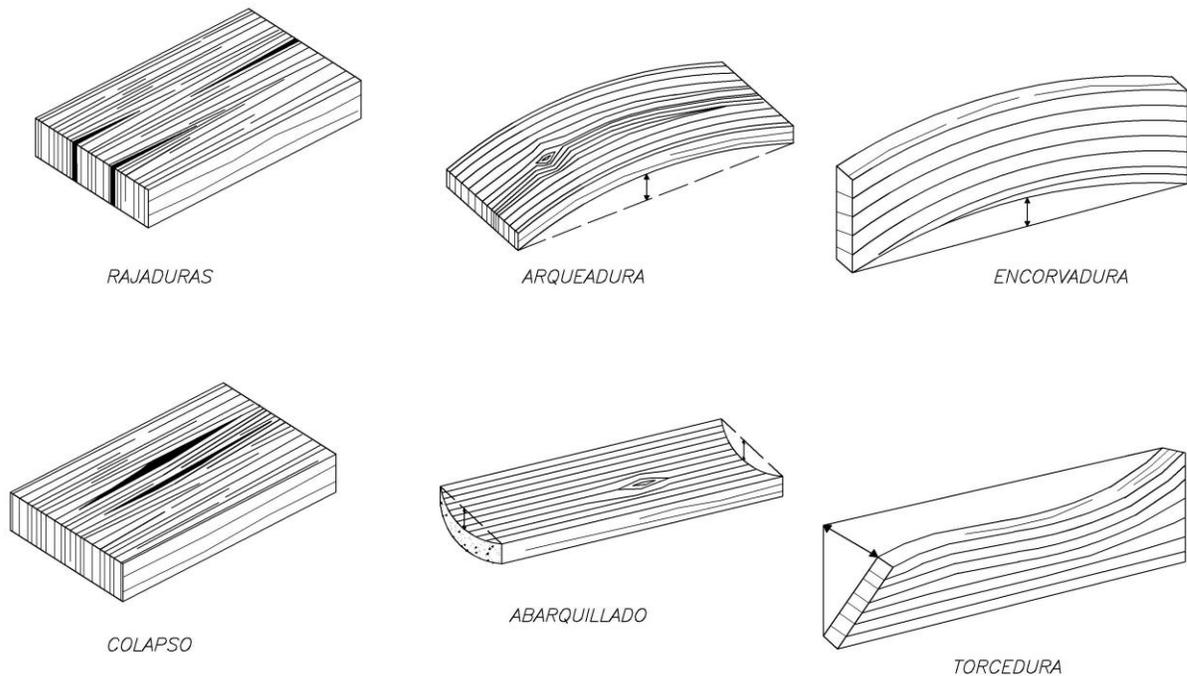


FIGURA 30 Defeitos na madeira. Site: arq. ufsc.br, 2012.

3.4 Programa de Secagem

De acordo com Oliveira (1981), o programa de secagem pode ser definido como “uma interferência ou ações que são realizadas durante a secagem através de controles da temperatura e da umidade”. Galvão e Jankowsky (1985) afirmam que os programas têm por objetivo reduzir a umidade até um valor pré-determinado, no menor tempo possível e com o mínimo de defeitos.

A escolha do programa de secagem para estufa convencional é muito importante para que sejam obtidos produtos de qualidade. Diferentes métodos de

ensaio visam indicar programa de secagem para espécies menos conhecidas, e são baseados na correlação do comportamento da madeira serrada com as propriedades físicas e mecânicas da madeira e do comportamento de amostras submetidas a diferentes condições de secagem (JANKOWSKY, 2009).

A adequada escolha do programa está relacionada a fatores como: espécie da madeira (massa específica, tendência a apresentar defeitos), espessura do material, utilização prevista e o tipo de equipamento de secagem utilizado (Martins, 1988).

Os programas baseados em umidade e temperatura são os mais utilizados na secagem convencional e possuem três fases distintas relatadas por Mendes et al (1998) e Galvão e Jankowsky (1985) :

- Aquecimento - a madeira é aquecida até que o bulbo seco indique a temperatura inicial do programa, sem iniciar a secagem superficial. As entradas e saídas de ar devem permanecer fechadas. Com isso, aumenta-se a umidade do ar, permitindo a transferência de calor e impedindo a transferência de umidade.
- Secagem - nesta fase mantém-se a temperatura do bulbo seco e reduz-se gradativamente a temperatura do bulbo úmido. Desliga-se a umidificação e abrem-se as entradas e saídas de ar. É a fase na qual é retirada a umidade do material até o PSF ser atingido.
- Uniformização e condicionamento - a temperatura e a umidade relativa dependem do programa e do teor de umidade desejado para a madeira. Esta é a fase final e visa o controle de qualidade do processo de secagem. Tem por objetivo reduzir a variação do teor de umidade entre as peças, eliminar o gradiente de umidade e aliviar as tensões de secagem eventualmente desenvolvidas durante a secagem.

Na análise de algumas experiências obtidas por pesquisadores ao testarem diferentes programas de secagem, Mello et al (2008) concluem que embora os programas de secagem de madeiras sejam objeto de estudo há décadas, ainda existe lacuna quanto ao programa adequado para várias espécies nativas brasileiras. Deste modo, programas de secagem para madeiras pouco conhecidas tornam-se cada vez mais importantes tendo em vista um melhor aproveitamento da madeira e qualificação desta matéria- prima.

3.5 A Secagem da Madeira no Brasil e seu Produtos

No Brasil, a maioria da secagem da madeira se dá em estufas convencionais. Acredita-se que seja em torno de 70% dos equipamentos. De acordo com Jankowsky (1999), isto se deve ao fato de que as estufas permitem maior flexibilidade de controle nos vários processos empregados para madeira serrada. O desenvolvimento da secagem em nosso país ocorreu de forma desordenada, o que dificulta o levantamento histórico (DUCATTI, 2001).

Entretanto, a partir de 1990, com a abertura do mercado nacional, ocorreu uma evolução significativa, pois foram agregados máquinas e equipamentos mais modernos, principalmente nos estados do sudeste e sul do país e geração de conhecimentos nos principais centros de pesquisa (TOMASELLI, 1998; JANKOWSKY, 1998).

De acordo com IPT (2009), os técnicos do setor madeireiro, na construção civil do sul e sudeste, que produzem produtos como pisos, esquadrias (portas e janelas), forros, e moveleiro, eram e são os que mais carecem de melhoramento com relação a qualidades dos produtos, pois se a madeira utilizada apresenta-se com defeitos, podem resultar em perdas monetárias substanciais. Também, é a parte da obra que sofre forte concorrência com relação a outros materiais (aço, cimento, etc.).

Durante décadas, estas regiões foram abastecidas com pinho-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) e a peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*). Contudo, com a exaustão dessas florestas, as espécies citadas foram sendo substituídas de forma significativa, a partir da região amazônica, no sul e sudeste geradas nos reflorestamentos, as madeiras de pinus (*Pinus spp.*) e eucalipto (*Eucalyptus spp*) (IPT, 2009).

O setor florestal brasileiro é um dos mais desenvolvidos e competitivos do mundo. O país detém uma parcela significativa dos plantios globais: 6.516.000 milhões hectares, de acordo com Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012). Mas, segundo Ducatti et al.(2000), as indústrias de base florestal, sobretudo as de transformação por processos mecânicos, estão habituadas ao padrão de qualidade doméstico, que é reconhecidamente inferior aos mercados internacionais.

Atualmente, as empresas da região sul e sudeste estão investindo com força na qualidade dos equipamentos, processamento, matéria-prima selecionada e mão-de obra operacional e gerencial, a fim de atingir as metas de qualidade (JANKOWSKY, 2004).

De acordo com Jankowsky (2012) discutir e abordar qualidade em produtos à base de madeira inclui necessariamente não só versar sobre o processo da secagem da madeira em todos os seus aspectos, mas interagir suas variáveis, como ilustrado na Figura 31. Isto é, desde a madeira propriamente dita (espécie, dimensão, massa específica, madeira de reação, madeira juvenil, nós, resina), equipamento de secagem (tipo, dimensão, ventiladores, radiadores, construção, controlador), processo (temperatura, umidade, fluxo de ar), controle efetivo do programa de secagem utilizado, realizado com recursos humanos (controladores), considerando variáveis do acaso (intercorrências).

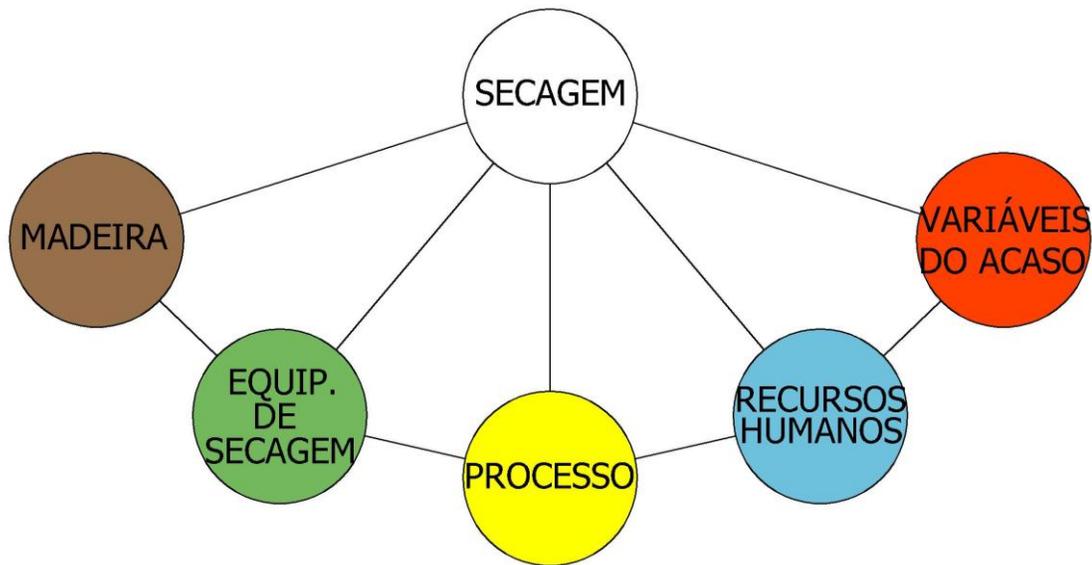


FIGURA 31 Secagem e suas variáveis (Adaptado de JANKOWSKY, 2012).

Vale ressaltar que os controladores são pessoas fundamentais para integrar as variáveis, pois com a experiência, a técnica, a condução e o atendimento antes, durante e após a secagem, pode proporcionar um diferencial no material que resulta em um produto de melhor qualidade.

Importantes estudos para determinar as propriedades físicas de resistência e rigidez da madeira, através da densidade aparente realizado por Dias e Lahr (2004), mostram que não utilizar equipamentos de alto custo, mas sim equipamentos simples e fáceis de operar, têm contribuído para que o conhecimento de várias espécies brasileiras possa ser utilizado de modo racional e consciente.

O uso da madeira para fins estruturais, em construção civil é muito utilizado no meio rural, pois é um excelente material para construção de pontes em estradas vicinais pelo seu potencial de resistência e durabilidade. A madeira é usada também no sistema

estrutural mais elementar, que é o de vigas simplesmente apoiadas e as treliças em coberturas (FIGURA 32 a 34). (CALIL JUNIOR E DIAS, 1997).

O processo de escolha da madeira pode ser realizado usando alguns parâmetros de fácil medida para correlacionar com as propriedades de resistência e rigidez. A classificação estrutural pode ser feita por vários métodos diferentes como: classificação visual, classificação de carga, máquina de classificações de tensões, vibração transversal e ondas de tensão (CALIL JUNIOR, et al., 2006).

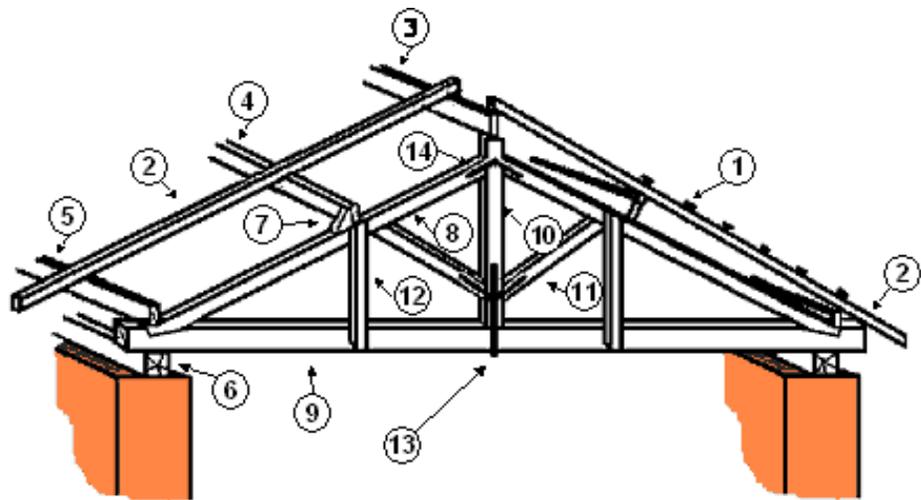


FIGURA 32 Ponte de madeira em Marília-SP.

Site: www.panoramio.com, 2012.



FIGURA 33 Pilares e Vigas de madeira usados em construção.
Site: revistacasaemconstrução.uol.com.br, 2012.



- | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – Ripas | 6 – Frechal | 11 – Escora |
| 2 – Caibros | 7 – Chapuz | 12 – Pontaleta, montante ou pendural |
| 3 – Cumeeiras | 8 – Perna ou empena | 13 – Ferragem ou estribo |
| 4 – Terças | 9 – Linha, tensou ou tirante | 14 – ferragem ou cobrejunta |
| 5 – Contrafrechal | 10 – Pendural ou pendural central | 15 – Vista, testeira ou aba |
| | | 16 – Mão francesa |

FIGURA 34 Cobertura com treliça de madeira. Site: inetgiant.com.br, 2012.

Fonte e Calil Junior. (2007) realizaram pesquisas onde relatam o uso da primeira construção de ponte de madeira laminada protendida transversalmente da América do Sul, com baixo custo de material e execução e na incansável busca de maior durabilidade das construções.

Devido à grande importância da secagem em agregar qualidade e valor a produtos a base de madeira, as indústrias têm rapidamente ajustado e mudado a tecnologia de secagem, buscando informações, técnicas e pesquisas. O Brasil, nas últimas duas décadas, tem investido em pesquisas com associação de algumas universidades e especialistas no assunto direcionado em aspectos aplicados na ênfase de melhorar a madeira serrada (JANKOWSKY e LUIZ, 2006).

Para os produtos de maior valor agregado (PMVA), a produção e o processamento de madeira de reflorestamento, tais como pinus e eucalipto para construção civil, são atrativos econômicos. Segundo o ABIMCI (2012), os PMVA são:

- Pisos de madeira (figura 35) – Os pisos de madeira mais conhecidos e utilizados atualmente são os pisos de madeira maciça e os engenheirados (compostos em camadas). São feitos, via de regra, com madeiras nobres.



FIGURA 35 Piso de madeira. 2012. (Foto da autora).

- Portas e janelas (figura 36)



FIGURA 36 Porta de madeira. 2012. (Foto da autora).

- *Blocks e blanks* (figura 37);



FIGURA 37 *Blocks e Blanks*. etsy.com 2012.

- *Decks* (figura 38);



FIGURA 38 *Deck* de madeira. Site: r6living.pt, 2012.

- *Molduras* (figura 39);



FIGURA 39 *Moldura – Rodapé* (Foto da autora).

- EGP (Edge Glued Panel - Painel Colado Lateral) (figura 40);



FIGURA 40 Painel colado lateral. Site: edemmarceneiro.com.br, 2012.

- Ferramentas (figura 41);



FIGURA 41 Ferramentas com cabo de madeira. Site: www.br.freepik.com, 2012.

- Componentes para móveis e outros - os pisos engenheirados são constituídos de diferentes materiais, como painéis (MDF, HDF, aglomerados e compensados), revestidos com lâminas de madeira ou papéis melanínicos (resinas de ureia e fenol melanínicos) fundidas nas duas faces, conferindo ao material uma superfície totalmente vedada, dura resistente ao desgaste superficial (figura 42).



FIGURA 42 Móveis, destacando as cadeiras e o pé da mesa central. 2012.
(Foto da autora).

As principais espécies utilizadas na fabricação dos PMVAs são o pinus e algumas espécies nativas, como o ipê, imbuia, jatobá e outras. Mas a espécie que vem ganhando importância como PMVA é o eucalipto (Figura 43). (ABIMCI, 2012).



FIGURA 43 Toras de madeiras de eucaliptos. Madeireira Santa Rita. 2011.
(Foto da autora).

Atualmente outros estudos têm sido desenvolvidos por vários autores nacionais e internacionais no que se refere à associação da madeira com outros materiais como o concreto e o aço, constituindo uma solução viável por apresentar desempenhos estrutural e econômico adequado e com boa durabilidade.

As empresas da região sul e sudeste estão investindo com força na qualidade dos equipamentos, processamento, matéria-prima selecionada e mão-de obra operacional e gerencial, a fim de atingir as metas de qualidade (JANKOWSKY, 2004).

Há mais ou menos vinte anos atrás, pesquisadores como Ponce (1995) relatavam que praticamente nenhuma serraria processava madeira plantada e manejada. As poucas que processavam madeira originária dessas florestas, o faziam para produção de lenha, fibra, carvão ou outra finalidade. Desde aquela época a cultura como a do eucalipto era uma das mais produtivas, avançadas e competitivas do mundo.

As causas mais prováveis para tão baixa participação no processamento de madeiras como eucalipto ou pinus são: falta de informação de como a madeira se comporta durante a secagem, desconhecimento das características anatômicas e, porque não, a abundante disponibilidade de outras espécies.

Ao longo dos últimos anos o cenário econômico mundial tem imposto aos países desenvolvidos do hemisfério norte, principais produtores e consumidores mundiais de produtos florestais, sérias restrições à continuidade do negócio, porque apresentam baixa produtividade florestal a um custo elevado de produção. Frente a este cenário, o hemisfério sul destaca-se como uma alternativa mais rentável, pois aqui se localizam as florestas tropicais apreciadas no mundo todo. É neste sentido que o movimento global caracteriza-se como uma oportunidade de crescimento para o setor madeireiro nacional, devido o Brasil possuir extensão territorial, características de solo e clima que favorecem o plantio e vocação para atividade florestal (Andrade, 2011).

4 METODOLOGIA

O estado da arte em secagem de madeira tomou como base os livros, artigos, teses e outros trabalhos acadêmicos. Os principais autores que permearam este trabalho, relativo ao histórico foram: RESENDE e MORAES (1975); PERLIN (1992); LEPAGE (1986) e WELLING e VANEK (1999).

Foi realizado levantamento de modelos de estufas de secagens de madeira, onde os autores KOLLMANN e CÔTÉ (1968), GALVÃO e JANKOWSKY (1985), PONCE & WATAI (1985), STEIN (2003) se sobressaíram.

Foi feita uma revisão com o objetivo de recuperar informações dos equipamentos de secagem de madeira, traçando o histórico até os dias atuais, determinando os modelos eficientes em função da qualidade, comercialização e projeção futura.

Realizaram-se visitas em algumas empresas que executam a secagem de madeira, para identificar os equipamentos usados quanto ao modelo e custo; sua eficiência quanto a defeitos pós-secagem, relacionando as vantagens e desvantagens do processo ao longo do tempo.

Inicialmente, para o levantamento sobre a evolução da tecnologia do processo de secagem de madeira, foi feita pesquisa em livros e artigos acadêmicos que elucidassem o início do processo de secagem no mundo e no Brasil.

As informações foram coletadas em três indústrias localizadas no interior de São Paulo. Uma indústria está sediada em Itu, SP e as outras duas no município de Tietê, SP. Os municípios foram escolhidos por possuírem estufas convencionais em funcionamento e às indústrias que permitiram visita e entrevista com técnicos para coleta de informações sobre o funcionamento e com autorização para fotos.

Realizou-se uma visita a uma indústria de grande porte, que fabrica secadores convencionais, com o objetivo de obter informações de fabricação, custo do equipamento e entrevista com vendedor do setor comercial. Nesta, não foi obtida a autorização para fotos.

O questionário sobre madeira estrutural a especialistas em secagem de madeira, foi realizado na forma de quatro perguntas iguais a todos entrevistados: na língua inglesa para os profissionais internacionais e em português para os pesquisadores brasileiros.

As perguntas feitas foram:

- 1) A Secagem de Madeira é importante para o uso em estruturas?
- 2) Em que tipo de estruturas é importante a secagem da madeira?
- 3) Para seu uso em estruturas, qual a secagem adequada?
- 4) Como o Sr. vê a tendência da Secagem de Madeira em seu país e no mundo?

4.1 Consulta prévia

A visita à indústria de fabricação de secadores foi agendada com a solicitação de um técnico com experiência no setor de secadores.

A empresa de fabricação das estufas convencionais e as indústrias localizadas no interior foram previamente contatadas, iniciando-se a pesquisa. Após foi solicitada a colaboração do técnico responsável no sentido de fornecer informações e autorização para fotos.

A entrevista sobre madeira estrutural a especialistas em secagem de madeira, foi realizado na forma de quatro perguntas iguais a todos entrevistados. Foi abordada também a tendência da secagem no país de origem e de âmbito internacional. As solicitações para responderem as perguntas foram feitas pessoalmente.

4.2 Levantamento em campo

As informações solicitadas aos técnicos abordaram aspectos relativos às espécies mais utilizadas, custo do equipamento, mão-de-obra, recursos humanos, detalhes do processo da secagem e técnicas utilizadas.

Durante as visitas, foram abordados os seguintes aspectos:

- Características dos secadores, quanto à construção, forma de carregamento, tamanho, capacidade útil, sistema de controle;
- Procedimentos realizados do controle do processo, relativos à existência de programas, conhecimento técnico dos operadores, testes que são feitos para se obter a qualidade da madeira e quantificação de defeitos;
- Qualidade de empilhamento, considerando a espessura dos separadores e a existência de mistura de espécies;
- Levantamento de custo do equipamento e se possível da mão de obra.

Nos secadores foram observadas as características do secador, sendo que duas indústrias eram constituídas de estufas de alvenaria, e outra, possuía secadores de alumínio (Figura 44).



FIGURA 44 Secador de alumínio. Indusparquet. 2012. (Foto da autora).

Quanto ao carregamento, a forma encontrada foi por vagonete e empilhadeiras, com cobertura para abrigo da madeira ao sair do secador, até ir para o destino final.

Com relação ao funcionamento, são praticamente ininterruptas, isto é, 24 h/dia, 7 dias na semana. Somente há suspensão quando necessitam de algum tipo de reparo ou averiguação da carga por alerta do programa de secagem.

O sistema opera por meio de programas selecionados conforme a espécie da madeira, espessura e para qual uso se destina, como se observa na figura 45.



FIGURA 45 Madeira para batentes de portas. Madeireira Uliana. 2012.
(Foto da autora).

A inspeção dos defeitos da carga submetida à secagem, normalmente, são feitos antes e depois da secagem, considerando principalmente os seguintes defeitos: colapso, rachadura, empenamento e as tensões de secagem.

São feitos testes de tensão após a fase de uniformização para verificação da necessidade de condicionamento da carga de madeira. Por meio destes testes é possível verificar o teor de umidade, a distribuição de umidade dentro das peças e a intensidade

das tensões internas. O laboratório local prepara as amostras segundo as recomendações de Galvão e Jankowsky (1985) e realiza a análise dos resultados.

Os teores de umidade são determinados pelo método gravimétrico, até a massa ficar constante, em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, e calculado com auxílio da equação 1:

$$U = \left(\frac{mu}{ms} - 1 \right) * 100 \quad (10)$$

onde:

U = teor de umidade (%);

mu = massa úmida da amostra (g);

ms = massa seca da amostra (g).

Foi observado o empilhamento das madeiras e seu tabicamento (espessura, espaçamento e qualidade do tabique).

Quanto ao custo do equipamento, foi conseguido através da empresa fabricante de secadores convencionais visitada, em entrevista com vendedores do setor comercial. Foi escolhida a estufa com capacidade de secar 30 m^3 de madeira serrada.

Para o custo de mão de obra para a operação de secagem, as 3 indústrias deram informações do custo por metro cúbico de madeira.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Empresas visitadas

As informações sobre a evolução dos equipamentos de secagem através da história se desenvolveram junto com as descobertas científicas e tecnológicas e também com estudos aplicados e avançados sobre a estrutura anatômica da madeira, sua composição e comportamento mecânico e físico.

Com a abertura do mercado nacional, houve um despertar para que houvesse melhora em nossa tecnologia brasileira no que diz respeito aos equipamentos e tornássemos competitivos no mercado internacional.

Os produtos como pisos, esquadrias (portas e janelas), forros e moveleiros, são os que mais se desenvolveram nestas últimas décadas. O desenvolvimento em equipamentos aconteceu principalmente no sul e sudeste do país.

A preparação da carga de madeira a ser colocada nas estufas é de importância vital nas empresas visitadas 1, 2 e 3, conforme figura 45a, 45b, e 45c.



FIGURA 46a Tabicamento da empresa 1. 2011. (Foto da autora).



FIGURA 46b Tabicamento da indústria 2. 2012. (Foto da autora).



FIGURA 46c Tabicamento da indústria 3. (2012). (Foto da autora).

Os tabiques são importantes, pois deixam espaços para que o ar possa circular durante o processo de retirada da umidade da madeira.

Foram constatados os seguintes aspectos:

- Cuidado ao escolher madeiras da mesma espécie ou com características semelhantes;
- Os tabiques com espessuras e tamanhos iguais para facilitar o tabicamento;
- Seleção da madeira serrada com espessuras e comprimentos pré-determinados;
- As peças estavam bem apoiadas e alinhadas, proporcionando maior estabilidade à pilha da madeira.
- Preocupação em não misturar madeira verde com peças secas parcialmente ao ar.

A importância dos controladores nas indústrias visitadas foi notada desde os primeiros momentos das entrevistas. Eles não só devem dominar a técnica das etapas do processo de secagem da madeira, como também ter conhecimento do comportamento da madeira que está sendo processada, para que aconteça um atendimento efetivo durante todo o processo.

A empresa que fabrica os secadores possui 320 funcionários e produz todos os itens que compõem um secador: paredes ou portas de alumínio, ventiladores, *dampers*, caldeira e conectores para as estufas de secagem.

A produção de secadores se dá conforme a solicitação, e relata o desaceleração do mercado pela crise mundial.

Na tabela 5, são mostradas informações gerais das indústrias visitadas. Foi realizado um levantamento da quantidade de secadores existentes e operantes, os produtos que são feitos com a madeira seca, assim como o número de funcionários, capacidade de secagem e se são realizados testes laboratoriais para avaliação da qualidade da madeira.

TABELA 5 Informações gerais das indústrias pesquisadas. Fonte: Obtidas nas entrevistas realizadas pela autora, 2012.

Indústrias	1	2	3
Quantidade de Secadores	2	6	17
Produtos	Decke, piso, batente	Portas e janelas	Pisos,forros, decks
Nº de funcionários	15	100	320
Testes laboratoriais	Não faz	faz	faz
Capacidade de secagem dos secadores (m ³)	60	260	1530

Na Tabela 1, podem ser observados aspectos relativos às indústrias visitadas que processam a secagem de madeira. As indústrias 2 e 3 são de grande porte, enquanto que a indústria 1 é de médio porte.

A indústria 1 exporta seus produtos para o exterior; já as empresas 2 e 3 operam no mercado nacional. A participação no mercado externo mostra-se relacionada com a produção. A indústria 3 exporta para mercados mais diversificados.

As empresas que fazem testes laboratoriais para avaliar a qualidade de seus produtos conseguem resultados muito satisfatórios com relação a perdas (peças com defeito que são descartadas) do que a empresa que não o faz (faz somente controle de umidade). Relatam-se perdas às vezes, na ordem de 10%-15% do produto.

As três madeireiras visitadas consideram o mercado mais exigente e força o investimento para aumentar a produção e qualidade dos produtos, auxiliando na consolidação da marca e posição no mercado tanto nacional quanto internacional.

A indústria de menor tamanho possui equipamento nacional e aparelhos controladores nacionais. A empresa 3 possui secadores internacionais e aparelhos controladores nacionais.

O nível de escolaridade dos controladores das 3 indústrias é nível de 1 grau e o aprendizado foi feito através de cursos e prática. A experiência do controlador da empresa menor é de 18 anos, quando das indústrias 2 e 3, o controlador possui em torno de 20 anos de experiência na secagem de madeira.

A empresa 1 seca todos os tipos de madeira, mas, especialmente eucalipto e pinus. As indústrias 2 e 3 utilizam em sua maioria, madeiras tropicais de diversos tipos (Jatobá, Sucupira, Ipê, Peroba, Muiracatiara, Maçaranduba e etc.). A empresa menor está investindo na secagem de madeiras de reflorestamento (Eucalipto e Pinus).

Os ventiladores dos equipamentos da indústria 1 são laterais, enquanto que, os das empresas 2 e 3, estão instalados na parte superior do secador. Considerando que atualmente a maioria dos ventiladores está na parte superior, os equipamentos das empresas 2 e 3 são mais atuais.

As 3 indústrias utilizam resíduos da própria serraria para manter o aquecimento da caldeira. O objetivo é diminuir os custos operacionais da secagem.

A empresa 1 contém secadores somente com carregamento com vagonetes, enquanto que a empresa 2, por empilhadeira. Já a indústria 3 possui em seus equipamentos os dois tipos de carregamento. O carregamento por vagonete é mais simples, visto que após o empilhamento o movimento se dá em cima dos trilhos.

Foi realizada a pesquisa de custo dos equipamentos como mostra a Tabela 6. O custo da estufa convencional foi levantado com base em uma estufa com capacidade de 30 m³ de madeira, através de informações do vendedor do setor comercial da empresa fabricante de estufas. O custo de uma estufa solar, de 8 m³ foi obtida através de informações de pesquisadores e fabricantes. Entretanto, o valor da estufa á vácuo foi conseguido através de catálogos, com capacidade de 5-15 m³.

TABELA 6 Custo dos equipamentos convencional, solar e á vácuo. Fonte: Obtidas nas entrevistas efetuadas pela autora, 2012.

Estufas	Convencional	Solar	Á vácuo
Custo	R\$ 158.000,00 a R\$ 2.000.000,00	R\$ 24.000,00 a R\$ 48.000,00	R\$ 49.780,00 a R\$ 85.000,00

Na figura 47, um secador convencional com capacidade maior, utilizado na empresa 3.



FIGURA 47 Secador convencional com capacidade para 150m³. Indusparquet, 2012.
(Foto da autora).

Quanto ao custo operacional por m³ de madeira das empresas visitadas, é mostrado da Tabela 7.

TABELA 7 Custo operacional por m³ de madeira em estufas convencionais. Fonte: Obtidas nas entrevistas efetuadas pela autora, 2012.

Empresas	1	2	3
Custo	R\$ 105,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00

5.2 Entrevistas realizadas

O resultado das entrevistas será apresentado na forma sequencial das perguntas e as respectivas respostas dos especialistas na ordem: um especialista da França, um do Canadá, um do Japão e dois especialistas do Brasil.

As perguntas e respostas obtidas estão descritas a seguir:

Pergunta 1

1) A Secagem de Madeira é importante para o uso em estruturas?

Resposta 1- O pesquisador Dr. Patrick Perré, do Laboratório de Processos e Engenharia de Materiais na França, em Paris, respondeu que nem sempre: pequenas estruturas não deformam muito e poderão secar rapidamente quando em uso. Grandes estruturas ou estruturas laminadas tem que ser secas.

Resposta 2- Dr Yves Fortin, da Universidade Lavál - Diretor do Departamento de Ciência da Madeira e de Floresta no Canadá, respondeu que a madeira usada em estruturas, mais cedo ou mais tarde terá seu teor de umidade equilibrado com o meio ambiente. Se não estiver em contato com o solo, umidade de equilíbrio poderá estar entre 8 e 9%, mas também depende se a estrutura está em contato direto com a atmosfera interna ou externa. Como a madeira começa a retrair aproximadamente a 30% do teor de umidade, ela precisa ser seca até atingir a umidade de equilíbrio da estrutura, para que seja assegurada sua estabilidade dimensional quando colocada em uso.

Resposta 3 - Especialista PhD. Hiroki Sakagami, Professor Assistente da Universidade Kyushu (Japão) - Laboratório de Tecnologia de Materiais de Madeira

afirma que a secagem de madeira para fins estruturais é importante e relata que antes, os Japoneses utilizavam madeira verde. Mas recentemente temos o tipo pré-fabricado. Todas as vigas, pilares, por vezes paredes, são feitas em fábrica. Se madeiras verdes são usadas, carpinteiros não podem construir a casa por causa da alteração dimensional.

Resposta 4- O brasileiro Dr. Djeison C. Batista, Professor da Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Ciências Florestais e da Madeira na cidade de Jerônimo Monteiro, declarou que a secagem é uma etapa fundamental em qualquer utilização da madeira na forma serrada, o que inclui as estruturas de madeira. Particularmente para as estruturas, a remoção da água da madeira aumenta a resistência mecânica, minimiza a deterioração por organismos xilófagos e permite a utilização de entalhes, uniões metálicas e adesivas. A secagem também reduz os custos de transporte das peças componentes das estruturas. Resumindo, caso o Brasil queira atingir o patamar de utilização e comercialização de madeira para fins estruturais que os países desenvolvidos têm, a secagem da madeira deverá ser seriamente considerada.

Resposta 5 – Para o pesquisador brasileiro Dr. Ivan Tomazelli, Presidente da empresa de Consultoria Engenharia e Gerenciamento – STCP Engenharia de Projetos Ltda. na cidade de Curitiba, respondeu a pergunta afirmando que sim, a secagem melhora a estabilidade dimensional de forma a reduzir a probabilidade de ataque de agente degradadores (especialmente fungos) e aumenta a resistência mecânica. Estes são todos fatores importantes para o uso da madeira em estruturas.

Pergunta 2

2) Em que tipo de estruturas é importante a secagem da madeira?

Resposta 1 - Perré afirma que em madeira laminada, devido à colagem, e em grandes estruturas: deformação e preservação.

Resposta 2 - Para Yves Fortin é importante secar a madeira utilizada em todos os tipos de estrutura, que não estão em contato com o solo. Não apenas para a estabilidade dimensional em uso, mas também para proteção da deterioração. A madeira com teor de umidade acima de 20% é um material apropriado para os fungos.

Resposta 3 - Hiroki Sakagami relata que maioria das casas japonesas é de madeira e fabricadas em empresas. Ele acha que os produtos fabricados para essas construções tem a necessidade de secagem.

Resposta 4 - Dr. Djeison sustenta que conforme a resposta anterior (pergunta 1), a secagem é imprescindível para toda e qualquer forma de utilização estrutural da madeira. Ainda que seja feita somente a secagem natural.

Resposta 5 - Para Dr. Ivan Tomazelli confirma que secar a madeira é importante em praticamente todos os usos, especialmente quando a intenção é agregar valor (processamento secundário). Portanto a secagem da madeira é importante em todos os usos em estruturas.

Pergunta 3

3) Para seu uso em estruturas, qual a secagem adequada?

Resposta 1 - Dr. Patrick Perré diz ter a sensação que os fornos convencionais são bastante adequados (com melhorias, tais como um bom isolamento).

Resposta 2 - No Canadá, Dr. Yves Fortin, afirma que as estufas de secagem convencionais nas temperaturas entre 60 e 82 °C são o meio mais popular do processo

de secagem para vigas estruturais. Este é um processo bastante suave e assegura que qualquer inseto que possivelmente esteja na madeira, seja morto pelo calor. Este não é o caso para secagens ao ar. No entanto, para a madeira muito permeável, como no caso de muitas espécies de pinho, a secagem à alta temperatura (110 a 130 ° C) também pode ser usada para fins estruturais.

Resposta 3 - Entretanto, para Dr. Hiroki Sakagami, existem muitos tipos de métodos de secagem. Temos que encontrar os melhores métodos, levando em consideração custos, qualidade da madeira, espécies e suas propriedades da madeira.

Resposta 4 - Dr. Djeison Batista elucida que uma das premissas básicas da Tecnologia de Secagem é a umidade final da madeira. Assim, essa umidade final deve ser próxima à umidade de equilíbrio do ambiente em que a estrutura será utilizada. A partir dessa definição, o técnico irá optar pela secagem natural ou artificial, tendo em vista os prós e contras de ambas as técnicas. Obviamente, se pensarmos em produção em larga escala, a secagem artificial deverá ser priorizada. Contudo, como a madeira utilizada em estruturas é, geralmente, de grandes dimensões e de espécies de difícil secagem, recomenda-se, prioritariamente à secagem artificial, à realização de pré-secagem. Dessa forma o ciclo em secagem artificial é significativamente reduzido, e com isso, os custos. O que não se pode esquecer para a utilização estrutural da madeira é que a secagem deve ser isenta de defeitos, porque reduzem drasticamente a resistência mecânica, trazendo graves riscos de acidentes.

Resposta 5 - O pesquisador brasileiro Dr. Ivan Tomazelli afirma que o processo de secagem a ser adotado, em princípio, não depende do uso final, mas sim das propriedades do material (madeira). Assim sendo, em geral, madeiras de alta densidade são de baixa permeabilidade e o processo de secagem indicado é normalmente de baixa temperatura. O mesmo se aplica para madeiras propensas ao colapso (como é o caso do eucalipto). Madeiras de densidade baixa ou média em geral têm permeabilidade mais elevada e os processos adotados podem utilizar temperaturas

mais elevadas. Estes são aspectos genéricos; no entanto, na seleção de processo uma gama de fatores (técnicos, econômicos/ financeiros, ambientais, e outros) deve ser considerada.

Pergunta 4

4) Como o Sr. vê a tendência da Secagem de Madeira em seu país e no mundo?

Resposta 1 - Dr. Perré (França) acredita em fornos capazes de proporcionar uma boa qualidade, com um tempo de secagem razoável e um baixo consumo de energia.

Resposta 2 - Dr. Fortin do Canadá, relata que em seu país, costumamos secar a madeira que usamos para construção em estufas até o teor de umidade entre 15-17%, isto é, pelo padrão norte-americano, com um máximo de 5% nas tábuas acima de 19%. Contudo, há uma forte tendência a favor de componentes estruturais de engenharia pesada, que requerem um teor de umidade mais baixo, cerca de 12-13%, e um âmbito mais estreito de variação do teor final de umidade. Essa mudança na estratégia de secagem é muito difícil de ser feita, uma vez que os controladores de fornos nem sempre são capazes de fazer um monitoramento adequado do processo de secagem, e acima de tudo, as indústrias relutam em gastar mais tempo secando suas vigas, uma vez que nem sempre recebem seu dinheiro em retorno para pagar o tempo extensivo da secagem e a formação da mão de obra. Para vigas de grandes dimensões, há uma tendência a favor do uso de estufas a vácuo, mas em escala menor. Com relação ao uso de energia, a tendência é usar sistema com recuperação de calor e substituir gás ou combustíveis fósseis por resíduos de madeira e casca. A pré-secagem do ar é raramente utilizada para vigas usadas em estruturas, mas é mais usada com madeiras duras para fabricação de móveis e pisos. Mundialmente ele teria que fazer alguma pesquisa para dar-lhe uma boa visão. Cada país tem algumas

estratégias específicas de secagem de madeira, que variam com as espécies e os usos pretendidos da madeira.

Resposta 3 - Dr. Hiroki Sakagami acredita ser uma pergunta difícil. Eu acho que podemos obter informações melhores na conferência que trate do tema. Podemos ver muitos tipos de métodos em turnês desse tipo.

Resposta 4 - Para Dr. Djeison, enquanto o ser humano utilizar madeira serrada haverá secagem; portanto, é uma área da Ciência que nunca acabará. A tendência é a mudança das técnicas, máquinas e equipamentos, mas as pressuposições básicas permanecerão as mesmas, porque o material é o mesmo. Como acontece em diversas outras áreas, a tendência é que as novas tecnologias sejam utilizadas primeiramente pelos países desenvolvidos e, depois, no Brasil e demais países em desenvolvimento. No Brasil, por exemplo, ainda não enxerga a possibilidade de utilização, em um horizonte próximo, de secagem artificial diferente da convencional (tais como vácuo, micro-ondas, etc.) em nível industrial. Assim, o futuro da pesquisa brasileira resume-se, em sua opinião, em poucas palavras: economia de energia no processo seja ela térmica ou elétrica.

Resposta 5 - Dr. Ivan Tomazelli declara que a tendência da secagem no Brasil e no mundo é muito similar. A busca é por processos mais competitivos, ou seja, por processos que possam secar no menor tempo, com o menor custo e sem degradação, ou melhorando as propriedades do material. Neste sentido, é importante trabalhar/desenvolver o processo (variáveis controláveis como temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e pressão) para cada espécie/material, e aperfeiçoar os equipamentos de secagem/controle. O equipamento otimizado é, em princípio, o que tem capacidade de criar e manter as condições definidas na carta de processo, seja fácil de operar/ controlar e que seja eficiente, especialmente no consumo energético.

As diferentes respostas dos especialistas para as perguntas realizadas têm vários pontos em comum e alguns divergentes. Isto mostra as diferentes realidades que acontecem em cada país, quanto à espécie, condições de utilização, umidade relativa do ar do local em que a madeira será usada, equipamento disponível para secagem, levando-se em conta o custo de todo o processo tecnológico. Resumidamente, a tendência mundial, segundo os pesquisadores, se destaca em equipamentos que reduzam o tempo de secagem, a baixo custo e atendam o mercado consumidor de forma eficiente.

5.3 Comentários sobre os desafios e oportunidades da secagem de madeira

De acordo com Tomazelli (2012), a secagem de madeira é um processo complexo afetado por muitas variáveis, de alto custo que pode comprometer a competitividade dos produtos no mercado. Entretanto, tem-se como desafio secar a madeira a um custo mais baixo possível e assegurar que a qualidade do produto seja preservada e melhorada.

Os principais desafios, segundo ele, são com relação aos processos e equipamentos. Para o processo seria garantir que o processo seja equilibrado e otimizado nas diferentes fases, criando um ambiente de secagem que maximiza a velocidade de secagem que assegure um equilíbrio entre a taxa de transferência de calor e taxa de remoção da umidade evitando o gradiente extremo de umidade para diminuir os defeitos. Já para o equipamento, relata que deve-se alcançar a eficiência no monitoramento e controle dos parâmetros de secagem definidos pela programação (temperatura, teor de umidade, velocidade do ar), garantir um ambiente de secagem uniforme e eficiente, incluindo o conhecimento e perícia dos controladores para desenvolver o controle e monitoramento do equipamento e do sistema propriamente dito.

Com relação às oportunidades que contribuem para o desenvolvimento da secagem de madeira, Tomazelli (2012) afirma que é possível melhorar primeiramente o processo, adotando-se novas variáveis que possam estar envolvidas nesta etapa e novas tecnologias para melhorar o controle sobre essas variáveis. Depois, quanto aos equipamentos: minimizar as perdas, maximizar a recuperação do calor, reduzir o consumo de energia, melhorar a precisão dos medidores de umidade e desenvolver e adotar sensores que facilitem o ajuste contínuos da velocidade de ar durante o processo e desenvolver dispositivos de leitura de temperatura adequados para fornecer informações precisas sobre a temperatura na superfície e interior da madeira usado no monitoramento do processo.

Finalmente, Tomazelli (2012) relata sobre as oportunidades que os controladores devem sempre buscar para que possam desenvolver-se nos vários aspectos relacionados à análise e interpretação dos resultados, sendo capazes de propor alternativas para melhorar os equipamentos e o processo.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados do levantamento histórico da evolução dos equipamentos de secagem da madeira, assim como modelos de estufas, visitas realizadas e entrevistas feitas a pesquisadores nacionais e internacionais, permitem concluir que:

- A evolução da tecnologia do processo de secagem é relativamente recente (50-60 anos atrás), e seu desenvolvimento aconteceu junto com as descobertas científicas e tecnológicas. Elas são fundamentais para ganhar competitividade e garantir o mercado para materiais e produtos;
- O surgimento do computador agilizou o processo de secagem com o uso dos programas desenvolvidos para cada espécie e espessura da madeira, atendendo a demanda do mercado consumidor. E a abertura do comércio nacional alavancou a melhora tecnológica objetivando a exportação;
- Os equipamentos mais comuns de secagem de madeira continuam sendo as estufas convencionais, mas as estufas solares são recomendadas e muito promissoras pelo seu baixo custo de investimento, manutenção e consumo energético, sendo úteis em pequenas empresas secadoras pela baixa capacidade em metros cúbicos de secagem; e, quanto aos equipamentos a vácuo, nacionalmente ainda tem representação pequena;
- O tabicamento é uma etapa muito importante do processo, e evita prejuízos;
- Ao realizar as visitas, foi percebida a importância dos operadores do processo de secagem. Eles continuam sendo uma peça fundamental para conduzir

eficientemente o programa de secagem e interagir as variáveis do processo para se conseguir um produto de qualidade;

- Os controladores reconhecem que para atingir um padrão de qualidade a nível internacional, deverá ser feito um controle de qualidade mais eficiente, principalmente no que diz respeito a alívio das tensões residuais;
- O custo da estufa convencional é alto, em comparação com os outros equipamentos, apesar de ser o mais comum e o mais frequentemente utilizado pelas empresas secadoras de madeira serrada. Um dos fatores de escolha do tipo de equipamento é a capacidade em m³ para atender a demanda do mercado. O custo operacional da secagem por m³ entre as indústrias visitadas foi mais alto nas empresas 2 e 3;
- Devido à grande importância da secagem em agregar qualidade e valor a produtos a base de madeira, as indústrias têm rapidamente ajustado e mudado a tecnologia de secagem, buscando informações, técnicas e pesquisas;
- As propriedades físico-mecânicas mais relevantes para a utilização da madeira como material estrutural considerada são: densidade, umidade, resistência, rigidez e combustão, e devem ser consideradas antes da secagem, para que a umidade de equilíbrio para aquele uso seja alcançado;
- As entrevistas a pesquisadores da França, Canadá, Japão e Brasil mostraram que reconhecem a importância da secagem da madeira estrutural antes de seu uso, levando-se em consideração as propriedades físicas-mecânicas e o uso a que se destina, com a qualidade requerida pelos padrões nacionais e internacionais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. www.abimci.com.br. Acesso em 23/06/2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas. NBR 7190 – **Projetos de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, ABNT, 1997. 107p.

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. www.abraf.org.br. Acesso em 22/05/2012.

AGUIAR, O. J. R. **Secagem acelerada da madeira baseada em suas propriedades Reológicas**. Palestra realizada I Simpósio sobre Secagem de Madeira. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – RS. 12 e 13 de abr. 2012.

ALZUETA, M. **Elementos de Tecnologia de la Madera**. Buenos Aires, Editorial Arte, 1942. 108p.

ANDRADE, A.; **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. Piracicaba - SP, 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Madeira). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz. 72p.

ANDRADE, A. ; **Análise Tecnológica e Econômica do Setor Brasileiro de Pisos de Madeira**. ANPM – Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira. 1ª edição. Piracicaba – SP. 2011. 69p.

ARGANBRIGHT, D. G. Post drying operations: defect. Analysis and schedule adjustment, Keys to quality control. In: **Proceedings western dry kiln clubs**. Oregon State University, 1981.

BARDI, P. M. **A madeira desde o Pau-Brasil até a Celulose**. Raizes Artes Gráficas. São Paulo, SP. 1982.135p.

BAUER, K. **Development and optimization of a low temperature drying schedules for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a solar assisted timber dryer**. Thesis (Ph.D. in Agricultural Sciences). Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, Hohenheim. 2003. 178p.

CALIL JR, C; DIAS, A. A. **Uso da madeira em construções rurais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.1, p. 71-77,1997.

CALIL JR, C. et al. **Manual de Projetos e Construção de Pontes de Madeira**. São Carlos: Suprema. 252p. 2006.

CUNHA, J. C. da. **A História das Construções, volume 1- Da pedra lascada às Pirâmides de Dahchur**. Autêntica Editora Ltda. Belo Horizonte, 2009.

DIAS, F.M.; LAHR, F. A. R. **Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente**. Scientia Forestalis. N.65, p. 102-113, Jun. 2004.

DUCATI, M. A.; JANKOWSKY, I.P.; ANDRADE, A. **Condições operacionais da secagem convencional em indústrias madeireiras no Município de Tietê, SP.** Scientia Forestalis. n.59,p 101-113, jun 2001.

FONTE, T. F.; CALIL JUNIOR. **Pontes Protendidas de madeira: alternativa técnico-econômica para vias rurais.** Engenharia Agrícola Jaboticabal, v.27 n.2, p. 552-559. mai/ago 2007.

GALVÃO, A.P.M. **Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil.** São Paulo. IPEF n.11, p.53-65, 1975.

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

GERALDO, F. C. **Biodeteriorização e preservação de Madeiras.** São Paulo. Montana Química. 1999.

GOMIDE, J. L. **Secagem da Madeira.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG. 76p. 1974.

HELLMEISTER, J. C. **Madeiras e suas características.** In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira, I, São Carlos, 1983. Anais. São Carlos: USP, EESC, Set. LaMEM, 1983. V.I

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira uso sustentável na construção civil.** IPT. 2 ed. 2009.

JANKOWSKY, I. P.; **Equipamento e processos para secagem de madeira**. São Paulo. In: Anais do Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria. IPEF/IPT,1995. p.109-118.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G.R.V. **Drying behavior and permeability of *Eucalyptus grandis* lumber**. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM. 14, 2004, São Paulo. Drying 2004, v B. Campinas: UNICAMP, 2004. pp. 1385-1389.

JANKOWSKY, I. P.; LUIZ, M.G.; **Review of wood drying research in Brasil: 1984-2004**. Drying Technology. 24: 447-455. Taylor e Francis Group. LLC. 2006.

JANKOWSKY, I. P.; **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem**. Tese (Livre Docência em Ciências Florestais, especialidade Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, SP, 2009. 119 p.

KLITZKE, R. J. **Secagem da Madeira**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná. 98p. 2003.

KLITZKE, R. J. **Manual de Secagem da Madeira**. Caderno didático, Curitiba. Universidade Federal do Paraná. 2005. 119p.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. V.1,592 p.

LEPAGE, E. S.; et al. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT/SICCT, 1986.

LIMA, O. **História da civilização**. 14. Ed . São Paulo: Edições Melhoramentos, 1919.

LOUZADA, J. L. P. C.; et al. **Avaliação do Comportamento de Secagem da Madeira em Estufa, para 14 Espécies Florestais.** II Congresso Ibero-Americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais. Curitiba, 9-13 de Setembro de 2002.

MARTINS, V. A. **Secagem de Madeira Serrada.** Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. **Comportamento reológico da madeira e derivados.** Ciência da Madeira, Pelotas, v.01, n.01, p.25-40, Maio de 2010.

MELO, R. R., et al. **Programas de Secagem para Madeiras.** 10^o Congresso Florestal Estadual - 1^o Seminário Mercosul da Cadeia Madeira. Florestas, Silvicultura e Mudanças Climáticas. Nova Prata – RS. 19-22 de Agosto de 2008.

MENDES, A. S., et al. **Programas de secagem para madeiras brasileiras.** Brasília – DF. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998. 114p.

MORAES, J. G. **Caminhos das Civilizações.** Da pré-história aos dias atuais. São Paulo. Atual Editora Ltda, 1993.

OLIVEIRA, L. C. S. **Perguntas e Respostas em Secagem de Madeiras.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Publicação Interna N^o 9. Dez/1981.

PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. **Madeiras nativas: anatomia, dendrologia, dendrometria, produção, uso.** Brasília. Fundação Mokiti Okada. 1997, 541p.

PERLIN, J. **História das Florestas: a importância da madeira no desenvolvimento da civilização.** Rio de Janeiro: Imago, 1992.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: LTC. 6 ed. 2008.

PORTO, A. J. M. et al. **Direito do Consumidor: Os 22 anos de vigência do código de defesa do consumidor**. Fundação Getúlio Vargas (FGV). Rio de Janeiro. Elsevier Editora Ltda. 2012.

PONCE, R. H. **Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas**. In: Seminário Internacional de Utilização da madeira de eucalipto para serraria. Anais. Piracicaba: IPEF/IPT/IUFRO/LCF – ESALQ – USP. 55-74p..1995.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de Secagem da Madeira**. São Paulo. IPT. 1985. 72p.

RESENDE, M. E. L.; MORAES, A. M. **História Fundamental da Civilização**. Belo Horizonte. Editora Bernardo Álvares, 1975.

SANTINI, E. J. **Secagem de Madeira Serrada em Estufa Solar e sua comparação com os Métodos Convencionais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR. 1981.

SHIMOYAMA, V. R.; BARRICHELO, L. E. G. **Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.*** In: Congresso anual de Celulose e Papel. 24, São Paulo, 1991. Anais. São Paulo: ABTCP. 1991.

SOUZA, P. F. **Tecnologia de Produtos Florestais**. Rio de Janeiro. Imprensa Nacional, 1947. 409p.

STAMM A. J. **Movement of fluids in wood. Part 2: diffusion**. Wood Science and Technology, New York, v. 1, 1967.

STANGERLIN, D. M., et al. **Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada.** Ciência Florestal, Santa Maria. v. 19, n. 4. p. 461-472. out-dez. 2009.

STEIN, F. R. **Avaliação Técnica do Tempo de Estocagem da Madeira.** Viçosa – MG. Curso de Pós-Graduação, *latu senso*, em Tecnologia de Celulose de Papel – UFV. 2003. 35p.

TOMAZELLI, I. **Pesquisa e desenvolvimento em secagem de madeiras.** In: WORKSHOP SOBRE SECAGEM DA MADEIRA DE REFLORESTAMENTO, 1, Piracicaba, 1998. Apresentações...Piracicaba:LCG, 1998. 1 CD-ROM.

TOMAZELLI, I. **Tropical Timber Drying.** Palestra na 12 International IUFRO (International Union of Forest Research Organization) Wood Drying Conference. Belém – PA Brasil. July 30 to August 03, 2012.

ZENID, G.J. **Madeira: uso sustentável na construção civil.** São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). 2 ed. 99p. 2009.

WELLING, J.; VANEK, M. **History and state of the art in conventional kiln drying.** Edingurgh. 1st Workshop “State of the art for kiln drying”. 13-14 October 1999.

REFERÊNCIAS DE SITES CONSULTADOS PARA FOTOS E FIGURAS

www.Infonet.com.br

www.brasile scola.com

www.madeireirafalsarella.com.br

www.fimacodobrasil.com.br

www.coisasdaarquitectura.files.wordpress.com

www.saporiti.com.br

www.arq.ufsc.br

www.panoramio.com

www.revistacasaconstrução.uol.com.br

www.inetgiant.com.br

www.etsy.com

www.r6living.pt

www.edemmarceneiro.com

www.br.freepik.com