

**SUMMARY**

*High temperature drying of timber is still unknown in Brazil. This paper presents some theoretical aspects and the overseas industrial experience. An analysis of the Brazilian conditions shows the importance and future of the high temperature drying process, especially in the southern region. Alterations can be introduced to the existing conventional kilns and advantages in reduction of costs and improvements in wood quality will be obtained.*

**1. INTRODUÇÃO**

O termo "secagem a alta temperatura" é utilizado geralmente para identificar um processo de secagem de madeiras no qual temperaturas de 100°C ou maiores são empregadas. Basicamente dois tipos distintos foram pesquisados e utilizados até a atualidade: vapor superaquecido e mistura ar-vapor. Na secagem a alta temperatura utilizando-se o vapor superaquecido, o termômetro de bulbo úmido é mantido a 100°C e o de bulbo seco a 100°C ou mais, sendo excluída a presença de ar. No processo com utilização da mistura ar-vapor, o termômetro de bulbo seco é mantido a temperaturas de 100°C ou mais; enquanto que o termômetro de bulbo úmido encontra-se a temperaturas inferiores ao ponto de ebulição da água.

Secar madeiras serradas a alta temperatura não chega a ser idéia recente. Já em 1867, Patente Americana de Nº 64398 foi concedida à Allen e Campbell, para utilização de um equipamento destinado a secagem de madeiras a alta temperatura com vapor superaquecido. Temperaturas de até 163°C foram utilizadas durante a primeira guerra mundial, nos Estados Unidos, para secagem de madeiras em estufas utilizando-se de jatos de vapor superaquecido, os quais eram também responsáveis pela circulação (31). Durante a segunda guerra mundial, cita-se que um número apreciável de estufas operavam em altas temperaturas, com vapor superaquecido, na costa ocidental americana. A rápida deteriorização do equipamento, e problemas principalmente relacionados à colapso da madeira, provocaram um uso descontínuo do processo (20).

Progressos foram feitos durante e

após a segunda guerra na Alemanha (19). O estabelecimento por Kauman dos teores de umidade equilíbrio para madeira em secagem a alta temperatura (15), visando um completo controle do processo até então realizado em bases impíricas, foi um grande impulso para o processo. Nos últimos anos intensa pesquisa utilizando-se da mistura ar-vapor vem-se realizando no Canadá (2,22,24,29), Estados Unidos (10,12,17), Alemanha (16,19), Índia (30) e Austrália (5,9,25). Em consequência, o uso industrial da secagem a alta temperatura vem-se tornando bastante freqüente, principalmente para o caso de coníferas.

**2. ASPECTOS FÍSICOS DO PROCESSO****2.1 Estágios de Secagem**

O processo de secagem a alta temperatura caracteriza-se por 3 estágios descritos por Fleischer (8) e mais tarde por Hann (10,11). O primeiro estágio distingue-se por uma taxa de secagem linear em função do tempo (figura 1). Durante este estágio a secagem ocorre na superfície da madeira e a taxa de secagem depende exclusivamente da taxa de transferência de calor do meio de secagem para a superfície. Água livre migra do interior do material para a superfície por pelo menos dois mecanismos: capilaridade e "expansão das bolhas de ar" durante o aquecimento. No 1º estágio a temperatura na superfície e no interior da madeira, em consequência da presença de água livre, permanecerá a cerca de 100°C, mesmo que a temperatura do meio de secagem esteja bastante acima. O cálculo da taxa de secagem é feita determinando-se a inclinação da parte linear da figura 1, utilizando-se da equação abaixo:

\* Eng. Florestal, M.Sc. em Tecnologia da Madeira, atualmente realizando o Ph.D. junto à Universidade de Melbourne, Austrália, como bolsista do CNPq.

$$K_1 = \frac{\frac{d}{d \theta} g}{\theta^{\frac{1}{2}} \cdot A} \quad \left\{ \frac{g}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}} \right\} \quad (\text{eq. 1})$$

onde:  $K_1$  = taxa de secagem durante o primeiro estágio

$$\frac{\frac{d}{d \theta} g}{\theta^{\frac{1}{2}}} = \text{inclinação da curva da figura 1}$$

$A$  = área em secagem

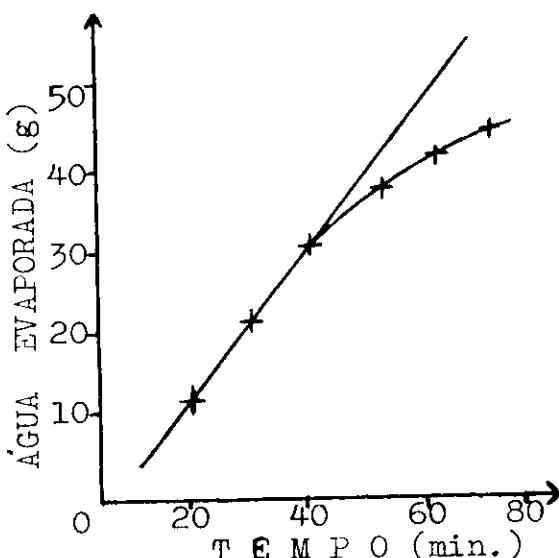


Figura 1: Curva típica para o primeiro estágio de secagem.

O segundo estágio inicia-se quando por alguma razão o fluxo de água livre para a superfície é interrompido, e em consequência a temperatura na superfície ultrapassa a 100°C. O mecanismo de secagem predominante é o de fluxo de massa de vapor, diferenciando-se do processo de secagem convencional onde a difusão de vapor é responsável. Durante este estágio a transferência de calor da superfície para a linha de vaporização (parte no interior da madeira onde ainda se encontra água livre), é considerado o fator limitante. O segundo estágio termina quando a temperatura no centro da madeira ultrapassa 100°C, ou seja quando a última porção de água livre é evaporada. A taxa de secagem é linear em função da raiz quadrada do tempo (figura 2), sendo determinada pela inclinação da curva utilizando-s e a equação abaixo:

$$K_2 = \frac{\frac{dg}{d\theta^{\frac{1}{2}} \cdot A}}{\left( \frac{g}{cm^2 \cdot min^{\frac{1}{2}}} \right)} \quad (eq. 2)$$

onde  $K_2$  = taxa de secagem durante o segundo estágio.

$\frac{dg}{d\theta^{\frac{1}{2}}}$  = inclinação da parte linear da curva da fig. 2

$A$  = área em secagem

A taxa de secagem durante o 1º e 2º estágios não é significativamente influenciada pela orientação da superfície em secagem, o que é o esperado caso a transferência de calor através da madeira seja o fator limitante — a condutividade térmica não difere significativamente nas direções tangencial e radial.

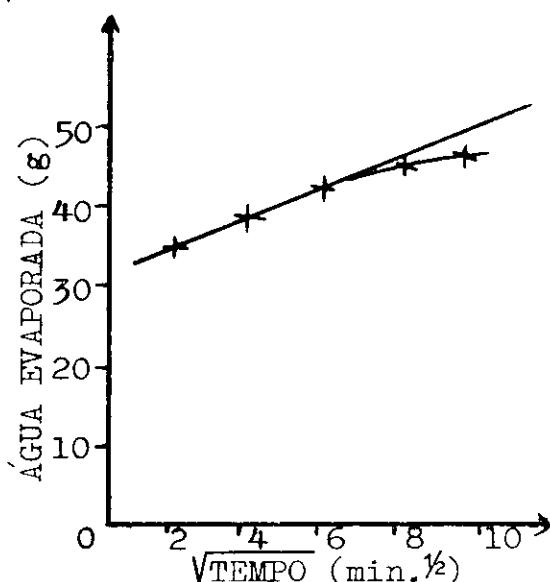


Figura 2: Curva típica para o segundo estágio de secagem. O tempo inicial é considerado o do término do primeiro estágio.

O terceiro estágio, inicia-se quando a última porção de água livre é evaporada, e prolonga-se até a madeira entrar em equilíbrio com o ambiente. Caracteriza-se por uma taxa de secagem decrescente à medida que o teor de umidade diminui. Apesar de ser relevante no aspecto físico da secagem, é considerado de menor importância na utilização prática, uma vez que normalmente ocorre quando o tec-

umidade médio da madeira em secagem encontra-se abaixo de 10%.

## 2.2 Temperatura no Interior da Madeira e Fatores Influentes

O uso da temperatura de 100°C para diferenciar os estágios de secagem, não é estritamente correto. Pressões maiores que a atmosférica poderão vir a ocorrer no

interior da madeira e em consequência valores mais elevados que o ponto de ebulição da água poderão vir a aparecer (11). A presença de um certo gradiente na pressão é fator responsável pelo aparecimento do mecanismo de "expansão das bolhas de ar", e do fluxo de massa de vapor o qual é característico do processo de secagem a alta temperatura, como anteriormente mencionado. A figura 3 apresenta curvas típicas para temperaturas internas da madeira submetida a secagem a 180°C, similar às obtidas por vários pesquisadores com o uso de termo-

elementos (10,11,16). Basicamente três fases distintas são observadas: o período de aquecimento inicial, o período de temperatura constante, e um segundo período de aquecimento até atingir a temperatura ambiente.

O tempo de permanência em cada período, para determinada espécie, depende principalmente da distância entre a superfície e o ponto de tomada de temperatura, do teor de umidade inicial, do meio de secagem, da velocidade do ar e da temperatura utilizada.

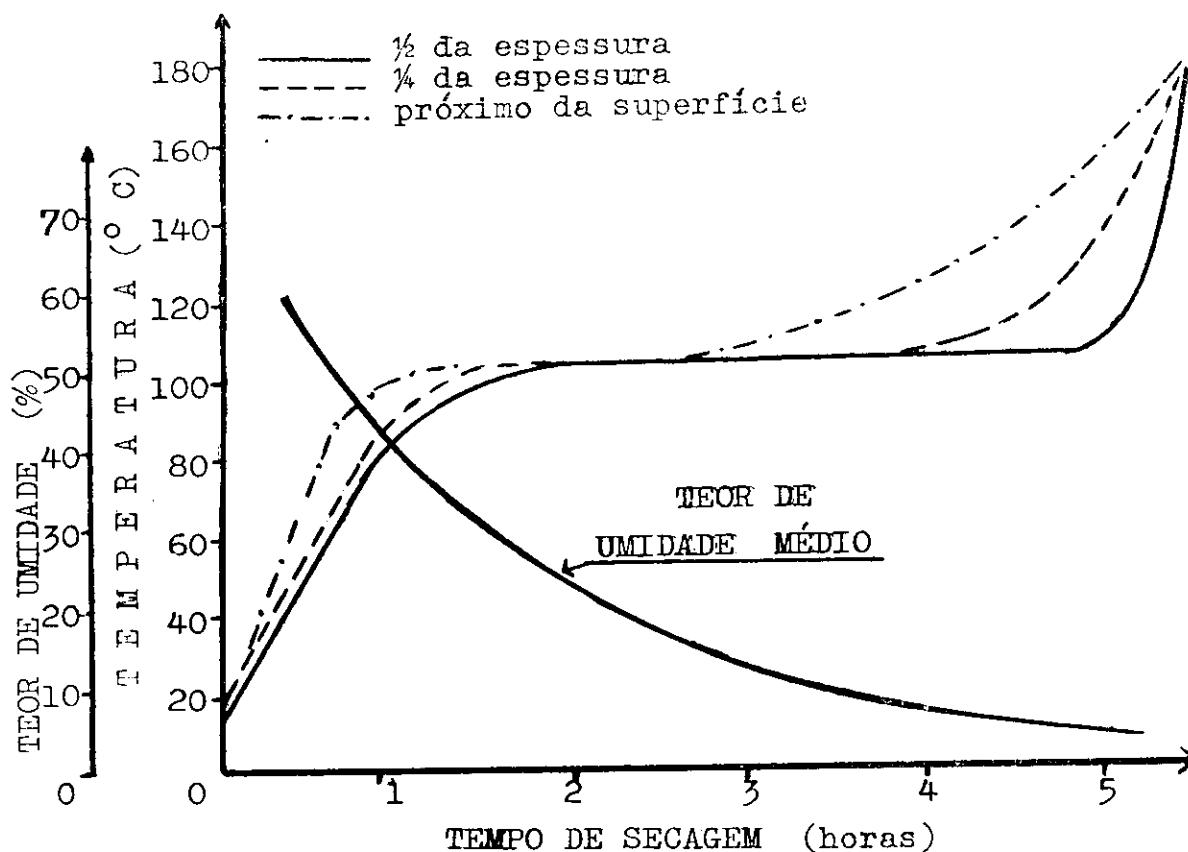


Figura 3: Curvas típicas da temperatura interna de um bloco de madeira submetido a secagem a uma temperatura de 180°C.

Observa-se na figura 3 que o teor de umidade médio do espécimem encontra-se abaixo de 10% quando a temperatura no centro ultrapassa 100°C, indicando o início do 3º estágio de secagem como anteriormente mencionado.

A velocidade do ar é fator decisivo no processo de secagem à alta temperatura. Um aumento no seu valor implicará em um aumento na taxa de transferência de calor para a superfície bem como uma maior rapidez na remoção da água pre-

sente. Sua influência consequentemente, é sentida principalmente no primeiro estágio de secagem, mas é ainda de importância relevante a teores de umidades médios de 20% (19), já durante o segundo estágio. Velocidades de 12m/s e temperaturas de 150°C têm-se revelado economicamente viável, obtendo-se tempos de secagem de 4 horas para madeira verde de *Pinus radiata*, com 25mm de espessura, resultando em uma qualidade favoravelmente comparável ao material seco em temperaturas convencionais(5).

### 2.3 Plastificação da Madeira

Além da redução do tempo de secagem, atribui-se ao processo de secagem a altas temperaturas o fato de induzir certa "plastificação" à madeira. Reduções significantes em empenamento foram constatadas em secagens realizadas com restrição da pilha (blocos de concreto no topo), consorciada com pré e pós-vaporizações(25,26). A importância do "processo de plastificação" é sentida principalmente na secagem de madeiras provenientes de povoamentos artificiais apresentando material juvenil (próximo à medula), que possuem grandes tendências a empenar. Do ponto de vista teórico, na utilização de elevada temperatura com restrição e vaporizações, supõem-se que a estrutura da lignina sofra certo "amolecimento", sendo as tensões internas liberadas. Com o resfriamento, ainda sob restrição, a lignina tornará a solidificar-se, desta vez na posição desejável(13).

### 3. Utilização Industrial

O uso industrial da secagem a alta temperatura tem-se tornado mais assíduo nos últimos anos. Geralmente madeiras de coníferas não apresentam problemas no uso do processo, e podem ser facilmente secas em 20 horas (25mm de espessura).

Resultados considerados excelentes vem sendo obtidos para madeira de *Pinus elliottii*, sendo os custos da operação 50% dos obtidos em métodos convencionais (9,17). Resultados semelhantes são obti-

dos na secagem de *Pinus radiata*(4). Para a secagem de madeiras serradas de folhosas, o principal problema encontrado tem sido o colapso(7). Algum sucesso vem sendo obtido(23,30), mas em geral o uso de presecagem e/ou recondicionamento torna-se necessário.

O tipo de estufa mais comum utilizado na atualidade pouco difere dos empregados em temperaturas convencionais. As principais alterações são: aumento da velocidade do ar (mínimo de 5 m/s), melhores condições de ventilação (entradas e saídas de ar), aplicação de restrição à pilha, isolamento e proteção da estrutura e partes metálicas. Em temperaturas tais como 120°C (bastante comum na indústria), ou superiores, ocorre liberação de ácidos, principalmente acético (13), além de outras substâncias voláteis que virão a acelerar a deteriorização do equipamento.

Em geral, a madeira submetida a secagem em altas temperaturas, apresenta uma certa descoloração da superfície, a qual não chega a ser problemática uma vez que a penetração é de frações de milímetros, sendo totalmente removida quando o material é aplinado(17,29). O efeito do processo de secagem a alta temperatura nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, parece variar com a espécie e condições em estudo. O teor de umidade equilíbrio é normalmente mais baixo para o material submetido a secagem em alta temperatura que para o seco convencionalmente (1,3,6,21,24,28,28,27). Esta redução em higroscopidade seria outra vantagem apresentada pelo processo, causando uma maior estabilidade dimensional (menor contração e inchamento). Para *Pinus elliottii* não foi constatada diferença significante nas propriedades mecânicas de madeira submetida a secagem em alta temperatura, comparada com a seca convencionalmente(17). Em virtude do tempo de secagem bastante reduzido, a proposição de uma processo de secagem contínuo para madeiras serradas, semelhante ao utilizado na secagem de lâminas, tomou bastante impulso nos últimos anos(5,18), e deverá em breve substituir as câmaras convencionais.

## 4. APLICAÇÃO AS CONDIÇÕES BRASILEIRAS

### 4.1 Vantagens para a Indústria Madeireira

As primeiras notícias acerca da introdução de estufas para secagem de madeiras serradas no sul do Brasil, datam de 1953, e cita-se o método convencional como o único processo artificial até a atualidade(32,33). A falta de conhecimento técnico-científico, acerca do processo de secagem, adicionado à baixa qualidade do equipamento, tem posto em dúvida a viabilidade do uso de estufas, cujos pontos críticos foram apontados em estudos passados(14,32).

A principal espécie em secagem artificial na região sul brasileira é a *Araucaria angustifolia*, conífera que não apresenta problemas graves. Preve-se a curto prazo um aumento gradativo na participação de folhosas. A médio e a longo prazo, no entanto, madeira proveniente de povoamentos artificiais de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, virão a participar em uma percentagem elevada no total de madeiras submetidas a secagem artificial.

Tecnologicamente, pouco é conhecido no Brasil acerca do comportamento desta espécies introduzidas, no processo industrial. O rápido crescimento torna-a propensa a formação de tensões internas, resultando em problemas no processo de secagem, principalmente no caso de madeira juvenil. A introdução do processo de secagem a alta temperatura, viria neste caso a contribuir em pelo menos dois aspectos importantes para a indústria madereira: a) Redução dos custos — como já mencionado os custos são cerca de 50% dos obtidos em métodos de secagem convencional; b) Melhoramento da qualidade do material. O processo de plastificação da madeira, anteriormente discutido, teria papel importante no melhoramento da qualidade, e diminuindo as perdas.

Paralelamente, outras vantagens podem ser alcançadas como uma maior estabilidade do material e diminuição sensível no tempo de secagem (maior rotatividade do estoque).

### 4.2 Adaptação do Equipamento

Alguns tipos de estufas atualmente utilizadas na secagem convencional podem ser convertidos para o uso em altas temperaturas. Para as condições sul-brasileiras, baseando-se em dados de estudos anteriores(32), os principais pontos são:

a) Melhoramento na velocidade do ar — obtido por meio de ventiladores mais eficientes conjugados com deflectores de ar. Um mínimo de aproximadamente 5 m/s é necessário;

b) Melhoramentos das condições de ventilação — posicionamento e dimensões das entradas e saídas de ar são muito importantes devido às altas taxas de secagem obtidas no processo;

c) Empilhamento — recomenda-se uma largura da pilha máxima de 1,80m, visando obter uniformidade no teor de umidade final do material(4). Algumas das estufas em uso no Brasil atingem larguras de até 2,50m, o que viria a dificultar a transformação para o uso do processo de secagem a alta temperatura. Cuidados especiais deverão ser tomados quanto ao sistema de empilhamento, recomendando-se sarrafos separadores de 25 mm de espessura, colocados a intervalos de não mais de 50cm. A aplicação da carga de restrição é indispensável, sendo o valor de 1000 kg/m<sup>2</sup> suficiente;

d) Sistema de aquecimento e vaporização — de maneira geral considera-se como suficiente os radiadores utilizados nas estufas atuais. Cuidados serão necessários com as caldeiras pois pressões bem mais elevadas são exigidas para atingir-se as temperaturas desejáveis. Para o processo de vaporização, apesar de poder ser realizado nas estufas normais, recomenda-se o uso de câmara separada, que tem provado ser economicamente viável principalmente no que diz respeito à durabilidade das estufas. A câmara de vaporização, não necessita de radiadores para aquecimento ou ventiladores, sendo de fácil manutenção e longa vida útil;

e) Proteção do equipamento — O uso de pinturas anticorrosivas com maior freqüência e de melhor qualidade são requeridas. Temperaturas elevadas degradam com facilidade o equipamento.

## 5. CONCLUSÃO

A secagem de madeiras serradas a alta temperatura, vem sendo pesquisada há cerca de um século. Somente nos últimos anos, devido a intensos estudos no setor é que bons resultados foram obtidos utilizando-se da mistura ar-vapor como meio de secagem. As tendências atuais são o de uso de um sistema contínuo para madeiras serradas.

O uso industrial do processo vem-se tornando bastante comum em vários países, principalmente na secagem de coníferas. As principais razões do sucesso são relacionadas ao reduzido custo da operação e da elevada qualidade do material, quando comparado com o submetido a secagens convencionais.

Para a situação brasileira, com evidência no sul do Brasil, onde extensos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* entrarão em breve, em fase de aproveitamento em grande escala, trata-se de um processo de alto valor. A adap-

tação das câmaras atualmente existentes visando a utilização do novo processo, na maioria dos casos não representará grandes investimentos de capitais.

Reconhece-se no entanto a necessidade de pesquisas visando um profundo conhecimento das condições brasileiras.

## 6. RESUMO

A secagem de madeiras serradas a alta temperatura é ainda desconhecida no Brasil. Define-se neste artigo algumas bases teóricas do processo e sua influência na madeira, bem como são apresentadas experiências práticas obtidas por indústrias de outros países. Para as condições brasileiras, sem sombra de dúvida, trata-se de um processo com grandes perspectivas de sucesso. Modificações podem ser introduzidas em estufas já existentes e o tempo de secagem poderá ser reduzido em mais de 50% sem prejuízos para a qualidade do material, e com diminuição sensível dos custos.

## 7. LITERATURA CITADA

1. CALVERT, W.W. High-temperature kiln drying of eastern Canadian species. *Can. Wood Prod. Ind.*, 5(7): 34-39, 1965.
2. CECH, M.Y. The status of high temperature kiln drying in eastern Canada. *Can. For. Ind.*, 93(8): 63-71, 1973.
3. CHRISTENSEN, F.J. Breakthrough in drying *C.S.I.R.O. For. Prod. Newsletter*, n. 377: 3-4, 1970.
4. .... & MACKAY, J.F.C. The future and practical application on high temperature seasoning of plantation of softwoods. *Aust. For. Ind. J.*, 38(10): 55-58, 1972.
5. .... & BARKER, L.S. High speed drying research and development of an experimental continuous feed mechanical kiln for sawn timber. *Aust. For. Ind. J.*, 39(6): 29-37, 1973.
6. COMBEN, A.J. The effect of high temperature kiln-drying on the strength properties of timber. *Wood*, 20(8): 311-313, 1955.
7. CUEVAS, L.E. 90% cut in hardwood drying time-using high temperature. *Aust. For. Ind. J.*, 40(12): 21-25, 1975
8. FLEISCHER, H.O. Drying rates of thin sections of wood at high temperatures. *B. Yale Univ.*, n. 59, 1953. 86 p.
9. GOUG, D.K. High temperature drying in 24 hours. *Aust. Ind. Jd.*, 40(10): 9-11, 1974
10. HANN, R.A. Drying yellow-poplar at temperatures above 100°. *For. Prod. J.*, 14(5): 215-220, 1964.
11. .... An investigation of the drying of wood at temperatures above 100 degrees centigrade. University of North Carolina, 1965. 1965. 203p.
12. HART, C.A. The drying of wood. *For. Tech. Rep.*, n. 27, 1965. 24 p.
13. HILLIS, W.E. The role of wood characteristics in high temperature. *J. Inst. Wood. Sci.*, 7(6): 60-67, 1975.
14. HILPERT, B. *Entwicklungsstand der kunstlichen Schnittholz Trocknung in Hobelwerken in Staate Parana*. Curitiba, 1972. 13 f. (cópia xerográfica de relatório).
15. KAUMAN, W.G. Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying. *For. Prod. J.*, 6: 328-332, 1956.
16. KEYLWERTH, R. & KUEBLER, H. Maximum operating temperatures and corresponding surface and interior temperatures in this softwood lumber during drying. *Deutsche Holzwirtschaft*, 8(6):1-2, 1954.
17. KOCH, P. High temperature kilning of Southern pine poles, timbers, lumber and thick veneer.. I.U.F.R.O. Meeting Proceedings, v.2: 568-611, 1973.
18. KOCH P. Trials of prototype roll-feed high temperature dryer for 8/4 southern pine. *For. Prod. J.*, 25(4): 24-28, 1974.
19. KOLLMANN, F.F.P. High temperature drying-research, application and experience in Germany. *For. Prod. J.*, 11(7): 508-515, 1961.
20. ... & COTÉ, W.A., Jr. *Principles of wood science and technology*. Berlin, Springer Verlag, 1968. 592 p.
21. KOZLIK, C.J. Effect of kiln conditions on the dimensional stability of Douglas-fir and western Hemlock. *For. Prod. J.*, 23(9): 85-92, 1973.
22. LADELL, J.L. High temperature drying of lumber. *Timber of Canada*, 15(11): 19-46, 1955.
23. .... High temperature drying of yellow birch. *For. Prod. J.*, 6(11) 469-475, 1956.
24. ... High temperature kiln drying of eastern Canadian softwoods - drying guide and tentative schedules. *Tech. Note. For. Prod. Lab. Can.*, n. 2, 1957 18 p
25. MACKAY, J.F.G. & RUMBALL, B.L. Drying of distortion prone juvenile core radiata pine for house studs. *Aust. Timb. J.*, 37(6): 43-57, 1971.
26. .... Plasticizing distortion prone softwood studs prior to high temperature seasoning. *For. Prod. J.*, 22(6): 27-28, 1972.
27. MACLEAN, J.D. Effect of heat on the properties and serviceability of wood-experiment on thin wood specimens. *U.S. For. Serv. EPL Rep.*, n. R1471, 1945.
28. SALAMON, M. Quality and strength properties of Douglas-fir dried at high temperatures. *For. Prod. J.*, 13(8): 339-344, 1963.
29. .... Effect of high temperature drying on quality and strength of eastern Hemlock. *For. Prod. J.*, 15(3): 122-126, 1965.
30. SHARMA, S.N.; BALI, B.I. & HERAMAN, M.A. Experiments on the high temperature drying of some Indian timbers. Part I. *Ind. For. B.* n. 230, 1961.
31. TIEMANN, H.D. *The kiln drying of lumber - a practical and theoretical treatise*. Philadelphia, 1917.
32. TOMASELLI, I. *Condições da secagem artificial de madeiras serradas no Paraná e Santa Catarina*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Curso de Eng. Florestal, 1974. 111 f.
33. ....; NOCK, H.P. & RICHTER, H.G. *Condições da secagem de madeiras serradas no Paraná e Santa Catarina*. *Floresta*, 6(2): 5-13, 1975.