

**GRADIENTE DE UMIDADE E DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES  
DA SECAGEM ARTIFICIAL DA MADEIRA DE *Pinus caribaea* var.  
*hondurensis***

I. P. JANKOWSKY

ESA LQ-USP, Depto. de Silvicultura, 13.400 - Piracicaba - SP

E. Z. HENRIQUEZ

C. P. G. em Engenharia Florestal da ESALQ - USP

**ABSTRACT** - The moisture gradient and stress development were evaluated during the kiln drying follow a traditional schedule. Although it had not been possible to determine the stress pattern, the moisture gradient permits the species characterization as a permeable wood that make possible to accelerate the drying through the increasing of the air circulation velocity. Based on the results and on the informations of other authors, it is suggested a schedule for the accelerated kiln drying of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* wood.

**RESUMO** - O gradiente de umidade e o desenvolvimento das tensões foram avaliados durante a secagem artificial da madeira serrada de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. A secagem foi conduzida seguindo-se um programa tradicional. Embora não tenha sido possível determinar um padrão característico para as tensões de secagem, o desenvolvimento do gradiente de umidade durante o processo permite caracterizar a madeira como sendo permeável. Isso torna possível acelerar a secagem aumentando-se a velocidade de circulação do ar durante o período de remoção da água capilar. Baseado nos resultados obtidos e em informações de literatura é sugerido um programa para a secagem acelerada para a madeira em estudo, programa esse que pode ser aplicado em secadores convencionais.

## **INTRODUÇÃO**

A secagem racional da madeira é uma das mais importantes operações dentro da indústria madeireira. A remoção de sua umidade até um teor adequado irá melhorar sua estabilidade dimensional, o que resultará em um produto final de alta qualidade.

É primordial que a secagem seja conduzida segundo um programa racional, isto é, uma seqüência estudada de temperaturas e umidades relativas que visa reduzir a umidade da madeira até um teor predeterminado, com o mínimo possível de defeitos. Porém, a maioria dos programas utilizados atualmente são conservadores, resultando em uma secagem consideravelmente demorada.

Esse fato tem motivado diversos autores (McMILLEN, 1969; RIETZ, 1970; GALVÃO, 1976) dentre outros, a pesquisar as possibilidades de se diminuir o tempo dispendido na secagem da madeira, através da elaboração de programas para secagem acelerada.

Durante o processo de secagem, a água presente na madeira movimenta-se do interior das peças até a superfície evaporante, dando origem a um gradiente de umidade. Esse fluxo de umidade é limitado pela permeabilidade natural da madeira enquanto o teor de umidade estiver acima do ponto de saturação das fibras, passando a sofrer a influência do gradiente de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

Analisando o efeito da velocidade de circulação do ar na taxa de secagem, HILDEBRAND (1970) pondera que velocidades iguais ou superiores a 3,0 m/s são economicamente vantajosas apenas para madeira muito úmida, decrescendo sua influência à medida que a madeira perde umidade. Essa afirmação também foi comprovada experimentalmente por JANKOWSKY (1980), cujos resultados mostraram que a taxa de secagem durante a remoção da água capilar é função da velocidade de circulação do ar, passando a sofrer a influência da temperatura durante a remoção da água higroscópica.

FERNANDES e GALVAO (1978/1979) mostram que a rapidez da secagem está diretamente relacionada com a inclinação do gradiente de secagem e esse gradiente decresce à medida que a secagem progride, diminuindo também a rapidez da secagem.

Porém, é importante ressaltar que durante esse processo, devido à retração da madeira em função da dessorção de umidade, surgem tensões internas capazes de ocasionarem defeitos, tais com rachaduras superficiais e encruamentos.

Estudos conduzidos por McMILLEN (1955 1963) mostram que, se as tensões de secagem ultrapassarem o limite de proporcionalidade da madeira ocorrerá uma fixação de tensões, ou seja, a madeira sofrerá uma deformação permanente que irá causar problemas durante o processamento final.

De acordo com HART (1966), tanto o gradiente de umidade como as tensões internas são importantes na secagem racional da madeira, estando intimamente associados com a sua permeabilidade natural.

Dessa forma, percebe-se que a elaboração de programas acelerados tem de estar baseada nessas informações. O gradiente de umidade deve ser mantido o mais inclinado possível após as tensões terem alcançado o seu valor máximo, sem desconsiderar a permeabilidade da madeira.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo estudar a variação do gradiente de umidade durante a secagem da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, determinando o padrão das tensões e quantificando os defeitos de secagem, de modo a fornecer subsídios para a elaboração de programas para secagem acelerada.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

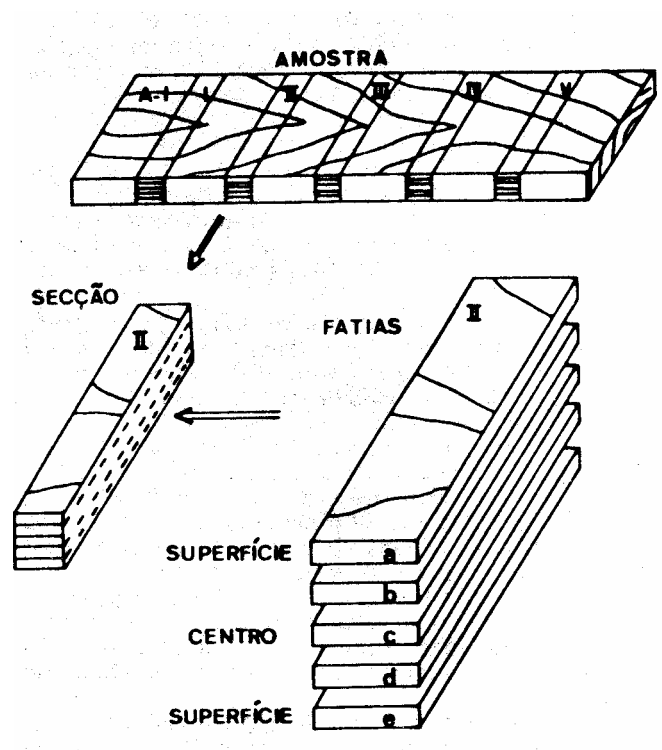
Na execução deste estudo foram efetuadas 4 secagens de madeira serrada de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, obtida de árvores provenientes do Horto Florestal de Tupi (Piracicaba-SP); do Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

A estufa utilizada foi uma Hildebrand, de laboratório, Modelo HD-4004V, com circulação forçada de ar e controle automático de temperatura e umidade relativa. A velocidade de circulação do ar foi fixada em 4,0 metros por segundo.

Cada carga em secagem era composta de 27 peças, com dimensões individuais de 2,5 cm x 10,0 cm x 49,0 cm, dispostas em 9 camadas separadas entre si por tabiques com 1,3 cm de espessura e 2,0 cm de largura. Devido à dimensão reduzida das tábuas, tomou-se o cuidado de impermeabilizar as suas extremidades com tinta betuminosa resistente à temperatura.

A perda de umidade da carga durante a secagem foi acompanhada através de 4 amostras de controle, cuja preparação seguiu as recomendações de RASMUSSEN (1968).

A determinação periódica do desenvolvimento das tensões e do gradiente de umidade foi feita em 2 amostras por carga. Em cada amostra foram marcadas 5 secções que, por sua vez, foram demarcadas em 5 fatias, conforme é ilustrado na Figura 1.



**Figura 1 - Esquema da preparação das amostras a serem utilizadas na determinação do gradiente de umidade e do padrão de tensões**

No início e no decorrer da secagem, as secções eram cortadas da amostra e precedia-se à determinação das tensões e do gradiente, de acordo com a metodologia desenvolvida por McMILLEN (1955). As dimensões das secções e das fatias foram determinadas com um paquímetro Mitutoyo para medição de ponto, com precisão de 0,05 mm.

O programa adotado no experimento foi o sugerido por PRATT (1974), para madeira de *Pinus* sp., que se encontra detalhado na Tabela 1.

A secagem foi conduzida na forma tradicional, como é normalmente feito na secagem de madeira em estufas industriais, seguindo os preceitos de RASMUSSEN (1968), HILDEBRAND (1970), entre outros.

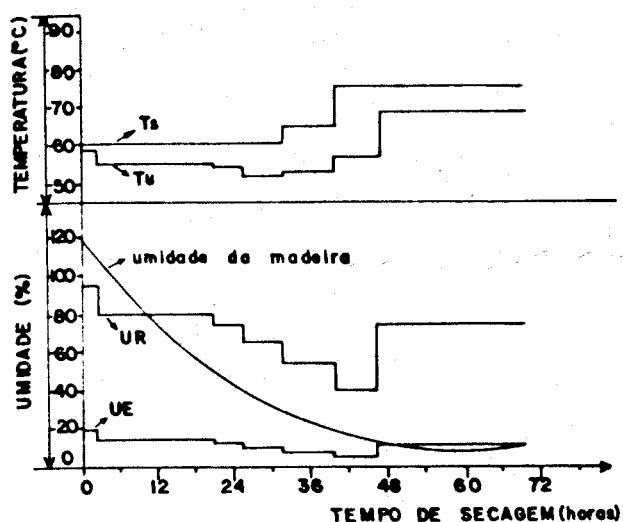
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação gráfica da secagem é apresentada na Figura 2, que ilustra as condições de temperatura, umidade relativa e umidade da madeira em função do tempo de secagem. Devido à desigualdade dos teores de umidade no início da secagem, a Figura 2 foi

ajustada para uma umidade inicial de 120%, de modo que pudesse representar o comportamento das 4 cargas.

A variação do gradiente de umidade ao longo da secagem pode ser observada na Tabela 2 e na Figura 3. Cada valor de umidade representa a média de 8 amostras.

Na Tabela 2 e na Figura 3 pode-se observar que o fluxo de água capilar do interior para a superfície da peça é ligeiramente menor do que a taxa de evaporação superficial. Assim, quando o teor de umidade na superfície atinge valores abaixo do ponto de saturação das fibras (considerado como sendo de 30%), o interior da peça está com teores de umidade bem próximos. Isso contribui para reduzir a magnitude das tensões que se desenvolvem durante a secagem, quando a superfície, estando com menos de 30% de umidade, tende a se retrair e é restringida pelo interior da peça que não se retrai, por estar com um teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras.



**Figura 2 - Representação gráfica das condições de temperatura de bulbo seco (Ts), temperatura de bulbo úmido (Tu), umidade relativa (UR), umidade da madeira e umidade de equilíbrio estimada (EU) durante a secagem da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis***

As curvas do gradiente de umidade (Figura 3) caracterizam a madeira como sendo permeável, de acordo com a descrição de HART (1966). Isso pode ser comprovado através da Figura 2, onde se nota que acima do ponto de saturação das fibras (remoção da água capilar) a média da velocidade de secagem foi de 2,8%/h (porcentagem de umidade retirada por hora de secagem), caindo para 1,0%/h durante a remoção da água higroscópica.

Essas considerações, aliadas aos resultados obtidos por JANKOWSKY (1980), permitem concluir que, em função da permeabilidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, um dos meios viáveis de acelerar a sua secagem é utilizar velocidade de circulação do ar elevada para remover a água capilar, isto é, durante os estágios iniciais da secagem.

**TABELA 1. Programa indicado por PRATT (1974), utilizado na secagem em estufa da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis***

<b>UMIDADE DA MADEIRA</b>	<b>Ts (°C)</b>	<b>Tu (°C)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>UE (%)</b>	<b>GS</b>
Aquecimento	60,0	59,0	95	20,0	-
Verde	60,0	55,5	80	13,1	>3,8
50%	60,0	54,5	75	12,0	4,2
40%	60,0	52,0	65	12,0	4,2
20%	65,0	53,0	55	7,7	3,9
20%	75,0	57,5	40	5,5	3,6

Onde: Ts = temperatura de bulbo seco  
 Tu = temperatura de bulbo úmido  
 UR = umidade relativa  
 UE = umidade de equilíbrio estimada  
 GS = gradiente de secagem

<b>FATIAS</b>	<b>UMIDADE MÉDIA (%)</b>			
	<b>Início</b>	<b>Após 24 horas</b>	<b>Após 48 horas</b>	<b>Após uniformização</b>
A	128,4	36,6	14,7	8,1
B	145,5	52,4	23,5	8,7
C	140,8	54,2	24,5	8,9
D	147,3	57,1	25,0	8,8
E	135,0	41,5	16,5	7,9

Uma vez que a remoção da água higroscópica relaciona-se com a inclinação do gradiente de umidade, sugere-se que, após a madeira em secagem ter atingido o ponto de saturação das fibras, a temperatura seja elevada e a umidade relativa diminuída, dentro de limites aceitáveis, de modo a aumentar a taxa de secagem sem ocasionar defeitos na madeira.

O comportamento da madeira em relação ao desenvolvimento das tensões durante a secagem é ilustrado nas Figuras 4, 5 e 6. Os resultados obtidos não permitiram que fosse determinado um padrão característico para a espécie em estudo. As Figuras 4, 5 e 6 mostram a variação que ocorreu para as diversas secagens.

McMILLEN (1968) já havia relatado que o padrão de tensões para o alburno de *Pinus ponderosa* era bastante complexo, ao passo que o comportamento do cerne foi similar ao das folhosas em geral. Uma vez que as árvores utilizadas neste experimento não tinham iniciado a formação do cerne, trabalhou-se com madeira que continha apenas alburno, podendo ter ocorrido uma influência da presença de madeira juvenil. Isso permite inferir que, provavelmente, as características da madeira foram a causa da variação encontrada no padrão de tensões.

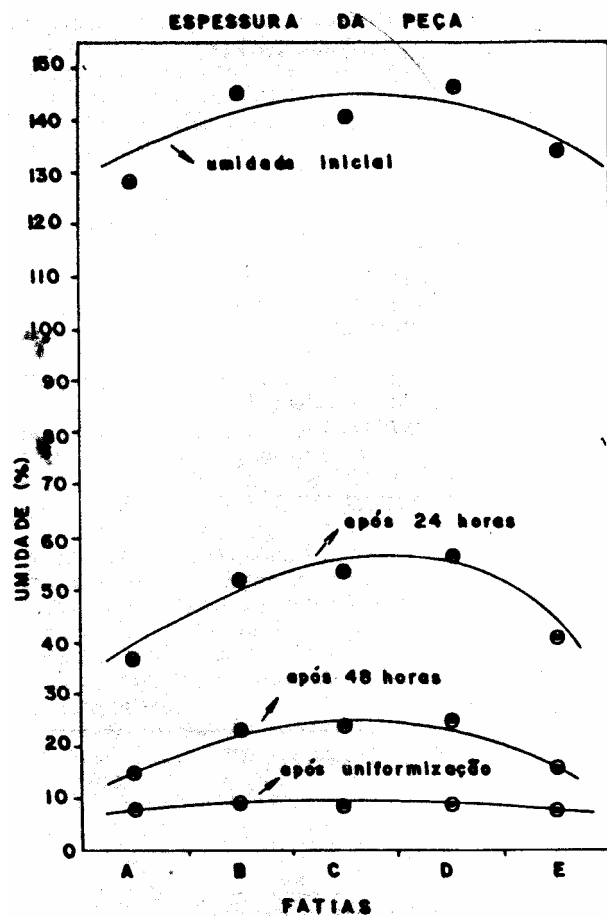


Figura 3 - Desenvolvimento do gradiente de umidade ao longo do período de secagem

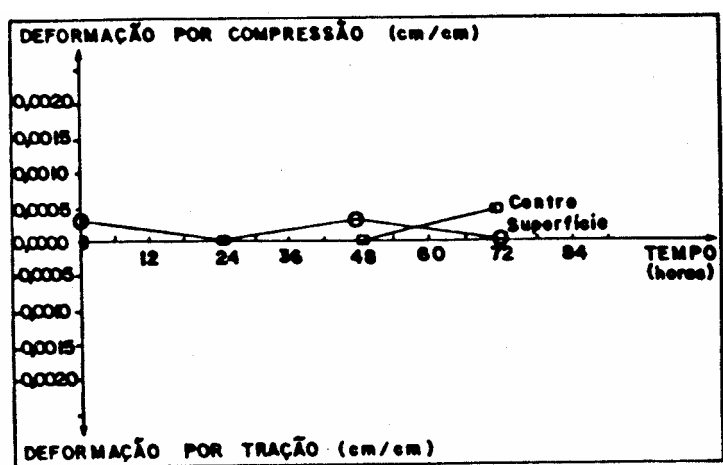


Figura 4 - Padrão de desenvolvimento das tensões durante a secagem das cargas 1 e 3 (A figura representa a média das duas cargas)

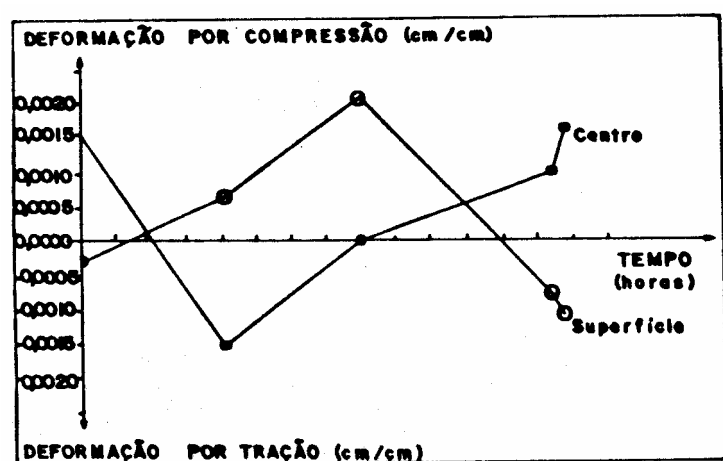


Figura 5 - Padrão de desenvolvimento das tensões durante a secagem da carga 2

TABELA 3. Sugestão de programa a ser adotado para a secagem acelerada da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

ETAPA (Umidade da madeira)	Ts (%)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	GS	Var (m/seg)
Aquecimento	60,0	59,0	95	20,0	-	1,5 a 2,0
Acima de 50%	60,0	57,0	85	15,3	3,3	4,0
50%	60,0	56,5	82	14,2	3,5	4,0
40%	60,0	54,0	71	11,0	3,6	4,0
30%	60,0	48,5	52	7,6	4,0	1,5 a 2,0
25%	60,0	45,0	41	6,1	4,1	1,5 a 2,0
20%	80,0	59,0	27	4,4	4,5	1,5 a 2,0
15%	80,0	53,0	15	3,0	5,0	1,5 a 2,0

Onde: Ts = temperatura de bulbo seco  
 Tu = temperatura de bulbo úmido  
 UR = umidade relativa  
 UE = umidade de equilíbrio estimada  
 GS = gradiente de secagem

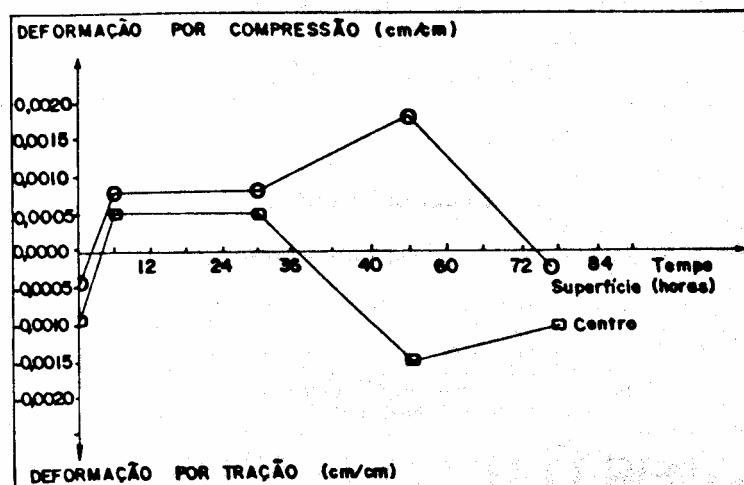


Figura 6 - Padrão de desenvolvimento das tensões durante a secagem da carga 4

Embora a permeabilidade da espécie permita acelerar a secagem, aumentando-se a velocidade de circulação do ar nos estágios iniciais, é importante conhecer o ponto de reversão das tensões, pois é a partir desse momento que se pode elevar drasticamente a temperatura sem o risco de aparecerem rachaduras na madeira. Para tanto, recomenda-se que seja feito um estudo mais aprofundado, verificando a influência das características da madeira no desenvolvimento das tensões, e qual o relacionamento com as condições de secagem.

Quanto aos defeitos de secagem, ocorreram apenas encanoamentos e empenamentos. Esses tipos de defeitos estão mais correlacionados com irregularidades ou desvios da grã, do que com as condições de secagem propriamente ditas. Segundo WENGERT (1972), a aplicação de pesos na parte superior da carga, de modo a exercer pressão sobre a madeira, contribui para evitar esses defeitos.

Com base nos resultados obtidos, na comparação dos mesmos com informações de outros autores, e considerando-se também que as condições de secagem adotadas neste experimento não provocaram rachaduras superficiais, é possível sugerir o programa da Tabela 3 para a secagem acelerada da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Esse programa provavelmente poderá ser adotado para a secagem de outras espécies de *Pinus* de rápido crescimento.

## CONCLUSÕES

A análise e discussão dos trabalhos obtidos no presente estudo permitem concluir que:

- a) a evolução do gradiente de umidade durante a secagem da madeira *Pinus caribaea* var. *hondurensis* caracteriza a espécie como sendo permeável;
- b) um dos métodos viáveis para acelerar a secagem da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é a utilização de velocidades de circulação do ar elevadas, na remoção da água capilar;

c) não foi possível determinar o padrão de tensões típico para a espécie, provavelmente devido às características da madeira utilizada;

d) o programa de secagem adotado no experimento é adequado para a espécie em questão.

Com base na discussão dos resultados, pode-se ainda sugerir:

a) que seja estudado mais profundamente o desenvolvimento de tensões, verificando qual a influência das características da madeira e o seu relacionamento com as condições de secagem;

b) a utilização do programa apresentado na Tabela 3 para a secagem acelerada da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo pela doação da madeira utilizada no experimento, e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão das bolsas de estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERNANDES, P.S. & GALVÃO, A.P.M.. Gradiente de umidade em peças de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayme). *Silvicultura em São Paulo*, São Paulo, 11/12: 87-92, 1977/1978.

GALVÃO, A.P.M.. Secagem acelerada: programa para a madeira de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayne). *IPEF*, Piracicaba (12): 151-61, 1976.

HART, C.A.. *The drying of wood*. Raleigh, North Carolina Agriculture Extension Service, 1968, 24p.

HILDEBRAND, R. *Kiln drying of sawn timber*. Plochingen, Richard Schorndorfer, 1970. 199p.

JANKOWSKY, I.P.. Efeito do aparelhamento e do tratamento preservativo superficial na secagem da madeira de *Pinus* spp.. *Circular técnica*. *IPEF*, Piracicaba (109): 1-11, 1980.

McMILLEN, J.M. Accelerated Kiln drying of presurfaced 1 - inch northern red oak. *USDA. Forest Service. FPL research paper*, Madison (122): 1-29, dez. 1969.

McMILLEN, J.M. Drying stresses in red oak. *Forest products journal*, Madison, 5 (2): 71-6, 1955.

McMILLEN, J.M. *Stresses in wood during drying*. Madison, Forest Products laboratory, 1963. 52p.

McMILLEN, J. M. Transverse strains during drying of 2-inch ponderosa pine. *USDA. Forest Service FPL research paper*, Madison (83): 1-26, set. 1968.

PRATT, G.H.. *Timber drying manual*. London, Department of Environment, 1974. 152p .

RASMUSSEN, E.F.. *Dry Kiln operator's manual*. Madison, Forest Products Laboratory, 1968. 110p.

RIETZ, C.R.. *Accelerating the Kiln drying of hardwoods*. Madison, Forest Products laboratory , 1970. 6p.

WENGERT,E.M.. *Review of high temperature Kiln drying of hardwoods*. Madison, Forest product Laboratory, 1972. 3p.

# Os melhores frutos do eucalipto.



A Aracruz criou mais de 5 mil empregos diretos no norte do Espírito Santo, onde estão suas florestas e fábrica de celulose. São engenheiros, tratoristas, pesquisadores, administradores e muitos outros profissionais, aos quais são oferecidas permanentes possibilidades de aperfeiçoamento. A alta qualidade da celulose Aracruz deve-se, principalmente, ao trabalho dessas pessoas.

Mas a política de pessoal da empresa não se limita às oportunidades de treinamento e acesso. Assistência médica e hospitalar, e um sistema de ensino de 1º e 2º graus são assegurados a todos os empregados e seus familiares.

A Aracruz também criou novas alternativas de progresso. A infra-estrutura montada para recebê-la estabeleceu condição para a implantação de novas indústrias na região, importante contribuição para a interiorização do desenvolvimento capixaba.

Além disso, a Aracruz, que produz anualmente 400 mil toneladas de celulose, é uma grande fábrica de divisas. Suas vendas ao exterior representam 145 milhões de dólares anuais, que a colocam entre os 20 maiores exportadores brasileiros.



**ARACRUZ CELULOSE S.A.**  
Raízes brasileiras do progresso.