

IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA  
CUIABÁ – JULHO DE 2004

**TRATAMENTO MECÂNICO VISANDO O AUMENTO DA PERMEABILIDADE EM  
MADEIRA DE *Pinus elliotti* ENGELM VAR. *elliottii*.**

**Washington Luiz Esteves Magalhães** (wmagalha@cnpf.embrapa.br)  
Embrapa Florestas

**Graciela Inez Bolzon de Muniz** (gbmunize@ufpr.br), **Ricardo Augusto Mazza** (mazza@floresta.ufpr.br)  
Universidade Federal do Paraná – Setor de Ciências Agrárias - Departamento de Engenharia Florestal

**RESUMO:** Amostras de madeira de *Pinus elliotti* Engelm var. *elliottii* ainda verdes foram submetidas a tratamento mecânico de compressão uniaxial na direção radial. Construiu-se um aparato simples para caracterizar o tratamento através da medição do valor da permeabilidade ao ar por deslocamento de uma coluna d'água. A permeabilidade a líquidos foi medida impregnando-se as amostras de madeira com solução aquosa de polietileno glicol (PEG) a 10 %. O tratamento aumentou a permeabilidade ao ar da madeira nas direções longitudinal e tangencial, sendo que a permeabilidade a água aumentou em todas as direções.

**Palavras-chave:** permeabilidade ao ar, permeabilidade a líquidos, madeira maciça, compressão uniaxial, tratamento mecânico

**MECHANICAL TREATMENT FOR INCREASING PERMEABILITY OF SOLID  
WOOD FROM *PINUS ELLIOTTI* ENGELM VAR. *ELLIOTTII*.**

**ABSTRACT:** Solid green wood from *Pinus elliotti* Engelm var. *elliottii* were mechanically treated by uniaxial compression in the radial direction. An home made apparatus were used to characterize the treatment for measurement of air permeability through water column displacement. Liquid permeability were evaluated by samples impregnation with aqueous solution of polyethylene glycol (PEG) at 10 %. The treatment increased air permeability in the longitudinal and tangential directions, moreover water permeability increased in all directions.

**Keywords:** air permeability, liquid permeability, solid wood, uniaxial compression, mechanical treatment

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira maciça de pinus apresenta os mais diversos usos como em molduras, painéis lateralmente colados, painéis compensados, vigas, esquadrias, móveis, lápis, entre outros. As espécies do gênero *Pinus* são propícias ao florestamento, entre outros motivos, por apresentar um rápido crescimento. Apesar desse rápido crescimento, os plantios têm sido explorados cada vez mais cedo, e dessa forma, é preciso adequar a tecnologia para melhor utilizar a madeira juvenil proveniente desses abates precoces.

Um avanço tecnológico é a secagem rápida (NIJDAM et al. (2000)) dessa madeira com o emprego de altas temperaturas em estufas de processamento contínuo. Durante o processo de secagem rápida é comum ocorrer a aspiração das pontuações, principalmente nas regiões com parede celular de pequena espessura e baixas densidade e resistência mecânica, próprias do lenho inicial.

A aspiração da pontuação ocorre quando ainda existe água livre no lúmen das células (SIAU (1971)). A retirada rápida dessa água causa uma pressão que é proporcional ao inverso do diâmetro do capilar. Assim, a membrana da pontuação, composta pelo torus e o margo, sofre uma pressão no sentido de comprimi-la contra a auréola, causando um selamento da pontuação aureolada. Na junção entre a membrana e a auréola, após a aspiração da pontuação, passam a atuar as forças de atração do tipo ligação de hidrogênio. Via de regra, para se desfazer a aspiração o melhor é uma total reidratação da madeira.

A aspiração das pontuações pode causar uma diminuição na permeabilidade da madeira de até dez vezes. Em muitas aplicações industriais em que se necessita de impregnações com monômeros, ceras ou parafinas, a baixa permeabilidade da madeira resulta em tratamentos defeituosos e conseqüentes prejuízos.

Em madeira de *Pinus radiata* quanto mais drástica a secagem maior será a permeabilidade, em virtude do principal mecanismo de transporte de líquidos ser através dos canais de resina e, assim, a aspiração da pontuação deixa de ser importante (BOOKER e EVANS (1994)). Entretanto, em algumas espécies como o *Pinus caribaea hondurensis*, uma secagem drástica provoca rachaduras externas e internas, além da aspiração das pontuações.

A permeabilidade depende da posição no tronco da árvore assim como se a madeira é juvenil ou madura. A permeabilidade longitudinal de madeira de *Pinus taeda* (MILOTA et al. (1995)) é menor na parte inferior do que na superior da árvore. Madeira madura também apresenta maior permeabilidade do que a madeira juvenil, não sendo uma função apenas da densidade.

Neste estudo é apresentado um tratamento por compressão uniaxial de peças ainda verdes de madeira maciça de pinus. Esse tratamento visa aumentar a permeabilidade da madeira. Para a caracterização do tratamento foi construído um aparato simples para a medida da permeabilidade ao ar da madeira tratada e compará-la à madeira não tratada. Também usou-se a técnica da impregnação das amostras com solução aquosa de polietileno glicol (PEG) a 10 %, para medir-se a permeabilidade a líquidos e caracterizar o tratamento proposto.

## 2. MATERIAL E MÉTODO.

Usou-se madeira de uma tora de árvore de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. Os caibros foram desdobrados da tora com os anéis de crescimento paralelos a uma das faces. Desses

caibros foram retiradas 102 amostras com dimensões nominais de 3,0x3,0x10,0 cm e isentas de defeitos.

As amostras ainda verdes foram submetidas a uma compressão axial na direção radial (Figura 1). Dois níveis de carga foram usados para que as amostras sofressem deformações correspondentes a 1/3 e 1/2 da dimensão radial original da peça. Após a compressão desejada ter sido atingida, aliviou-se a carga aplicada e deixou-se que a peça retornasse à sua dimensão original espontaneamente. A seguir as amostras submetidas à compressão e também as não prensadas e usadas como testemunhas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 50°C até a obtenção de peso constante.

De cada amostra, com ou sem tratamento, foram retirados três cilindros com diâmetro nominal de 1 cm, de forma que seus eixos fossem paralelos às direções longitudinal, tangencial ou radial. Os cilindros usados na medida da permeabilidade longitudinal, tangencial e radial foram cortados com comprimentos nominais de 3, 2 e 1 cm, respectivamente (Figura 1 e 2). Cada cilindro teve a sua superfície lateral selada com cola a base de silicone para garantir todo o fluxo na direção do eixo. Foram usados em média 33 cilindros para cada tratamento e direção de permeabilidade desejada, totalizando 282 cilindros usados nas medições.

Para a determinação da permeabilidade ao ar foi construído um aparato simples para medir a diferença de pressão entre as extremidades do cilindro e a vazão de ar que atravessa a amostra (Figura 3). A amostra é introduzida em mangueira de silicone sendo aplicada cola de silicone para vedar e evitar o vazamento de ar entre o cilindro e a mangueira.

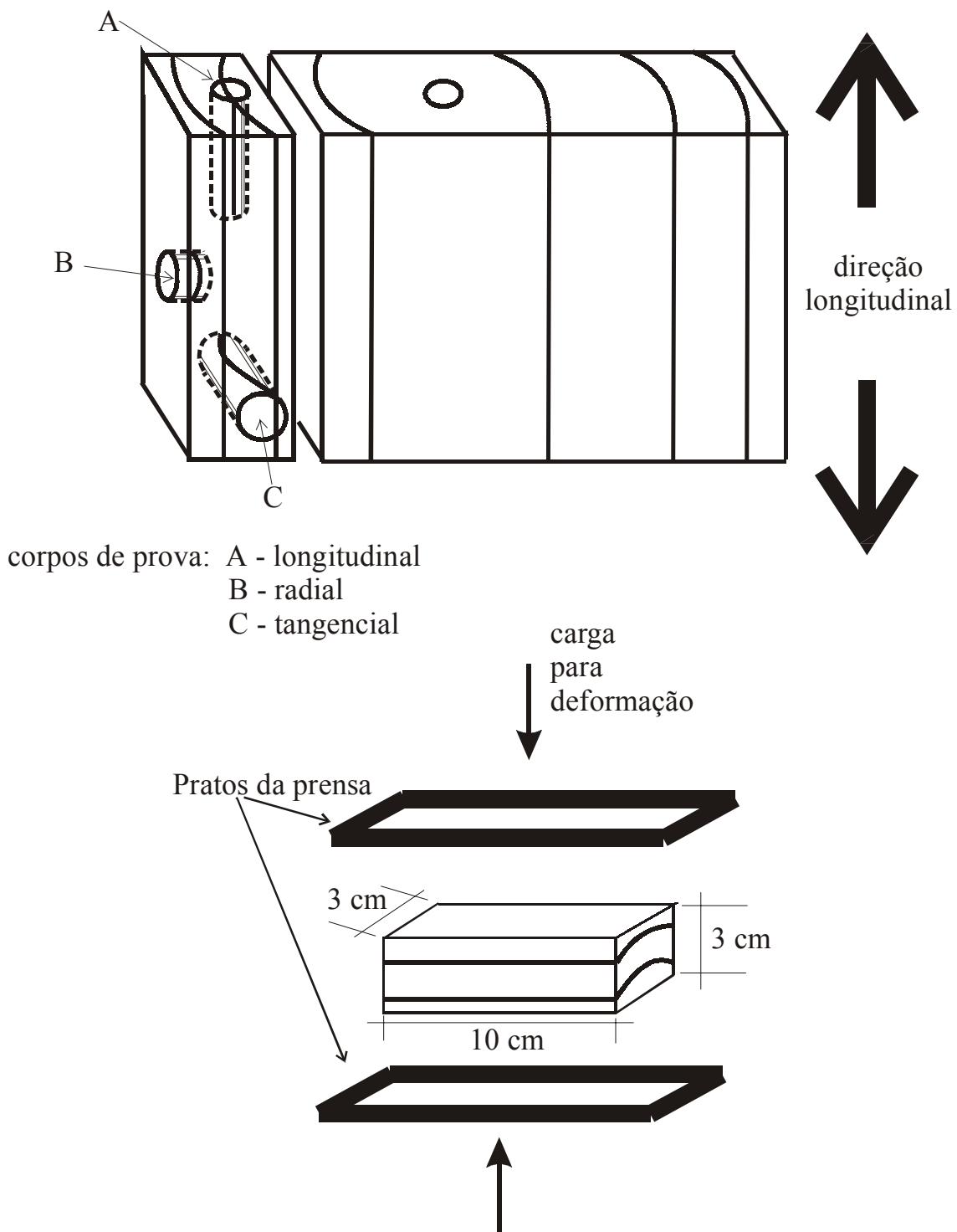


Figura 1 – Vista do corte dos corpos de prova e da direção de prensagem

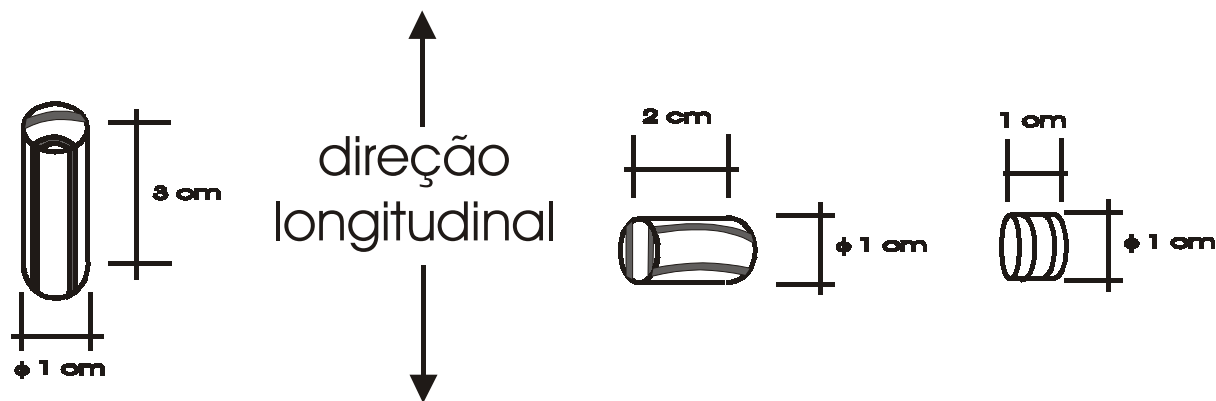


Figura 2 - Cilindros de madeira usados para medir a permeabilidade ao ar.

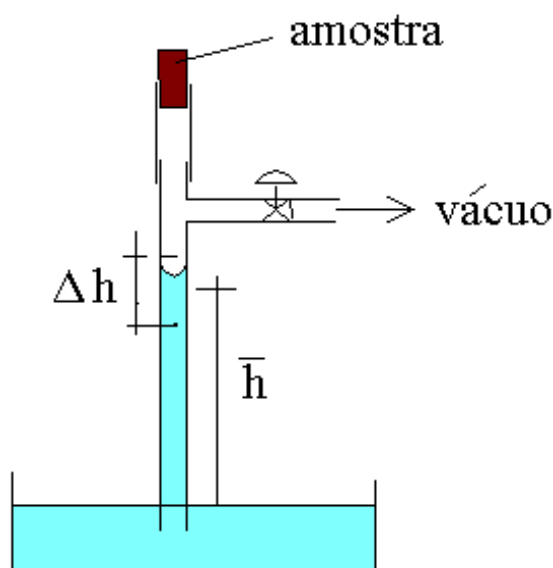


Figura 3 - Desenho esquemático do aparato para medir a permeabilidade ao ar em madeira.

Para a determinação da permeabilidade usa-se a equação de Darcy (SIAU (1971)) com as devidas correções para a variação de volume do ar devido à sua perda de carga ao atravessar a amostra de madeira. Seguem-se as equações utilizadas:

$$k_g = \frac{152 \times C \times V \times L \times (P_a - \bar{h}/13,6)}{t \times A \times (\bar{h}/13,6) \times (2P_a - \bar{h}/13,6)} \quad (1)$$

$$C = 1 + \frac{V_r \times (\Delta h/13,6)}{V \times (P_a - \bar{h}/13,6)} \quad (2)$$

onde:

$k_g$  - permeabilidade superficial em  $\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s})$

$C$  - fator de correção para a expansão do ar devido à mudança da pressão estática

$V$  - volume de ar deslocado na coluna d'água em  $\text{cm}^3$

$L$  - comprimento do cilindro de madeira em  $\text{cm}$

$A$  - área em  $\text{cm}^2$  da seção reta do cilindro de madeira perpendicular ao fluxo de ar

$P_a$  - pressão atmosférica em cmHg

$\bar{h}$  - altura média da coluna d'água medida a partir da superfície do reservatório em cm; 13,6 é o fator para converter cm de coluna d'água em cmHg

152: fator para converter a pressão média de cmHg para atm

$t$  - tempo em s em que o nível de água se desloca na coluna com a entrada do volume  $V$  de ar através da amostra

$\Delta h$  - mudança de altura do nível de água na coluna em cm durante a medida do tempo  $t$

$V_r$  - volume de ar em  $\text{cm}^3$  que permanece no aparato enquanto ocorre deslocamento de ar na coluna d'água.

A altura da coluna d'água corresponde à diferença de pressão entre as extremidades do cilindro de madeira. A vazão volumétrica de ar é obtida medindo-se o tempo em que o nível de água percorre um volume conhecido na coluna.

O volume percorrido pelo menisco da coluna d'água,  $V$ , foi de 32,0, 1,0 e 3,0 ml para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. O volume  $V_r$  foi medido para o caso do aparato construído e determinado como sendo igual a 38,0, 30,0 e 30,0 ml para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. A diferença de altura  $\Delta h$  entre os níveis mais alto e mais baixo da coluna d'água foi de 15,0, 0,5 e 4,0 cm, o nível mais alto foi medido como sendo igual a 80,3, 48,9 e 48,9 cm para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente.  $P_a$  é a pressão atmosférica e igual a 69cmHg.

Para cada cilindro de madeira mediu-se primeiramente a permeabilidade ao ar e depois fez-se nas mesmas amostras a impregnação com solução de Polietileno Glicol 4000 (Vetec Química Fina Ltda) (PEG) para a caracterização da permeabilidade a líquidos.

As amostras de madeira foram colocadas no interior de um dessecador de vidro e fez-se inicialmente o vácuo de 10 mmHg durante 1 hora. A seguir as amostras foram totalmente submersas com a solução aquosa de PEG a 10% em peso. Manteve-se o vácuo até a saída de toda bolha de ar dos cilindros de madeira. Após a impregnação com a solução de PEG as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 50°C até peso constante.

O ganho percentual de massa (GPM) para cada amostra foi calculado usando-se a equação abaixo:

$$GPM = 100 \times \frac{M_{PEG} - M}{M} \quad (3)$$

onde:

$M_{PEG}$ - massa da amostra de madeira impregnada com PEG seca em estufa

$M$ - massa da amostra de madeira seca em estufa anterior à impregnação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

A tabela 1 mostra as médias dos valores das permeabilidades ao ar medidas e os desvios padrão nas direções tangencial, longitudinal e radial para as amostras tratadas e não tratadas.

Tabela 1 – Médias e teste F para os contrastes entre os valores médios da permeabilidade ao ar,  $k_g$ , em  $\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s})$  para as amostras não prensadas e prensadas com dois níveis de deformações da dimensão radial.

	Direção		
	longitudinal	tangencial	radial
Madeira sem tratamento (T1)	23,90 ± 7,8	0,21 ± 0,092	0,97 ± 0,41
Madeira com nível 3 de deformação (T2)	52,35 ± 32,4	0,33 ± 0,24	0,77 ± 0,45
Madeira com nível 5 de deformação (T3)	72,42 ± 36,9	0,33 ± 0,15	0,58 ± 0,37
Contrastes: T1 vs. T2 T3	40,86**	10,15**	9,30**
T2 vs. T3	7,42**	<1 ns	2,87*

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

ns não significativo

O tratamento testado foi mais eficiente em aumentar a permeabilidade longitudinal do que a tangencial. Ainda assim, propiciou um aumento em mais de 50% na permeabilidade tangencial. Em contrapartida, na direção radial, quanto maior a severidade da deformação menor foi a permeabilidade ao ar da madeira tratada.

Os valores dos desvios padrão foram elevados principalmente para as amostras que sofreram o tratamento. Isso se deve a dois motivos principais, o primeiro refere-se à não homogeneidade natural da madeira. As amostras foram coletadas indistintamente se próximas à casca ou à medula e provenientes de madeira juvenil, que apresenta um gradiente acentuado de propriedades físicas e anatômicas ao longo dos anéis de crescimento. O segundo fator refere-se ao tratamento em si. Não foi usado um aparato que permitisse controle rigoroso da pressão aplicada ou sua uniformidade ao longo da amostra. Dessa forma, amostras com níveis diferentes de deformação podem ter sofrido níveis semelhantes de pressão. Todavia, a compressão uniaxial mostrou-se eficiente em aumentar a permeabilidade ao ar. Assim, o teste estatístico F revelou haver diferença significativa de permeabilidade entre as amostras tratadas e não tratadas.

Para a permeabilidade na direção longitudinal também houve diferença entre os dois níveis de deformação aplicados às amostras de madeira. A permeabilidade na direção longitudinal cresce com a deformação aplicada durante o tratamento.

Em contrapartida, não houve diferença entre os dois níveis de deformação para a permeabilidade na direção tangencial.

A diminuição da permeabilidade na direção radial é devida à coincidência dessa direção com o da aplicação da carga para a deformação da madeira. Nesta direção ocorre uma deformação permanente da amostra que causa uma diminuição da área disponível para a passagem do ar diminuindo a vazão e conseqüentemente a permeabilidade.

A Tabela 2 mostra o contraste pelo teste F entre os valores médios dos ganhos percentuais em massa (GPM) para as amostras impregnadas com PEG nas direções longitudinal, tangencial e radial.

Tabela 2 – Médias e teste F para os contrastes entre os valores médios do ganho percentual de massa para as amostras não prensadas e prensadas com dois níveis de deformações da dimensão radial.

	Direção		
	longitudinal	tangencial	radial
Madeira sem tratamento (T1)	8,32 ± 1,12	5,17 ± 2,81	8,39 ± 2,08
Madeira com nível 3 de deformação (T2)	9,52 ± 1,23	7,04 ± 1,98	10,60 ± 2,24
Madeira com nível 5 de deformação (T3)	9,52 ± 1,25	6,60 ± 1,85	9,54 ± 2,48
Contrastes: T1 vs. T2 T3	21,82**	12,02**	17,07**
T2 vs. T3	<1 ns	<1 ns	5,27*

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

ns não significativo.

O tratamento da madeira por compressão no sentido radial foi eficiente em aumentar o ganho percentual em massa de PEG. Não se pode fazer uma comparação direta entre os valores de uma mesma linha da Tabela 2 em virtude do comprimento das amostras serem diferentes. Todavia, levando-se em conta que as amostras longitudinais e tangenciais são três e duas vezes mais longas que as radiais, respectivamente, pode-se concluir que a impregnação na direção longitudinal permite um maior ganho absoluto em massa que nas direções transversais.

O tratamento causou um maior incremento no GPM nas impregnações nas direções transversais às fibras do que na direção longitudinal. Esses incrementos foram da ordem de 36,2, 26,4 e 14,4 %, para as direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

É interessante ressaltar que a penetração de líquidos na direção radial tenha aumentado com o tratamento apesar da permeabilidade ao ar ter diminuído. Esse fato pode ser explicado pela recuperação das camadas externas de madeira das amostras durante a impregnação com a solução aquosa. No caso do tratamento mais severo, com maior deformação da madeira, a recuperação com o encharcamento com água é mais lenta. Assim, após o mesmo, a absorção de polímero de PEG é maior que na madeira não tratada; entretanto ainda é menor que no tratamento mais moderado.

#### 4. CONCLUSÕES

A compressão axial foi eficiente em aumentar em até três vezes a permeabilidade ao ar de peças de madeira de pinus.



Na direção radial, em que a madeira sofreu compressão, a permeabilidade ao ar diminuiu com a severidade do tratamento.

A permeabilidade da madeira sem tratamento na direção longitudinal é mais que 100 vezes maior que na direção tangencial. Após a compressão uniaxial na direção radial essa diferença aumentou.

O ganho percentual em massa de PEG aumentou com o tratamento, sendo mais eficaz na direção transversal do que na direção longitudinal. O tratamento por compressão axial na direção radial das amostras de madeira causou um incremento maior que 36 % na permeabilidade a líquidos, medida pelo ganho percentual em massa.

O processo de impregnação com solução aquosa de PEG mostrou que o tratamento aumenta o ganho percentual de massa na direção radial apesar da diminuição da permeabilidade ao ar.

Um outro dispositivo para aplicação das deformações deverá ser desenvolvido a fim de melhor controlar as condições do experimento.

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

BOOKER, R. E.; EVANS, J. M. (1994). The effect of drying schedule on the radial permeability of *Pinus radiata* D. Don. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 52, p. 150-156.

NIJDAM, J. J.; LANGRISH, T. A. G.; KEEY, R. B. (2000). A high temperature drying model for softwood timber. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p.3585-3598.

MILOTA, M. R.; TSCHERNITZ, J. L.; VERRILL, S. P.; MIANOWSKI, T. (1995). Gas permeability of plantation loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, v. 27, n. 1, p. 34-40.

SIAU, J. F. (1971). **Flow in Wood**. Syracuse, NY, Syracuse University Press. 131 p.