

# DEFORMAÇÕES RESIDUAIS LONGITUDINAIS DECORRENTES DE TENSÕES DE CRESCIMENTO EM EUCALIPTOS E SUAS ASSOCIAÇÕES COM OUTRAS PROPRIEDADES<sup>1</sup>

José Tarcísio Lima<sup>2</sup>, Paulo Fernando Trugilho<sup>2</sup>, Sebastião Carlos da Silva Rosado<sup>2</sup> e Clair Rogério da Cruz<sup>2</sup>

**RESUMO** - Tensões de crescimento representam um fator limitante para o uso do eucalipto de rápido crescimento como produtor de toras para serrar. A quantificação e qualificação dessas tensões em árvores de *Eucalyptos* ainda carecem de muitas informações no Brasil. Assim, objetivou-se avaliar a aplicação de um novo instrumento, o extensômetro *CIRAD-Forêt*, na medição das deformações residuais longitudinais (DRL) em árvores de cinco materiais genéticos de *Eucalyptos* e correlacioná-las com outras características da madeira e dimensões das árvores. Dos resultados pôde-se concluir que: *i*) o extensômetro é simples de ser usado, rápido e confiável para medir e identificar árvores com diferentes níveis de tensões de crescimento; *ii*) a deformação residual longitudinal (DRL), associada às tensões de crescimento, medida com o extensômetro foi em média igual a 71  $\mu\text{m}$ ; *iii*) não foi encontrada diferença estatística nas DRLs medidas nas diferentes orientações cardiais em volta do tronco; *iv*) as DRLs variaram em função dos materiais genéticos de acordo com a análise de variância; *v*) em um dos materiais genéticos, no qual a DRL foi medida em duas posições ao longo do tronco (1,3 e 2,5 m), os valores foram semelhantes; *vi*) entre as várias propriedades da madeira, apenas a densidade básica foi correlacionada significativa e positivamente com a DRL quando todos os materiais genéticos foram analisados conjuntamente; *vii*) exceto para o fator de estabilidade (DAP/altura total) da progênie 5, as correlações entre as DRLs e as características de crescimento das árvores não foram significativas quando os materiais genéticos foram analisados isoladamente. Entretanto, quando os cinco materiais genéticos foram reunidos, apenas a altura total da árvore não resultou em correlação significativa com DRL; *viii*) a adição de DRL às características de crescimento das árvores permitiu que a densidade e as várias propriedades mecânicas da madeira fossem significativamente estimadas por modelos múltiplos.

Palavras-chave: Madeira, eucalipto e tensão de crescimento.

## LONGITUDINAL RESIDUAL STRAINS RESULTED FROM GROWTH STRESSES IN EUCALYPTS AND THEIR ASSOCIATION WITH OTHER PROPERTIES

**ABSTRACT** - Growth stresses are a limiting factor in the use of fast growing eucalypts for the production of sawing logs. Further studies are needed for the qualification and mensuration of these stresses in eucalypts trees in Brazil. Thus, the main objective of this work was to evaluate the application of a new instrument, *CIRAD-Forêt* extensometer, in the measurement of the longitudinal residual strain (DRL) in standing trees of five genetic materials of eucalypts, experimentally cultivated in Aracruz-Espirito Santo, and to correlate the magnitude of such strain with other wood properties and tree dimensions. The results obtained showed that: *i*) the extensometer is a simple, rapid and reliable instrument to measure and identify trees with different levels of growth stresses; *ii*) the DRL associated to the growth stresses measured with the extensometer were in average equal to 71  $\mu\text{m}$ ; *iii*) no statistical differences were found in the DRLs measured in different cardinal orientations; *iv*) the DRLs varied significantly with the genetic material according to the analyses of variance; *v*) for clone 1, in which the DRLs were measured in two positions along the stem (1.3 m and 2.5 m), the values were similar; *vi*) among various wood properties, only basic density was positive and significantly correlated with the DRLs when the five genetic materials were analysed together; *vii*) except for the stability factor (DBH/total height) of variety 5, the correlation between DRL and the tree growth dimensions were not significant when the genetic materials were analyzed separately, however, when the five genetic materials were analyzed together, only total height of the tree did not result in significant correlation with the DRLs; *viii*) DRL addition to the tree growth dimensions allowed density and several wood mechanical properties to be significantly estimated by multiple models.

Key words: Wood, eucalypts, growth stresses.

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 29.1.2002 e aceito para publicação em 17.2.2004.

<sup>2</sup> Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras – UFLA, 37200-000 Lavras-MG, <jtlima@ufla.br>.

## 1. INTRODUÇÃO

Tensões de crescimento são o resultado da ação de forças internas que atuam sobre os tecidos das árvores, de forma a mantê-las íntegras e eretas. Mattheck & Kubler (1995) ressaltaram a importância dessas tensões para a sobrevivência das árvores, ao afirmarem que inevitáveis pontos de fraqueza em sua estrutura são contrabalançados pelo desenvolvimento das tensões de crescimento. Estas tensões reagem às cargas críticas que podem causar ruptura. Elas são originadas em fibras recém-diferenciadas, originando uma tensão de tração longitudinal no câmbio, o que induz a uma tensão compressiva na seção transversal do caule (Jacobs, 1965). Sucessivas camadas de novos tecidos geram altas tensões compressivas longitudinais no cerne das árvores. A elevada deformação diferencial formada é o fator responsável por rachaduras de topo das toras durante a colheita e por distorções das peças produzidas durante o desdobro. Outras forças, como as forças gravitacionais, devido à ação do próprio peso da árvore; as forças de tensões de seiva, decorrentes de variações diárias ou sazonais; as tensões de secagem, que se desenvolvem na madeira em função da contração irregular de suas partes; e as forças criadas pelo efeito de derrubada da árvore, não devem ser confundidas com as tensões de crescimento (Lisboa, 1993).

As tensões de crescimento podem ser particularmente importantes em eucaliptos de rápido crescimento durante seu processamento e utilização, o que evidencia a necessidade de bem avaliá-las. Muneri et al. (2000), citando resultados não-publicados obtidos na Austrália com *E. cloeziana* de 32 anos de idade, relataram que 25% de tábuas serradas foram desclassificadas devido a arqueamentos e torções. Como as rachaduras de topo e empenamentos requerem destopamento das tábuas, o rendimento em madeira serrada é reduzido, assim como as dimensões médias das peças. Formas adequadas de manuseio e estocagem, associadas com estratégias de desdobro, foram desenvolvidas por Waugh et al. (1997) e podem ser aplicadas para reduzir problemas causados pelas tensões de crescimento. Adicionalmente, o melhoramento florestal pode fornecer uma solução biológica para possibilitar a redução dos altos níveis de tensões, uma vez que esse fenômeno é geneticamente herdável (Malan, 1995; Schacht et al., 1998). Da mesma forma, tratamentos silviculturas como o desbaste, conforme relatado por Marsh & Burgers (1967) e por Kubler (1988), podem também minimizar tensões de crescimento ao

manter uma taxa de crescimento constante e as condições de crescimento estáveis.

Podem ocorrer grandes variações nas intensidades das tensões de crescimento em volta da circunferência do tronco, o que tem sido explicado pela sua inclinação (Nicholson, 1973), pela variação do ângulo da grã da madeira (Archer, 1986), pelos fatores relacionados à presença de madeira de reação (Walker, 1993 e Jourez, 1997) ou mesmo pela tortuosidade do fuste (Dinwoodie, 1966), especialmente quando a curvatura ocorre em dois planos perpendiculares.

As tensões de crescimento são determinadas a partir da medição da alteração nos comprimentos de peças de madeira, após a liberação de suas junções a outros elementos vizinhos, dentro de um tronco de uma árvore (Lisboa, 1993). Em consequência, os processos de medições utilizados determinam as deformações, e não as tensões. De acordo com a distribuição das tensões no interior do tronco, peças de madeira removidas da periferia do tronco tenderão a diminuir seu comprimento em resposta ao seu estado de tração, e, inversamente, peças removidas próximas à medula tenderão a alongar-se em resposta ao estado de compressão anterior.

Uma vez determinada a deformação de uma peça em relação ao seu comprimento (deformação residual longitudinal – DRL), quando ainda no interior da árvore, basta multiplicar este valor pelo correspondente módulo de elasticidade determinado na própria peça em que foi medida a alteração de comprimento, ou simplesmente pelo valor médio deste módulo, determinado em laboratório para a espécie em questão (Lisboa, 1993).

Deformações longitudinais periféricas podem ser determinadas através da liberação de tensões, proporcionada por dois orifícios feitos acima e abaixo de extensômetros de medição fixados no tronco de uma árvore (método de Nicholson). A medição das deformações periféricas no tronco engloba somente a madeira mais recentemente formada. De acordo com Archer (1986), esse método é relativamente simples, de execução rápida e somente destrutivo localmente, podendo ainda ser aplicado na própria árvore. De acordo com esse método é possível examinar detalhadamente as tensões circunferenciais ao longo do comprimento de toras e árvores, permitindo a comparação entre árvores e o acompanhamento de alterações que possam ocorrer em tratamentos para redução e para seleção daquelas com baixas tensões, visando estudos genéticos e de utilização em

experimentos de propagação vegetativa. A perfuração dos orifícios fornece uma estimativa da total liberação das deformações próximas a eles, sendo os valores das deformações 15% inferiores aos valores obtidos com a remoção completa da peça de madeira (Nicholson, 1971). Conseqüentemente, este método é apenas indicado para trabalhos de campo, onde se deseja obter a intensidade aproximada das deformações de crescimento, sua distribuição periférica e sua variação entre árvores e espécies.

O método de medição das deformações periféricas é de importância prática, embora não informe a magnitude e a distribuição radial das tensões longitudinais no interior do tronco. Para isto, pode-se empregar o método de Jacobs. Este método foi detalhadamente descrito por Archer (1986) e não será objeto de discussão neste trabalho.

Mesmo considerando a importância do conhecimento e dos efeitos das tensões de crescimento para a utilização da madeira, este tema tem sido pouco estudado no Brasil. Mais recentemente, entretanto, devido ao crescente emprego de madeira serrada de eucalipto, várias questões sobre os níveis, os efeitos, as variações e as possíveis formas de controle das tensões de crescimento têm surgido, o que pode ser confirmado nos trabalhos de Fernandes (1982), Aguiar (1986), Garcia (1992), Lisboa (1993), Schacht et al. (1998) e Crespo (2000).

Entre os métodos considerados não-destrutivos ou semidestrutivos para medição das deformações associadas às tensões de crescimento está o CIRAD-Forêt, que consiste em medir, com o auxílio de um relógio comparador, a movimentação sofrida por dois pinos fixados a 45 mm um do outro, ao longo da grã, na superfície do tronco sem casca. Para liberar as tensões e promover a movimentação dos pinos, entre os dois é feito um furo com uma broca de 20 mm de diâmetro.

Assim, objetivou-se avaliar a funcionalidade do método CIRAD-Forêt para determinação das deformações residuais longitudinais (DRLs); avaliar a existência de variação ao longo da circunferência do tronco em função das posições cardeais de orientação; dimensionar as deformações residuais longitudinais médias em cada material genético; verificar a ocorrência de variações nas deformações residuais longitudinais inter e intragenotípicas; verificar a existência de diferenças nas deformações residuais longitudinais medidas a 1,30 e a 2,5 m de altura no tronco das árvores de um clone; correlacionar deformações residuais longitudinais com diâmetro, altura, volume, fator de estabilidade, densidade e propriedades mecânicas da madeira; e investigar modelos para estimativa das DRLs e de outras propriedades da madeira em função dessas deformações.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho empregou-se madeira de eucalipto plantada experimentalmente pela Aracruz Celulose S.A., na região de Aracruz-ES. Algumas características do material genético utilizado estão no Quadro 1.

Quatro árvores de cinco materiais genéticos foram avaliadas, totalizando 20 árvores. As árvores foram selecionadas entre as dominantes e co-dominantes, representadas por indivíduos retos, eretos e sem bifurcação.

Em cada árvore foram efetuadas cronologicamente as seguintes medições e operações:

1. Medição da deformação residual longitudinal (DRL), conforme método do furo único preconizado por Baillères et al. (1995). Essa medição foi efetuada em quatro pontos em volta do tronco, a 1,30 m de altura, tendo cada ponto seguido a orientação cardeal N, S, L e O. No clone 1, a medição foi repetida a 2,50 m de

**Quadro 1** – Características do material genético

**Table 1** – Characteristics of the genetic material

Material Genético	Espécie	Idade (anos)	Espaçamento (m)	Local
Clone 1	Híbrido natural de <i>E. grandis</i> W. Hill. ex Maiden	15	3 x 3	Aracruz
Clone 2	Híbrido natural de <i>E. grandis</i> W. Hill. ex Maiden	15	3 x 3	Aracruz
Clone 3	Híbrido natural de <i>E. grandis</i> W. Hill. ex Maiden	15	3 x 3	Aracruz
Clone 4	Híbrido natural de <i>E. grandis</i> W. Hill. ex Maiden	11	3 x 3	Aracruz
Variedade 5	Híbrido de <i>E. grandis</i> W. Hill. ex Maiden x <i>E. urophylla</i> S.T. Blake	8,5	3 x 3	Aracruz

altura. As medições foram precedidas da remoção de uma faixa de casca em volta do tronco, em uma extensão igual a 20 cm (caso fosse necessário preservar as árvores, a remoção da faixa de casca poderia ser substituída pela remoção de pequenos painéis ou janelas). As tensões de crescimento foram avaliadas por meio da medição das deformações residuais longitudinais. De acordo com essa metodologia, dois pinos são inseridos na faixa sem casca. Tais pinos são então conectados a um medidor de deformações, cuja função é indicar a intensidade da deformação residual longitudinal. Após o ajuste desse aparelho, um orifício de 2 cm de diâmetro é feito com furadeira entre os dois pinos, com o objetivo de liberar as tensões. As deformações são então indicadas em um relógio comparador digital.

2. Derrubada da árvore e subseqüentes medições para cubagem rigorosa. Neste caso foram medidos a altura total e os diâmetros sem casca às alturas 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total da árvore.
3. Remoção da prancha central da tora com o auxílio de serra de fita, mediante o corte de duas costaneiras opostas.
4. Transporte da prancha central (cerca de 8 cm de espessura e 5 m de comprimento) da tora basal de cada árvore para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFLA, visando, principalmente, estudos de propriedades físicas e mecânicas da madeira, cujos resultados serão publicados em outro trabalho. A prancha foi então cortada em cinco pranchas mais curtas, de 1 m de comprimento, mantendo-se a ordem de altura no tronco para se proceder ao estudo das variações longitudinais das propriedades da madeira. Os corpos-de-prova foram também marcados segundo a posição de origem radial da madeira, sendo: posição central (cerne interno), posição intermediária (cerne externo) e posição externa (região limítrofe entre o cerne externo e o alburno). A prancha foi trabalhada para produzir sarrafos de 2,5 x 2,5 cm de seção, que depois de acondicionados em ambiente climatizado foram usados para confeccionar corpos-de-prova de flexão estática (2,5 x 2,5 x 41 cm), compressão paralela às fibras (2,5 x 2,5 x 10 cm), dureza Janka (2,5 x 2,5 x 10 cm) e retratibilidade (2,5 x 2,5 x 10 cm). Neste caso foram determinadas a contração tangencial total, a contração radial total e a contração volumétrica total. Os ensaios físicos e mecânicos foram executados

apenas com madeira seca ao ar, tendo como orientação básica as normas ASTM-D143 [Parte II – métodos secundários] (1997). O ensaio de dureza Janka obedeceu às orientações da norma BS 373 (1957). Os valores de propriedades físicas e mecânicas da madeira empregados nas análises foram os mesmos usados em outro trabalho, com o mesmo material, por Lima et al. (2004).

Após a reunião de todos os dados, procedeu-se à análise estatística com o auxílio do *software* Minitab, para conhecer as possíveis variações das deformações residuais longitudinais existentes entre materiais genéticos, entre árvores do mesmo material genético e entre posições longitudinais de amostragem no tronco. Posteriormente, foi conduzido um estudo das associações entre propriedades, usando a análise de correlação de Pearson e as análises de regressão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Deformação Residual Longitudinal Média

A deformação residual longitudinal (DRL), também chamada de deformação residual longitudinal de maturação (Baillères et al., 1995), decorrente das tensões de crescimento, medida com o extensômetro modelo *CIRAD-Forêt* foi em média 71  $\mu\text{m}$ , com o clone 3 apresentando o maior valor e o clone 2 o menor (Quadro 2). A dispersão dos valores observados nas árvores vivas variou de 11 (clone 2) a 19% (clone 3). Os valores de DRL estão compatíveis com aqueles encontrados para clones de eucalipto por Baillères et al. (1995) [71  $\mu\text{m}$ ], para *E. cloeziana* com 10 anos de idade, por Muneri et al. (1999) [71  $\mu\text{m}$ ] e por Muneri et al. (2000) para a mesma

**Quadro 2** – Deformação residual longitudinal (DRL,  $\mu\text{m}$ ) em cinco materiais genéticos de *eucalipto*, em função das posições cardeais

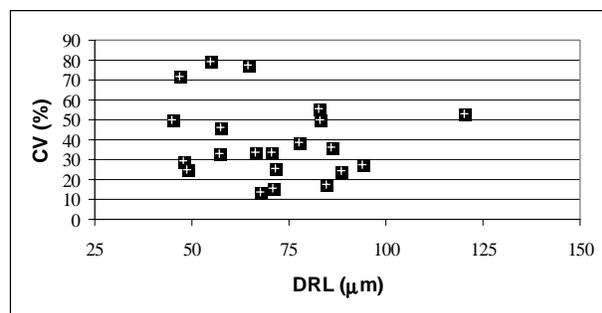
**Table 2** – Longitudinal residual strain (DRL,  $\mu\text{m}$ ) in five *Eucalyptus* genetic material, related to the cardinal positions

Material Genético	Orientação Cardeal				Média	CV%
	Norte	Sul	Leste	Oeste		
1	91	51	57	116	79	12
2	50	40	51	56	49	11
3	125	76	93	86	95	19
4	74	38	77	43	58	17
5	82	80	71	58	73	12

espécie, porém com 4 anos de idade [77  $\mu\text{m}$ ]. Neste último caso os autores encontraram DRL variando de 38,8 a 132,5  $\mu\text{m}$ .

Pela análise de variância não foi identificada diferença estatística na DRL entre os diferentes pontos cardeais de orientação, em nível  $\alpha$  de 1% de significância (Quadro 3). Esse resultado poderia ser diferente, caso os troncos fossem deformados por algum fator ambiental predominante, como a competição por luz ou pelo efeito de ventos, por exemplo. Aparentemente, esse não foi o caso dos clones aqui estudados. Árvores individuais exibiram uma considerável variação ao redor do caule, com o CV variando de 13 a 80%. Entretanto, apenas cinco árvores apresentaram CV maior que 50%. Esta variação é menor que aquela encontrada por Muneri et al. (2000) para *E. cloeziana* com 4 anos de idade, em que a variação do DRL em volta da árvore oscilou de 10 a 91%. Os autores constataram que a orientação das faces da árvore de *E. cloeziana* com 4 anos também não exerceu efeito estatístico significativo na DRL, mas as orientações norte e sul apresentaram, respectivamente, o valor mais baixo [71,1  $\mu\text{m}$ ] e o mais alto [81,3  $\mu\text{m}$ ]. Já em *E. cloeziana* com 10 anos de idade, a face oeste apresentou DRL mais elevada e a face sul, a mais baixa (Muneri et al., 1999). Esse comportamento variável indica que a medição da DRL deve ser efetuada em pelo menos quatro posições ao redor do tronco. A Figura 1 mostra que o CV não é diretamente associado à magnitude da DRL, ou seja, não aumenta ou diminui em função da variação da DRL.

De acordo com a análise de variância da deformação residual longitudinal (Quadro 3), os materiais genéticos avaliados apresentaram diferenças significativas em nível  $\alpha$  de 1% de significância, evidenciando suas



**Figura 1** – Coeficiente de variação de DRL para cada árvore-amostra, plotado em função de DRL médio da árvore.  
**Figure 1** – Coefficient of variation of DRL for each sample-tree, plotted against average DRL of the tree.

potencialidades em programas de melhoramento da qualidade da madeira. Por causa do menor valor de DRL apresentado, possivelmente o clone 2 produzirá menor índice de rachaduras e empenamentos devidos às tensões de crescimento. Em *E. cloeziana* com 4 anos de idade, Muneri et al. (2000) não encontraram diferença significativa nas DRLs entre quatro procedências, mas considerável variação nas árvores dentro da procedência.

**Quadro 3** – Análise de variância da deformação residual longitudinal (DRL) em função dos materiais genéticos, da árvore e da posição cardinal de amostragem

**Table 3** – Analysis of variance of longitudinal residual strain (DRL), related to the genetic material, tree and cardinal position of sampling

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Material genético	4	20.575,8	5.144,0	5,91**
Árvore	3	211,3	70,4	0,08 <sup>ns</sup>
Posição cardinal	3	7.497,0	2.499,0	2,87 <sup>ns</sup>
Erro	69	60.088,7	870,9	
Total	79	88.372,8		

\*\* P 0,01 e <sup>ns</sup> = não-significativo em nível de 1%.

### 3.2. Variação nas Deformações Residuais Longitudinais entre 1,3 e 2,5 m de Altura no Tronco das Árvores do Clone 1

O Quadro 4 mostra DRLs médias semelhantes entre duas posições ao longo do tronco (1,3 e 2,5 m) para o clone 1. Deve-se considerar aqui que a medição a 2,5 m de altura na árvore foi uma operação muito trabalhosa. Por esta razão, apenas o clone 1 foi empregado na avaliação longitudinal de DRL. A análise de variância mostrada no Quadro 5 confirma essa tendência, não revelando diferença estatística em nível  $\alpha$  de 5% de significância, o que evidencia que a medição de DRL pode ser feita ao nível do DAP quando forem consideradas apenas as duas posições de amostragem para esse clone em particular.

### 3.3. Correlações entre as DRLs e Outras Propriedades da Madeira

As dimensões médias das árvores e as características físicas e mecânicas médias das madeiras de cada material genético estão apresentadas no Quadro 6. As dimensões das árvores foram obtidas da medição rigorosa no campo, enquanto as características físicas e mecânicas da madeira foram determinadas da média de cinco posições longitudinais ao longo da tora basal de 5 m e de três posições da

**Quadro 4** – Variação nas DRLs medidas a 1,30 e a 2,5 m de altura do tronco das árvores do clone 1

**Table 4** – Variation in the DRLs measured at 1.3 m and 2.5 m height in the stem of clone 1 trees

Árvore	DRL ( $\mu\text{m}$ )	
	1,3 m	2,5 m
1	85	77
2	83	78
3	65	59
4	83	88
Média	79	76

**Quadro 5** – Análise de variância da DRL do clone 1 em função da posição de amostragem (1,3 e 2,50 m) ao longo do tronco

**Table 5** – Analyses of variance of DRL of clone 1 related to the longitudinal position of sampling (1.3 m and 2.5 m) along the stem

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Posição de amostragem longitudinal	1	72	72	0,06 <sup>ns</sup>
Erro	30	34835	1161	
Total	31	34907		

<sup>ns</sup> = não-significativo em nível de 1%.

medula para a casca em cada uma dessas posições longitudinais. Todos os valores apresentados são compatíveis com os da literatura e foram detalhadamente discutidos no relato de Lima (1999).

O Quadro 7 mostra que, de modo geral, as deformações residuais longitudinais (DRLs) não apresentaram coeficientes de correlação de *Pearson* significativos com as propriedades da madeira quando as análises foram

efetuadas para cada material genético isoladamente. Esses resultados referem-se às médias entre as posições de amostragem central, intermediária e externa do tronco. O mesmo foi constatado para as correlações de DRL com os valores encontrados para cada posição ao longo do raio (esses valores não estão apresentados). Apenas algumas propriedades de alguns materiais genéticos apresentaram correlações significativas, sem, contudo, evidenciar qualquer tendência. Tanto a região mais externa do tronco, supostamente representante da região de tração, como a região mais central, que supostamente representa a região de compressão no tronco, ou mesmo a intermediária, não produziram correlações significativas.

**Quadro 6** – Características médias das árvores e da madeira dos cinco materiais genéticos de eucalipto

**Table 6** – Average characteristics of the trees and wood of five genetic materials of eucalypt

Característica	Material Genético				
	Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4	Var. 5
DAP (cm)	27,85	24,70	35,18	20,93	23,20
Altura (m)	36,62	39,42	38,49	24,33	27,44
Volume (m <sup>3</sup> )	1,0285	0,9017	1,6676	0,5527	0,5699
DB (g/cm <sup>3</sup> )	0,63	0,61	0,67	0,60	0,57
CV (%)	18,06	17,31	17,84	16,92	17,19
DJ (N)	6.422	6.322	7.267	5.420	5.540
C (MPa)	58	59	62	54	52
MOR (MPa)	114	105	115	108	98
MOE <sub>f</sub> (MPa)	7.933	7.288	8.129	7.318	6.392

DAP = diâmetro a 1,30 m de altura; DB = densidade básica; CV = contração volumétrica; DJ = dureza Janka; C = compressão paralela às fibras; MOR = módulo de ruptura; e MOE<sub>f</sub> = módulo de elasticidade à flexão estática.

Fonte (Source): Lima et al. (2004).

**Quadro 7** – Correlações entre as DRLs e outras propriedades da madeira determinadas da média entre três posições ao longo do raio para cada material genético

**Table 7** – Correlation between DRLs and other wood properties determined from the average between three positions from pith to bark for each genetic material

Propriedade	Média entre as Três Posições Radiais				
	Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4	Variedade 5
Densidade básica	0,266	0,185	0,065	-0,082	-0,362
Contração volumétrica	0,474	0,787	-0,598	-0,324	-0,729
Dureza Janka	-0,632	0,692	-0,152	-0,162	-0,619
Compressão paralela às fibras	0,792	-0,539	-0,308	0,826	-0,542
Módulo de ruptura	0,291	0,820	-0,312	-0,185	-0,771
Módulo de elasticidade em flexão	0,026	0,894*	-0,006	-0,304	0,240

\* Significativo em nível  $\alpha$  de 5%.

A falta destas correlações significativas foi observada para a média entre essas posições. Somente a variedade 5 apresentou correlações significativas de DRL com as propriedades de contração volumétrica, dureza Janka, módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão estática para a madeira da posição central (valores não apresentados). Muneri et al. (2000), estudando *E. cloeziana*, encontraram correlação significativa de DRL com a densidade do alburno (0,40), o DAP (0,51), a altura da árvore (0,44) e o encurvamento da madeira serrada (0,67). As análises de regressão indicaram que DRL foi um bom estimador de encurvamento da peça serrada, respondendo por 45% da variação total (Muneri et al., 2000). A adição do diâmetro e da densidade do alburno ao modelo linear aumentou a acurácia na predição, explicando 59 e 63% do encurvamento, respectivamente.

O Quadro 8 mostra que, entre várias propriedades da madeira, apenas a densidade básica foi correlacionada significativamente e positivamente, em nível  $\alpha$  de 5% de significância, com a DRL quando todos os materiais genéticos foram analisados conjuntamente. A regressão linear (Figura 2) mostra que 28,6% da variação da densidade básica é explicada pela variação da DRL.

### 3.4. Correlações entre as Deformações Residuais Longitudinais e Características de Crescimento das Árvores

Os Quadros 9 e 10 apresentam os coeficientes de correlação encontrados entre as deformações residuais longitudinais, enquanto o Quadro 11 apresenta os resultados da estimativa de DRL em função das dimensões das árvores, mediante análise de regressão linear simples.

Exceto para o fator de estabilidade da variedade 5, as correlações entre as deformações residuais longitudinais e as características de crescimento das árvores,

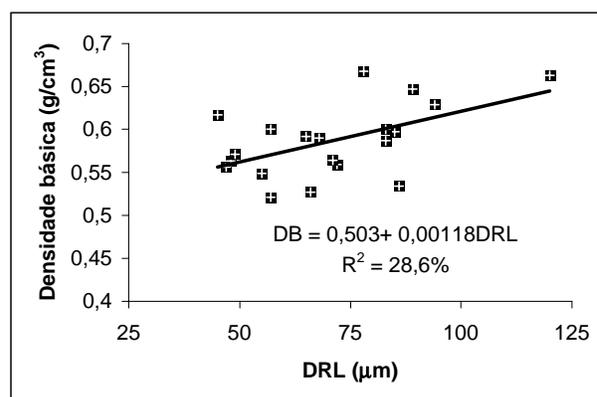
mostradas no Quadro 9, não foram significativas quando os materiais genéticos foram analisados isoladamente. Entretanto, quando os cinco materiais genéticos foram

**Quadro 8** – Correlações entre DRL e outras propriedades da madeira determinadas para os cinco materiais genéticos juntos

**Table 8** – Correlation between DRL and other wood properties determined for the five genetic materials together

Propriedade	r
Densidade básica	0,534*
Contração volumétrica	-0,305
Dureza Janka	0,181
Resistência à compressão paralela	0,299
Módulo de ruptura	0,128
Módulo de elasticidade à flexão	0,166

\* Significativo em nível  $\alpha$  de 5%.



**Figura 2** – Estimativa da densidade básica em função da DRL para os cinco materiais genéticos juntos.

**Figure 2** – Estimation of the basic density from DRL for the five genetic material together.

**Quadro 9** – Correlações entre DRL e as dimensões das árvores dos cinco materiais genéticos

**Table 9** – Correlation between DRL and tree dimensions of the five genetic material

Característica	Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4	Var. 5
DAP	0,144	-0,074	0,422	0,605	0,696
Altura total	-0,234	-0,545	0,383	0,557	0,257
Volume	-0,121	-0,120	0,531	0,389	0,546
Fator de estabilidade	0,320	0,352	0,277	0,484	0,922*

\* Significativo em nível  $\alpha$  de 5%.

reunidos, apenas a altura total da árvore não resultou em correlação significativa (Quadro 10) com DRL. Portanto, pode-se deduzir que as DRLs são mais fortemente correlacionadas com as características de crescimento, de fácil medição, do que com as propriedades da madeira, que são mais difíceis de ser dimensionadas. Também em trabalho de Muneri et al. (2000), a DRL teve uma correlação positiva e significativa com a altura e o diâmetro das árvores de *E. cloeziana*, com coeficientes de 0,44 e 0,51, respectivamente.

As equações relacionadas estão apresentadas no Quadro 11. Observando essas equações, constata-se que a DRL pode ser estimada de forma mais eficiente pelo fator de estabilidade (FE). Essa variável explica a deformação residual longitudinal em 68,7%. A dependência de DRL do fator de estabilidade é maior do que as proporcionadas pela altura (47%), pelo DAP ou pela densidade do alburno, juntos, para *E. cloeziana* (Muneri et al., 2000). A Figura 3 mostra que a DRL será tanto maior quanto maior for o fator de estabilidade (árvores baixas e de grandes diâmetros), o que evidencia que árvores maiores têm níveis de tensão mais baixos; estes resultados diferem daqueles obtidos por Chafe (1995) para *E. nitens* e *E. regnans*. Os mesmos resultados aqui apresentados contrastam com a correlação fraca e negativa ( $r = -0,39$ ) obtida de DRL com o diâmetro em *E. cloeziana* com 10 anos de idade (Muneri et al., 1999). Contrastam também com uma forte correlação negativa com a mesma característica em *E. grandis* com 12,5 e 22 anos ( $r = -0,70$ ) (Wilkins & Kitahara, 1991).

No Quadro 12 estão os resultados significativos obtidos para a estimativa da densidade básica e das propriedades de compressão paralela às fibras e dureza Janka a partir de DRL e outras características de crescimento da árvore. Foram testados, como variáveis independentes, a altura, o diâmetro a 1,30 m, o volume e o fator de estabilidade das árvores, cada um desses associados à DRL. Como variáveis dependentes, foram testadas todas as propriedades físicas e mecânicas estudadas. Como pode ser constatado no Quadro 12, a adição da altura total da árvore à DRL passou a estimar significativamente a densidade básica em 67,6%. A adição do DAP à DRL passou a prever significativamente a resistência à compressão paralela às fibras em 60,8% e a dureza Janka em 53,6%. Por sua vez, a associação do volume à DRL também possibilitou a estimativa da dureza Janka em 57,4%. Individualmente, a DRL conseguiu estimar significativamente apenas a densidade básica (Figura 2).

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que as tensões de crescimento são mais fortemente correlacionadas com as características de crescimento das árvores do que com as propriedades mecânicas. Quando as características de crescimento são associadas com a DRL, consegue-se estimar significativamente a densidade e as propriedades mecânicas da madeira.

**Quadro 10** – Correlações entre as DRL e as dimensões das árvores determinadas para os cinco materiais genéticos juntos

**Table 10** – Correlation between DRL and trees dimensions determined for five genetic material together

Propriedade	r
Diâmetro a 1,3 m de altura	0,728**
Altura total da árvore	0,093
Volume do tronco	0,636**
Fator de estabilidade	0,829**

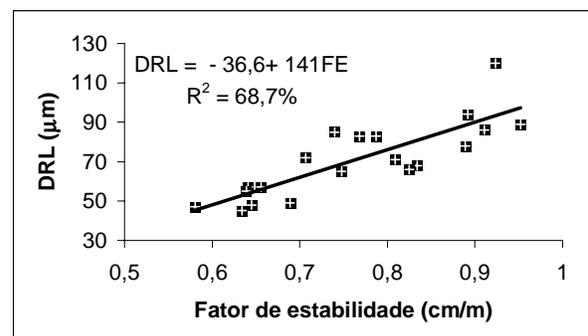
\*\* Significativo em nível  $\alpha$  de 1%.

**Quadro 11** – Estimativa de DRL em função das dimensões das árvores determinadas para os cinco materiais genéticos juntos

**Table 11** – Estimation of DRL from trees dimensions of the five genetic material together

Equação	R <sup>2</sup> (%)	F	QM erro
DRL = 0,8 + 2,66 DAP	53,0	20,29**	182,7
DRL = 44,1 + 28,4 V	40,4	12,21**	231,6
DRL = - 36,6 + 141 FE	68,7	39,45 **	121,8

\*\* Significativo em nível  $\alpha$  de 1%. [DRL = deformação residual longitudinal; DAP = diâmetro a 1,30 m de altura da árvore; V = volume da árvore; e FE = fator de estabilidade].



**Figura 3** – Relação entre o fator de estabilidade (FE) dos clones reunidos e DRL.

**Figure 3** – Relationship between stability factor (FE) of the clones together and DRL.

**Quadro 12** – Equações múltiplas para estimativa da densidade básica e propriedades mecânicas da madeira  
**Table 12** – Multiple equations for the estimation of the basic density and wood mechanical properties

Equação	R <sup>2</sup> (%)	F	QM erro
DB = 0,321 + 0,00106 DRL + 0,00550 A	67,6	17,7**	0,000656
C = 341 - 1,27 DRL + 10,5 DAP	60,8	13,2**	4
DJ = 405 - 2,34 DRL + 15,5 DAP	53,6	9,80**	3196
DJ = 606 - 1,74 DRL + 174 V	57,4	11,5**	2930

DAP = diâmetro a 1,30 m de altura; A = altura da árvore; DB = densidade básica; DJ = dureza Janka; C = compressão paralela às fibras; V = volume da árvore; e \*\* significativo em nível  $\alpha$  de 1%.

#### 4. CONCLUSÕES

Dos resultados pôde-se concluir que: *i*) o extensômetro é simples de ser usado, rápido e confiável para medir e identificar árvores com diferentes níveis de tensões de crescimento; *ii*) a deformação residual longitudinal (DRL), associada às tensões de crescimento, medida com o extensômetro foi em média 71  $\mu\text{m}$ ; *iii*) não foi encontrada diferença estatística nas DRLs medidas nas diferentes orientações cardeais em volta do tronco; *iv*) as DRLs variaram em função dos materiais genéticos de acordo com a análise de variância; *v*) em um dos materiais genéticos, no qual a DRL foi medida em duas posições ao longo do tronco (1,3 e 2,5 m), os valores foram semelhantes; *vi*) entre as várias propriedades da madeira, apenas a densidade básica foi correlacionada significativa e positivamente com a DRL quando todos os materiais genéticos foram analisados conjuntamente; *vii*) exceto para o fator de estabilidade (DAP/altura total) da progênie 5, as correlações entre as DRLs e as características de crescimento das árvores não foram significativas quando os materiais genéticos foram analisados isoladamente. Entretanto, quando os cinco materiais genéticos foram reunidos, apenas a altura total da árvore não resultou em correlação significativa com DRL; e *viii*) a adição de DRL às características de crescimento das árvores permitiu que a densidade e várias propriedades mecânicas da madeira fossem significativamente estimadas por modelos múltiplos.

#### 5. AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da Bolsa de Produtividade, e à Aracruz Celulose S.A., pelo apoio logístico e material oferecidos.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, O. J. R. **Método para controle das rachaduras de topo em toras de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex Maiden, visando a produção de lâminas por desenrolamento.** 1986. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **Annual book of ASTM standards.** Denvers, 1997. 679 p. (D143/1994: standard methods of testing small clear specimens of timber, p.23-53)
- ARCHER, R. R. **Growth stresses and strains in trees.** Berlin, Springer-Verlag, 1986. 24 p.
- BAILLÈRES, H. et al. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d’*Eucalyptus*. **Annals Science Forest**, v. 52, p. 157-172, 1995.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 373:(1957). **Methods of testing small clear specimens of timber.** London: BSI 1957. 31 p.
- CHAFE, A. C. Relationships between shrinkage and specific gravity in the wood of *Eucalyptus*. **Australian Forestry**, v. 57, p. 59-61, 1994.
- CHAFE, S. C. Peripheral growth stress and tree diameter in Eucalypts. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 13, n. 5, p. 523-525, 1995.
- CRESPO, E. A. **Tensão de crescimento e suas consequências, controláveis e não controláveis, no desdobro e secagem do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*.** 2000. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2000.

- DINWOODIE, J. M. Growth stresses in timber - a review of literature. **Forestry**, v. 39, n. 2, p. 162-170, 1966.
- FERNANDES, P. S. **Variações de densidade da madeira e suas relações com as tensões de crescimento em progênies de *Eucalyptus urophylla***. 1982. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Piracicaba, 1982.
- GARCIA, J. N. **Estados de tensão em árvores e de deformação em peças de madeira serrada**. 1992. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- JACOBS, M. R. **Stresses and strains in tree trunks as they grow in length and width**. Camberra, Forestry and Timber Bureau, 1965. 15 p. (Folheto, 96).
- JOUREZ, B. Le bois de tension: 1. Definition et distribution dans l'arbre. **Biotechnologie, Agronomie, Societé et Environnement**, v. 1, n. 2, p. 100-112, 1997.
- KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. **Forest Products Abstracts**, v. 10, n.3, p.61-119, 1987.
- KUBLER, H. Silviculture control of mechanical stresses in trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 18, p. 1215-1225, 1988.
- LIMA, J. T. **Clonal variation in the solid wood properties of *Eucalyptus***. 1999. 276 f. Tese (Ph.D.) – University of Wales, Bangor, 1999.
- LIMA, J. T. et al. Variações nas propriedades das madeiras de genótipos de *Eucalyptus*. **Cerne** (Submetido em 2004).
- LISBOA, C. D. J. **Estudo das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 1993. 298 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.
- MALAN, F.A. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.
- MARSH, E. K.; BURGERS, T. F. The relation between silvicultural treatment and timber quality in *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. **Forestry in South Africa**, v. 8, p. 63-74. 1967.
- MATTHECK, C.; KUBLER, H. **Wood- the internal optimization of trees**. Berlin: Springer, 1995. 129 p.
- MUNERI, A. et al. Relationships between surface longitudinal growth strain and tree size, wood properties and timber distortion of 4 year old plantation grown *Eucalyptus cloeziana*. In: IUFRO CONFERENCE -THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, 2000, Launceston. 2000. **IUFRO Proceedings...** Launceston: 2000. p. 292-300.
- MUNERI, A.; LEGATE, W.; PALMER, G. Relationships between surface growth strain and some tree wood and sawn timber characteristics of *Eucalyptus cloeziana*. **Southern African Forestry Journal**, v. 187, p. 41-49, 1999.
- NICHOLSON, J. E. A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs. **Wood Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 40-48, 1971.
- NICHOLSON, J. E. Growth stress differences in eucalypts. **Forest Science**, v. 19, n. 3, p. 169-174, 1973.
- SCHACHT, L.; GARCIA, J. N.; VENCOSKY, R. Variação genética de indicadores de tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 54, p. 55-68, 1998.
- WALKER, J. C. F. Characteristics of stemwood and their manipulation. In: WALKER, J. C. F. et al. **Primary wood processing: principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 153-196, 1993.
- WAUGH, G.; YANG, J. L.; OZARSKA, B. Sawn products from young, plantation-grown eucalypts. In: IUFRO DIVISION 5., CONFERENCE, **IUFRO Proceedings...** Pullman, Washington State, 1997. p. 175-183.
- WILKINS, A. P.; KITAHARA, R. S. Silvicultural treatments and associated growth rates and growth strains and wood properties in 12,5 year old *Eucalyptus grandis*. **Australian Forestry**, v. 54, p. 99-104, 1991.