

## PREDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESIDUAL LONGITUDINAL POR MEIO DE PROPRIEDADES DENDROMÉTRICAS E FÍSICAS DE ACÁCIA NEGRA

Rafael de Avila Delucis<sup>1</sup>, André Luiz Missio<sup>2</sup>, Rafael Beltrame<sup>3</sup>, Darci Alberto Gatto<sup>3</sup>

**Resumo:** O presente trabalho visou analisar as tensões de crescimento da madeira de acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) com vistas a relacioná-las com propriedades dendrométricas das árvores e físicas da madeira. Para isso, foram selecionadas 30 árvores de sete anos de idade no município de Piratini, Estado do Rio Grande do Sul. Foi avaliada a deformação residual longitudinal (DRL) utilizando-se extensômetro (CIRAD- Forêt), em quatro posições de leitura, além das propriedades dendrométricas das árvores: diâmetro à altura do peito (DAP; 1,3 m), altura comercial (H), espessura de casca (EP) e propriedades físicas da madeira: massa específica básica e aparente à 12% ( $\rho$  e  $\rho_{12\%}$ ), coeficientes de retratibilidade (radial,  $Q_r$ ; tangencial,  $Q_t$ ), coeficientes de inchamento (radial,  $\alpha_r$ ; tangencial,  $\alpha_t$ ; volumétrico,  $\alpha_v$ ) e coeficiente de anisotropia (A). A DRL encontrada para a madeira de acácia negra apresentou níveis menores aos encontrados na literatura para madeira do gênero *Eucalyptus*, indicando uma menor probabilidade de incidência de defeitos oriundos dessas tensões. Os valores médios de DRL denotaram uma variabilidade significativa entre as posições de leitura e apresentaram melhores correlações com os coeficientes de inchamento. Para a predição da DRL, destacaram-se as variáveis DAP, EP,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_t$  e  $\alpha_v$  pela exatidão dos modelos matemáticos obtidos utilizando esses parâmetros como variáveis independentes.

**Palavras-chave:** qualidade da madeira; tensões de crescimento; *CIRAD-Forêt*; estabilidade dimensional.

## PREDICTION OF RESIDUAL LONGITUDINAL STRAIN THROUGH DENDROMETRIC AND PHYSICAL PROPERTIES OF BLACK-WATTLE WOOD

**Abstract:** This study aimed to analyse the growth stress of black wattle (*Acacia mearnsii* De Wild) to aimed dendrometrics properties of trees and physical properties wood. For this, 30

---

<sup>1</sup> Engenheiro Industrial Madeireiro, Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, Brasil. <r.delucis@hotmail.com>.

<sup>2</sup> Engenheiro Industrial Madeireiro, Doutorando em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brasil. <andreluizmissio@gmail.com>.

<sup>3</sup> Engenheiro Florestal, Professor adjunto do Centro de Engenharias (CENG), Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). <beltrame.rafael@yahoo.com.br>, <darciatto@yahoo.com>.

trees (seven years old) were selected in Piratini, state of Rio Grande do Sul. Longitudinal residual strain (DRL) was evaluated using an extensometer (CIRAD- Forêt) in four reading positions; dendrometric properties: diameter at breast height (DAP; 1.3 m), commercial height (H), bark thickness (EP) and physical properties: basic and apparent specific gravity at 12% ( $\rho$  and  $\rho_{12\%}$ ), coefficient of retratibility (radial,  $Q_r$ ; tangential,  $Q_t$ ), swelling coefficient ((radial,  $\alpha_r$ ; tangential,  $\alpha_t$ ; volumetric,  $\alpha_v$ ) and anisotropic coefficient (A) were measured. The value of DRL found for black wattle wood showed lower level than those found in the literature for wood from *Eucalyptus* genus. Thus, black wattle wood could be indicated for the production of solid products as a function of its probability to originated defects from the growth stress. DRL and swelling coefficients were the best correlations found. The variables DAP, EP,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_t$  and  $\alpha_v$  showed high importance in the prediction of DRL due to the accuracy of mathematic models obtained using these parameters as independent variables.

**Keywords:** wood quality; growth stress; CIRAD-Forêt; dimensional stability.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os fatores comprometedores da qualidade da madeira têm grande destaque os efeitos causados pelas tensões de crescimento, que verificados na madeira após a derrubada das árvores, são considerados a principal origem da diminuição do rendimento de serrarias no processamento de toras.

As tensões de crescimento longitudinais são esforços mecânicos que se devem a deposição da lignina durante a diferenciação celular, o que resulta no inchamento da parede celular, assim, para regiões em que o ângulo das microfibrilas da camada  $S_2$  for menor do que  $40^\circ$ , ocorrerá um encurtamento das células, e quando for maior do que  $40^\circ$ , ocorrerá um alongamento (WILKINS, 1986; KUBLER, 1987; TRUGILHO, 2005).

As tensões de crescimento transversais têm origem semelhante às tensões longitudinais, pois por estarem comprimidas, as células estruturais periféricas tendem a expandir-se na direção diametral, tencionando os tecidos mais antigos e com isso aumentando seus diâmetros e reduzindo suas compressões. Além disso, a parte central do tronco fica submetida a um aumento progressivo de esforço de tração, devido à força cumulativa de arraste exercida por cada nova camada de células (WILKINS, 1986; KLUBER, 1987).

Contudo, Lisboa (1993) concluiu que existe uma concordância geral quanto à origem das tensões de crescimento, favorecendo a hipótese de inchamento devido à lignificação durante a maturação das células nas camadas de crescimento formadas mais recentemente. Nesse sentido,

Garcia (1992) explica essa hipótese asseverando que as tensões de crescimento surgem como consequência de um encurtamento longitudinal, simultâneo a uma expansão diametral das fibras periféricas das árvores devido à vinculação destas fibras aos tecidos adjacentes recentemente formados.

O mesmo autor ainda conceitua que as tensões de crescimento podem ser entendidas como um esforço triplo, em que se verificam um tração e uma compressão auto-geradas nas direções longitudinal e tangencial, respectivamente. A compressão tangencial provoca um deslocamento na direção radial maior do que o imposto pela própria tensão radial, introduzindo consequentemente uma tração nessa direção.

Genericamente, as tensões de crescimento são consideradas esforços mecânicos gerados durante o crescimento da árvore, tais tensões têm por finalidade manter a estabilidade da copa, quando solicitada por agentes atmosféricos, topográficos e/ou silviculturais (SOUZA, 2006).

O método de avaliação indireta das tensões de crescimento mais utilizado é o extensômetro *CIRAD-Forêt* (TRUGILHO, 2005; SOUZA, 2006). Conforme Valencia et al. (2011), a deformação residual longitudinal (DRL), obtida por esse método é um parâmetro que pode ser utilizado para selecionar árvores vivas menos propensas a incidência de rachaduras, consequentemente, toras que provavelmente obterão maior rendimento em serrarias.

Contudo, o mecanismo fisiológico que origina as tensões de crescimento e suas relações com outras propriedades da madeira não foram completamente elucidados. Todavia, Opie et al. (1984) e Beltrame et al. (2012a) deram indícios da origem dos mecanismos fisiológicos relatando fortes relações entre as tensões de crescimento e a idade de plantio, o tamanho da tora, a taxa de crescimento e a inclinação do fuste, bem como fatores genéticos. Em seu estudo, Souza (2006) expôs que algumas características biométricas das células fibrosas de *Eucalyptus dunni*, como o comprimento, a espessura de parede e o diâmetro externo, apresentaram significativas correlações com as medidas de tensões de crescimento e ondas de tensão, indicando suas influências sobre tais grandezas.

Em seu estudo, Malan; Hoon (1992) levantaram outros parâmetros que se correlacionam com os níveis de tensão de crescimento e, consequentemente, com os defeitos que ocorrem na madeira, tais como o incremento anual e a idade dos indivíduos arbóreos. Os mesmos autores, em pesquisa com *Eucalyptus* spp., observaram correlação significativa entre o incremento médio anual em diâmetro das árvores vivas e as rachaduras de topos de toras.

Nesse contexto, Trugilho (2005) afirmou que deve ser levado em consideração que a variabilidade dos níveis de deformação residual longitudinal pode estar relacionada a diversos fatores, como genéticos, ambientais, idades do plantio, locais de avaliação e equipamentos de

mensuração, contribuindo para uma maior variabilidade de resultados experimentais de medição.

Quanto às pesquisas relativas às tensões de crescimento, Fang et al. (2008) destacaram a estabilidade dimensional, pois tal característica da madeira possui relações com as tensões de crescimento ainda parcialmente desconhecidas, de modo que demandam estudos mais conclusivos a fim de que sejam esclarecidas.

Quanto às espécies alvo de estudos sobre as tensões de crescimento, têm destaque as o gênero *Eucalyptus*, no entanto o gênero *Acacia*, principalmente pelas espécies *Acacia mearnsii* e *Acacia mangium*, pode ser uma madeira alternativa, já que segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), em 2012, somente no Brasil, o volume plantios dessas espécies chegou a mais 148 mil hectares, e os principais usos dessa madeira não agregam o valor proporcionado, por exemplo, pelo nicho da confecção de produtos sólidos. Esses usos tradicionais da madeira de acácia são energia, carvão, cavaco para celulose e painéis de madeira reconstituída (ABRAF, 2013).

Determinar as correlações das tensões de crescimento com outras propriedades da madeira é uma das formas mais simplificadas de verificar as influências as quais essas tensões estão condicionadas. Portanto, o presente estudo objetivou determinar a DRL em árvores vivas de *Acacia mearnsii* De Wild e analisar as relações desse parâmetro com propriedades dendrométricas de árvores e propriedades físicas da madeira, bem como gerar modelos matemáticos a partir das propriedades físicas relativas à estabilidade dimensional da madeira para a estimativa das tensões de crescimento predizendo a DRL.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Povoamento experimental**

Para este trabalho, foram selecionadas para esse estudo 30 árvores de acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) em um plantio de aproximadamente sete anos de idade, com espaçamento inicial de 1,5 x 3 m, no município de Piratini, Estado do Rio Grande do Sul (31°30'09"S 53°05'12"O). Os indivíduos arbóreos escolhidos possuíam um bom estado fitossanitário (tronco cilíndrico, fuste retilíneo e evitando-se árvores localizadas em terreno com inclinação acentuada ou nas bordas do plantio).

## **2.2 Avaliação da deformação residual longitudinal (DRL)**

A deformação residual longitudinal (DRL) foi avaliada a partir da utilização de um extensômetro, fabricado pelo *Centre de Coopération Internationale em Recherche Agronomique Pour Le Développement* - CIRAD-Fôret, Paris, França. Por meio de tal equipamento, foram realizadas leituras em quatro posições distintas ao redor do tronco das árvores, em conformidade com as linhas e entre linhas do plantio, coincidentes com os pontos cardeais.

O procedimento de obtenção dos dados foi o mesmo utilizado por Beltrame et al. (2012a), que consistiu primeiramente no descascamento parcial da árvore, de forma a estabelecer uma janela de aproximadamente 30 cm de altura ao redor da árvore, à altura de 1,3 m. Em seguida, por intermédio de um gabarito, foram inseridos dois pinos na direção da grã, distantes entre si verticalmente de 4,5 cm, os quais tinham a finalidade de fixação de um relógio comparador digital. Posteriormente à fixação do aparelho, com auxílio de uma furadeira manual, foi inserida uma broca de 2 cm de diâmetro a uma profundidade de 2 cm.

Assim, após o rompimento do tecido lenhoso, a leitura foi realizada pelo valor mostrado no visor digital do relógio comparador. É importante destacar que para que não ocorresse influência nos resultados, nenhuma leitura foi realizada em momentos com incidência de ventos.

## **2.3 Propriedades dendrométricas das árvores**

Após a avaliação da DRL, aproveitando-se o descascamento parcial das árvores, foi mensurada a espessura da casca de cada uma das árvores utilizando-se um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Posteriormente, foram mensurados o diâmetro à altura do peito (DAP, 1,3 m) e a altura comercial (até a primeira bifurcação) por meio de uma suta e fita métrica, respectivamente, ambas com precisão de 0,1 cm. Para a medição da altura, foram derrubadas somente cinco árvores das trinta selecionadas para a avaliação da DRL, procedendo-se à medição das toras postas sobre o solo.

## **2.4 Propriedades físicas da madeira**

Das cinco árvores derrubadas, foi selecionada a primeira tora de 1,5 m de comprimento, as quais foram encaminhadas ao laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira (LPFM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) para a realização do desdobro das toras, o qual foi realizado por meio de cortes tangenciais, obtendo-se pranchas com 3 cm de espessura,

e em seguida, por cortes radiais, de modo a serem obtidas amostras com as dimensões de 2,0 cm x 2,0 cm x 5,0 cm (dimensão maior para a direção longitudinal), orientadas em relação aos planos anatômicos de corte, rejeitando-se a região da medula e da casca.

Após sua confecção, as amostras foram acondicionadas em uma câmara climatizada sob os parâmetros de 20°C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar, foram inseridas em água e em sequência submetidas a um procedimento de secagem convencional sob a temperatura de 100 ± 3°C por meio de estufa laboratorial com circulação natural de ar. Ao fim de cada uma dessas etapas (climatização, saturação e secagem) as amostras terminaram por obter massa constante, a partir da qual foram avaliadas a massa (balança analítica com 0,01 g de resolução) e as dimensões físicas (paquímetro digital com 0,01 mm de resolução). Com base nos dados obtidos, foram calculados os parâmetros relativos à massa específica e a estabilidade dimensional de acordo com as Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

$$\rho = \frac{m_0}{v_{s\%}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

$$Q = \frac{(L_{12\%} - L_0) \cdot m_0}{(m_{12\%} - m_0) \cdot L_0} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

$$\beta = \frac{(L_s - L_0)}{L_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 4})$$

$$\alpha = \frac{(L_s - L_0)}{L_0} \cdot 100 \quad (\text{Equação 5})$$

$$A = \frac{\beta_{\tan}}{\beta_{\text{rad}}} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:  $L_{12\%}$ = dimensão à 12% de umidade (cm);  $L_0$ = dimensão anidra (cm);  $L_s$ = dimensão saturada (cm);  $m_{12\%}$ = massa à 12% de umidade (g);  $m_0$ = massa anidra (g);  $v_s$ = volume saturado (cm<sup>3</sup>);  $v_{12\%}$ = volume à 12% de umidade (cm<sup>3</sup>);  $\rho$ = massa específica básica;  $\rho_{12\%}$ = massa específica básica à 12% de umidade;  $\beta$ = coeficiente de contração;  $\alpha$ = coeficiente de inchamento;  $A$ = coeficiente de anisotropia.

## 2.5 Análise estatística

O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado. Primeiramente foram verificadas a normalidade e homogeneidade de variância dos dados, pressupostos antes de qualquer teste paramétrico. Os dados de DRL foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), tomando como fator a posição de leitura. Em caso de significativa diferença entre

as médias, conforme o teste F (rejeição da hipótese de nulidade  $H_0$ ), as variáveis foram analisadas separadamente pelo teste de médias *Least significance difference* (LSD) de Fischer em 1% de probabilidade de erro.

A fim de explicar as relações funcionais entre cada variável analisada, foram realizadas análises de correlação simples (Pearson), uma para as propriedades dendrométricas das árvores e outra para as propriedades físicas da madeira.

Para a predição dos valores de DRL, foram ajustados modelos lineares por meio de análises de regressão simples, utilizando-se como variáveis independentes as variáveis que alcançaram as maiores correlações com a DRL, conforme a análise de Pearson. Com a mesma finalidade de predição, foram gerados modelos lineares por meio de análises de regressão multivariadas utilizando-se o procedimento de modelagem estatístico Stepwise. Para validação do modelo, foi feito um teste de heterogeneidade de variância, bem como de normalidade e independência dos erros através dos testes White, Shapiro-Wilk e Durbin-Watson, respectivamente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sem distinção entre o fator posição de leitura, o valor médio de DRL denotou-se em 0,062 mm. Na Tabela 1 é apresentada a descrição dos níveis de DRL observados neste estudo, níveis esses que tiveram seus valores médios comparados por meio das letras de testes de médias apresentadas.

**Tabela 1.** Resumo estatístico e teste de médias para a deformação residual longitudinal (DRL).  
**Table 1.** Statistical summary and means test of longitudinal residual strain (LRS).

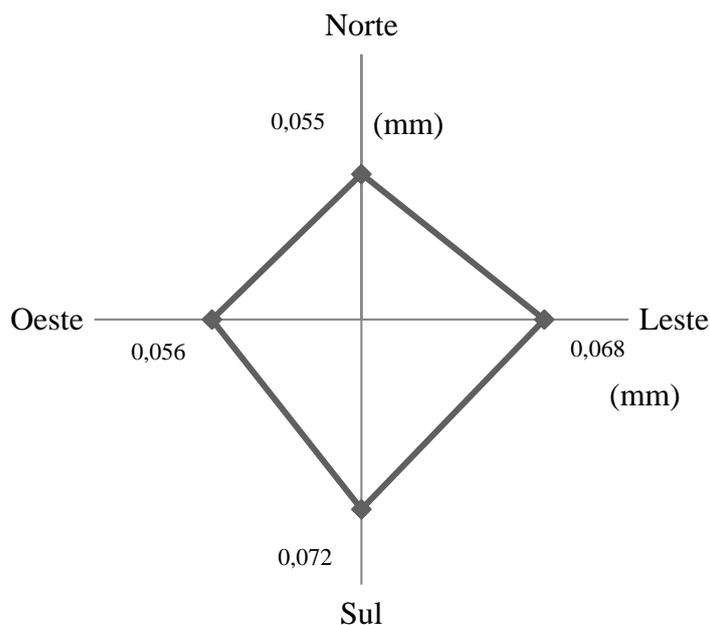
	Norte (mm)	Sul (mm)	Leste (mm)	Oeste (mm)
Mínimo	0,012	0,022	0,032	0,031
Máximo	0,128	0,150	0,118	0,093
$\mu$	0,055 a	0,072 c	0,068 bc	0,056 ab
cv	49,12	33,53	23,41	18,82

Em que:  $\mu$ = média; cv= coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença significativa em 1% de probabilidade de erro (Teste de Fisher,  $p < 0,01$ ).

Em geral, os valores médios de DRL observados neste trabalho são menores do que os verificados na literatura para a madeira de *Eucalyptus* spp. com idades semelhantes. No estudo de Pádua et al. (2004), a partir do exame de clones de sete anos de *Eucalyptus* sp., foram observados valores médios de 0,083 mm. Trugilho et al. (2004a), em avaliação que ocorreu em

clones híbridos de gênero *Eucalyptus* aos seis anos de idade, observaram um valor médio de 0,090 mm. Já Trugilho et al. (2007), examinando povoamentos de *Eucalyptus* sp. de seis anos, obtiveram valores de 0,088 mm.

Pela Tabela 1 pode-se verificar que os valores de DRL variaram significativamente no tocante às posições de leitura, tendo como valor mais elevado a posição Sul e logo em seguida a posição Leste (Figura 2).



**Figura 1.** Variabilidade dos valores médios da deformação residual longitudinal (DRL) ao redor do tronco das árvores de acácia negra.

**Figure 1.** Variation of average values of longitudinal residual strain (LRS) around the trunk of black wattle trees.

Em termos estatísticos, a posição Sul apresentou valor significativamente mais elevado do que as posições Norte e Oeste, no entanto não foi observada diferença significativa desta posição Sul quando comparada com a posição Leste.

Outros autores, por meio de análises estatísticas, verificaram valores médios de DRL significativamente diferentes ao longo da circunferência do tronco em árvores de *Eucalyptus* spp., frisando que as posições de leitura da DRL definidas por esses autores, assim como neste estudo, coincidiram com as direções dos pontos cardinais. Segundo Muneri et al. (1999), a direção Oeste mostrou valores mais elevados em povoamentos de *Eucalyptus* sp. com dez anos de idade. Beltrame et al. (2012a), em um estudo com clones híbridos de *Eucalyptus* spp. aos nove anos de idade, concluíram que os valores médios de DRL foram significativamente maiores para o sentido Leste.

Por outro lado, Lima et al. (2004), em estudo com cinco materiais genéticos distintos do gênero *Eucalyptus*, sendo um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e quatro híbridos naturais de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex Maiden, com idades entre 8 e 15 anos, observaram que não houve diferença significativa ao redor do tronco. A análise dos valores médios de DRL ao redor das quatro posições de leitura empregadas nesse estudo indica que para a avaliação da DRL utilizando-se esta metodologia proposta se faz necessário que sejam efetuadas leituras, no mínimo, em quatro posições.

Yang (2005), avaliando povoamentos de *Eucalyptus globulus* de 32 anos de idade, verificou que a DRL apresentou variabilidade significativa ao redor do tronco em função das posições de leitura. Adicionalmente, o autor concluiu que a assimetria da distribuição dos níveis de tensão de crescimento teve influência significativa no rendimento de madeira serrada.

No presente estudo, os valores médios obtidos para as propriedades dendrométricas foram: 17,19 cm para o diâmetro à altura do peito (DAP; 1,3 m); 17,74 m para a altura comercial (H); 5,857 cm para a espessura de casca (EP), frisando que essas propriedades foram avaliadas nas trinta árvores analisadas (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores médios de propriedades dendrométricas das árvores de acácia negra.

**Table 2.** Average values of biometric properties of trees of black wattle.

	DAP (cm)	H (m)	EP (mm)
Mínimo	9,55	15,5	3,91
Máximo	21,9	19,6	7,88
$\mu$	17,192	17,74	5,857
cv	20,66	5,59	18,20

Em que:  $\mu$ = média; cv= coeficiente de variação (%); DAP= diâmetro a altura do peito; H= altura; EP= espessura de casca.

As propriedades dendrométricas EP e DAP não se correlacionaram significativamente. Em relação à DRL, verificou-se correlação significativa dessa variável com o DAP e o EP, sendo que para o EP essa correlação foi positiva, e já para o DAP a correlação encontrada teve um coeficiente negativo, inferindo assim, que à medida que são verificados maiores diâmetros nas árvores, os níveis de tensão de crescimento são menores (Tabela 3).

**Tabela 3.** Correlação simples (Pearson) para a deformação residual longitudinal (DRL) e propriedades dendrométricas das árvores de acácia negra.

**Table 3.** Pearson correlation for longitudinal residual strain (LRS) and biometric properties of black wattle trees.

	DRL	DAP	EP
DRL	1	-0,58**	0,44*
DAP		1	0,09 <sup>ns</sup>
EP			1

Em que: DRL= deformação residual longitudinal; DAP= diâmetro a altura do peito; EP= espessura de casca; <sup>ns</sup>=não significativo; \*= significativo em 5% de probabilidade de erro; \*\*=significativo em 1% de probabilidade de erro.

Como já citado na metodologia, a variável H só pôde ser avaliada nas cinco árvores derrubadas, fazendo com que essa variável não fosse adicionada à análise de correlação simples apresentada na Tabela 3. Entretanto, sua correlação com a DRL foi testada separadamente da mesma maneira que para as demais propriedades dendrométricas; tal análise estatística denotou um coeficiente de correlação igual a -0,54 ( $p = 0,34$ ). Portanto, ficou evidenciado que a variável H não apresentou correlação significativa com a DRL.

Muneri et al. (2000) encontraram correlação significativa da DRL com a massa específica do alburno ( $r = 0,40$ ), com o DAP ( $r = -0,51$ ) e com a altura ( $r = -0,44$ ) de árvores de *Eucalyptus cloeziana*. Já Beltrame et al. (2012a), encontraram correlações significativas da DRL com o DAP e o EP, sendo que para o primeiro parâmetro a correlação foi negativa ( $r = -0,27$ ), já para o segundo, a correlação foi positiva ( $r = 0,24$ ).

Da mesma forma, Beltrame et al. (2013), evidenciaram correlação significativa da variável EP com a DRL ( $r = 0,19$ ) em povoamentos de *Eucalyptus saligna* aos oito anos de idade. Carvalho et al. (2010), classificando povoamentos de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*, em cinco classes diamétricas, observaram correlações negativas e significativas entre DAP e DRL ( $r = -0,84$ ).

Na Tabela 4 é apresentada a descrição estatística dos parâmetros físicos da madeira em estudo, a qual consistiu em seus valores mínimos, máximos, médios e coeficientes de variação.

**Tabela 4.** Valores médios das propriedades físicas da madeira de acácia negra.**Table 4.** Average values of the physical properties of wood black wattle.

	$\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )	$\rho_{12\%}$ (g.cm <sup>-3</sup> )	Qr (%)	Qt (%)	$\alpha_r$ (%)	$\alpha_t$ (%)	$\alpha_v$ (%)	A *
Mínimo	0,435	0,583	0,063	0,147	2,183	4,708	9,069	1,118
Máximo	0,669	0,870	0,226	0,351	13,519	13,155	21,343	3,587
$\mu$	0,554	0,698	0,135	0,231	4,740	8,639	14,107	2,148
cv	9,99	10,70	26,65	22,55	48,71	24,75	21,31	29,55

Em que:  $\rho$ = massa específica básica;  $\rho_{12\%}$ = massa específica aparente à 12% de umidade; Qr= coeficiente de retratibilidade radial; Qt= coeficiente de retratibilidade tangencial;  $\alpha_r$ = coeficiente de inchamento radial;  $\alpha_t$ = coeficiente de inchamento tangencial;  $\alpha_v$ = coeficiente de inchamento volumétrico; A= coeficiente de anisotropia;  $\mu$ = média; cv= coeficiente de variação (%); \*= variável adimensional.

Os resultados observados na Tabela 4 são similares aos verificados nos trabalhos conduzidos por Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1986; 1988), que calcularam a massa específica básica para a madeira da espécie *Acacia mearnsii*, encontrando respectivamente os valores médios de 0,62 e 0,63 g.cm<sup>-3</sup>. Analogamente, Crous et al. (2012), avaliando a madeira de *Acacia mearnsii*, proveniente de três regiões distintas da África do Sul, obtiveram valores médios de  $\rho$  similares ao deste estudo, os quais ocorreram entre 0,551 e 0,641 g.cm<sup>-3</sup>.

Já Eloy et al. (2013), examinando a variação axial da  $\rho$  da madeira de *Acacia mearnsii* aos três de idade, encontraram para a altura do DAP valores médios semelhantes aos obtidos neste estudo, os quais variavam entre 0,356 e 0,585 g.cm<sup>-3</sup>.

A classificação da madeira a partir dos níveis de contração proposta pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (1985) indica que com valor médio de 14,107% para o  $\alpha_v$ , a madeira analisada neste estudo pode ser considerada como de média contração.

Em se tratando do coeficiente de anisotropia, conforme a classificação proposta por Nock et al. (1975), a madeira de acácia negra não deve ser empregada para fins que requeiram elevada estabilidade dimensional, por exemplo, na indústria moveleira e de instrumentos musicais. Dessa maneira, com base no valor médio de coeficiente de anisotropia, essa madeira só poderia ser indicada para a fabricação de carvão, lenha e para a construção civil. A análise de correlação simples (Pearson) denotou que a DRL correlacionou-se melhor com a massa específica aparente do que com a massa específica básica (Tabela 5).

**Tabela 5.** Correlação simples (Pearson) para a deformação residual longitudinal (DRL) e propriedades físicas da madeira de acácia negra.**Table 5.** Pearson correlation for longitudinal residual strain (LRS) and physical properties of black wattle wood.

	DRL	$\rho$	$\rho_{12\%}$	Qr	Qt	$\alpha_r$	$\alpha_t$	$\alpha_v$	A
DRL	1	-0,19	-0,49	-0,78	-0,12	-0,84	-0,86	-0,87	0,08
$\rho$		1	0,87	0,32	0,55	0,64	0,66	0,64	0,05
$\rho_{12\%}$			1	0,87	0,32	0,55	0,64	0,66	0,64
Qr				1	-0,18	0,63	0,79	0,74	0,54
Qt					1	0,41	0,34	0,37	-0,54
$\alpha_r$						1	0,95**	0,98**	-0,24
$\alpha_t$							1	0,99**	0,03
$\alpha_v$								1	-0,08
A									1

Em que: DRL= deformação residual longitudinal;  $\rho$ = massa específica básica;  $\rho_{12\%}$ = massa específica aparente à 12% de umidade; Qr= coeficiente de retratibilidade radial; Qt= coeficiente de retratibilidade tangencial;  $\alpha_r$ = coeficiente de inchamento radial;  $\alpha_t$ = coeficiente de inchamento tangencial;  $\alpha_v$ = coeficiente de inchamento volumétrico; A= coeficiente de anisotropia; \*\*=significativo em 1% de probabilidade de erro.

Na Tabela 5, verificou-se que a DRL correlacionou-se fortemente (entre 0,7 e 1,0) com o parâmetro Qr (-0,78). No entanto, os maiores coeficientes de correlação com a DRL foram observados com os coeficientes de inchamento:  $\alpha_r$  ( $r=-0,84$ ),  $\alpha_t$  ( $r=-0,86$ ) e  $\alpha_v$  ( $r=-0,87$ ).

Essa relação funcional entre a DRL e os inchamentos pode ser explicada pelo efeito das contrações na leitura do relógio comparador no momento do ensaio. Assim, a modificação na estrutura do tecido lenhoso, devido ao mecanismo de dessorção de água, provavelmente causou a alteração dos valores de DRL no sentido de quanto maior a intensidade da contração, menor o nível de tensão de crescimento medido, haja vista que o efeito do esforço de contração ocorre no sentido contrário ao efeito do esforço de liberação da tensão de crescimento. Portanto, explica-se também a tendência de inversa proporcionalidade denotada pelo sinal dos coeficientes de correlação entre os inchamentos e a DRL.

Alguns autores, como Trugilho et al. (2004a), atribuem ao ângulo de grã uma grande influência na variabilidade das tensões de crescimento, dessa maneira é pertinente presumir que a relação entre a estabilidade dimensional e o ângulo de grã pode explicar as correlações evidenciadas no presente trabalho entre os inchamentos e a DRL, haja vista que os mesmos autores verificaram que o ângulo da grã analogamente a DRL também correlaciona-se significativamente com as contrações.

Em seu trabalho, Lima et al. (2004) avaliaram que não houve correlação da DRL com a contração volumétrica ( $r$ ). Trugilho et al. (2004b), avaliando clones de *Eucalyptus*, observaram

correlação significativa entre a DRL e a contração radial ( $r= 0,46$ ), tangencial ( $r= 0,71$ ) e volumétrica ( $r= 0,69$ ), no entanto, não com o coeficiente de anisotropia.

Os modelos matemáticos finais gerados a partir das variáveis DAP, EP,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_t$  e  $\alpha_v$  foram significativos, sendo que apresentaram normalidade dos dados (Shapiro-Wilk test: p-valor $>0,05$ ), heterogeneidade de variância (White test: p-valor $<0,05$ ) e independência dos resíduos (Durbin-Watson test: p-valor $>0,05$ ) (Tabela 6).

**Tabela 6.** Modelos múltiplos e simples propostos para a predição da deformação residual longitudinal (DRL).

**Table 6.** Multiple and simple models proposed for predicting the longitudinal residual strain (LRS).

Equação	R <sup>2</sup>	Syx	Valor F
DRL = 0,0963153-0,00334442·DAP+0,00372926·EP	0,769***	0,00665187	41,09**
DRL = 0,110528-0,00283411·DAP	0,578	0,00907049	34,44**
DRL = 0,092736-0,000326948· $\alpha_r^3$	0,778	0,00677822	10,45*
DRL = 0,10141-0,00041064· $\alpha_t^2$	0,788	0,00660942	11,15*
DRL = 0,10547-0,000193445· $\alpha_v^2$	0,801	0,00638886	12,14*

Em que: DRL = Deformação Residual Longitudinal (mm); DAP = diâmetro a altura do peito (cm); EP = espessura de casca (mm); (%);  $\alpha_r$  = coeficiente de inchamento radial (%);  $\alpha_t$  = coeficiente de inchamento tangencial (%);  $\alpha_v$  = coeficiente de inchamento volumétrico (%); Syx= erro médio padrão (mm); R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação; \* = significativo em 5% de probabilidade de erro; \*\* = significativo em 1% de probabilidade de erro; \*\*\* = coeficiente de determinação ajustado para modelos múltiplos.

Em sua totalidade, os modelos apresentados na Tabela 6 foram significativos em níveis de 1 e 5% de probabilidade de erro. Para o modelo linear multivariado gerado, levando-se em consideração as propriedades dendrométricas, as variáveis DAP e EP foram selecionadas, a fim de realizar a melhor estimativa.

Dentre as propriedades dendrométricas tidas como significativas pela análise de correlação simples, o DAP foi a variável independente mais adequada para a predição da DRL por meio de um modelo de regressão simples. Com base na precisão de ajuste, também se destacaram os modelos curvos gerados utilizando-se como variáveis independentes os coeficientes de inchamento:  $\alpha_r$ ,  $\alpha_t$  e  $\alpha_v$ , com R<sup>2</sup> entre 0,778 e 0,801.

Por meio do coeficiente de inchamento volumétrico, o procedimento estatístico empregado para a confecção de modelos matemáticos curvos denotou que foi possível explicar até 80% da variabilidade dos níveis de DRL. Lima et al. (2004), analisando as correlações entre os valores médios de DRL e algumas características de crescimento e da madeira (DAP, altura, volume, massa específica básica e contração volumétrica), concluíram que não foi possível gerar modelos matemáticos significativos utilizando análises de regressão simples.

Portanto, os resultados evidenciados denotam a interação de propriedades físicas tangentes à estabilidade dimensional, como os inchamentos, bem como de propriedades dendrométricas. Tais resultados indicam que pesquisas dessa natureza devem ser realizadas com mais frequência, a fim de consolidar o conhecimento desse tema.

#### 4 CONCLUSÕES

- Os níveis de DRL denotaram-se menos elevados do que os contidos na literatura para a madeira de espécies do gênero *Eucalyptus*;
- Os valores de DRL variaram significativamente entre as posições de leitura, sendo que o valor mais elevado foi observado para a posição Sul;
- Dentre as propriedades dendrométricas das árvores, o DAP e o EP correlacionaram-se significativamente com a DRL e em conjunto geraram o melhor modelo para estimá-la;
- No tocante as propriedades físicas relativas à estabilidade dimensional, destacaram-se os coeficientes de inchamento radial, tangencial e volumétrico por subsidiarem modelos matemáticos com os maiores precisão de ajuste.

#### 5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013**, ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013. 148p.

BELTRAME, R. BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO; D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.6, p. 791-796, 2012a.

BELTRAME, R.; LAZAROTTO, M.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; AGUIAR, A. M. Determinação das deformações residuais longitudinais decorrentes das tensões de crescimento em *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v.22, n.2, p. 343-351, 2012b.

BELTRAME, R.; MATTOS, B. D.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; PEDRAZZI, C. Evaluation of longitudinal residual strain of *Eucalyptus saligna* Smith. wood. **Scientia Florestalis**, v.41, n.97, p. 095-101, 2013.

CARVALHO, A. M.; GONÇALVES, M. P. M.; AMPARADO, K. F.; LATORRACA, J. V. F.; GARCIA, R. A. Correlações da altura e diâmetro com as tensões de crescimento em árvores de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. **Árvore**, v.34, n.2, p. 323-331, 2010.

CROUS, C. J.; JACOBS, S. M.; ESLER, K. J. Wood anatomical traits as a measure of plant responses to water availability: invasive *Acacia mearnsii* De Wild. compared with native tree species in fynbos riparian ecotones, South Africa. **Trees**, v.26, n.5, p. 1527-1536, 2012.

ELOY, E.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SOUZA, V. Q.; SCHMIDT, D. Variação axial e efeito do espaçamento na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mearnsii*. **Ciência da Madeira**, v.4, n.2, p. 215-227, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA – CNPF, 1986. 89p. (EMBRAPA – CNPF. Documentos, n. 17).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina**. Curitiba: EMBRAPA – CNPF, 1988. 113p. (EMBRAPA – CNPF. Documentos, n. 21).

FANG, C. H.; CLAIR, B.; GRIL, J.; ALMÉRAS, T. Transverse shrinkage in G-fibers as a function of cellwall layering and growth strain. **Wood Science and Technology**, v.41, n.8, p. 659–671, 2008.

GARCIA, J. N. **Estudos de tensão em árvores e de deformação em peças de madeira serrada**. 1992. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada**. Boletim ABPN, n.36, p. 1-189, 1985.

KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. **Forest Products Abstracts**, v.10, n.3 p. 61-119, 1987.

LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO S. C. DA S.; CRUZ, C. R. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em Eucaliptos e suas associações com outras propriedades. **Revista Árvore**, v.28, n.1, p. 107-116, 2004.

LISBOA, C. D. J. **Estudo das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 1993. 298f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

MALAN, F. S.; HOON, M. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n.163, n.1, p. 13-20. 1992.

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, n.1, p. 41-49, 1999.

MUNERI, A.; KNIGHT, J.; LEGGATE, W.; PALMER, G. 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 **Anais...** Launceston: 2000. p.292-300.

- NOCK, H. P.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, Universidade Federal do Paraná, 1975. 216p.
- OPIE, J. E.; CURTIN, R. A.; INCOLL, W. D. Stand management. In: HILLS, W. E.; BROWN, A. G. (Ed.). **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: CSIRO, 1984. 434p.
- PÁDUA, F. A.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T.; CARDOSO JR, A. A.; OLIVEIRA, A. C. Estimativas de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v.32, n.66, p. 152-160, 2004.
- SOUZA, M. A. M.de. **Metodologias não destrutivas para avaliação das tensões de crescimento em *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 2006. 80f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- TRUGILHO, P. F.; IWAKIRI, S.; ROCHA, M. P.; MATOS, J. L. M.; SALDANHA, L. K. Efeitos da idade e classe diamétrica na deformação residual longitudinal em árvores de *Eucalyptus dunnii* maiden. **Árvore**, v.28, n.5, p. 725-731, 2004a.
- TRUGILHO, P. F.; SOUZA, M. A. M.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; MENDES, L. M.; MORI, F. A.; SILVA, J. R. M. Deformação residual longitudinal e propriedades da madeira em clones de *Eucalyptus*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EMBESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEN, 2004b, 12p.
- TRUGILHO, P. F. **Tensão de crescimento em árvores vivas de clones de *Eucalyptus* spp. e de *Eucalyptus dunnii* Maiden e propriedades de sua madeira**. 2005. 123f. Tese (Pós Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T.; PÁDUA, F. A.; SOUZA, M. A. M. Deformação residual longitudinal (DRL) e sua relação com as características de crescimento da árvore em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, v.13, n.2, p. 130-137, 2007.
- VALENCIA, J.; HARWOOD, C.; WASHUSEN, R.; MORROW, A.; WOOD, M.; VOLKER, P. Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. **Wood Science and Technology**, v.45, n.1, p. 15–34, 2011.
- WILKINS, A. P. Nature and origin of growth stress in trees. **Australian Forestry**, Canberra, v.49, n.1, p. 56-62, 1986.
- YANG, J. L. The impact of log-end splits and spring on sawn recovery of 32-year-oldplantation *Eucalyptus globulus* Labill. **Holz Roh-Werkst**, v.63, n.6, p. 442–448, 2005.