

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Método da *Thin-plate spline* - TPS aplicado ao estudo das deformações específicas de retração ( $\varepsilon_r$ ) da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis***

**Maristela Gava**

Tese apresentada para obtenção do título de  
Doutora em Ciências na área de Recursos  
Florestais com opção em Tecnologia de  
Produtos Florestais

Piracicaba  
2009

Maristela Gava  
Arquiteta e Urbanista

**Método da *Thin-plate spline* - TPS aplicado ao estudo das deformações específicas de retração ( $\epsilon_r$ ) da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis***

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências na área de Recursos Florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba  
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Gava, Maristela

Método da *Thin-plate spline* - TPS aplicado ao estudo das deformações específicas de retração ( $\epsilon_r$ ) da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* / Maristela Gava. -- Piracicaba, 2009.

116 p. : il.

Tese (Doutorado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.  
Bibliografia.

1. Deformação e estresses 2. Eucalipto 3. Madeira 4. Tecnologia da madeira I. Título

CDD 674.142  
G279m

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**



Aos meu pais, Modesto e Anna



## AGRADECIMENTOS

Ao meu estimado amigo e orientador Prof. Dr. José Nivaldo Garcia.

Ao prof. Dr. Luciano da Fontoura Costa pela valiosa colaboração e coorientação.

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela confiança.

Às amigas Claudia, Julieth e Sharon, a quem sempre pude recorrer nos momentos mais tensos e com quem também pude compartilhar os insuperáveis momentos de alegria.

Ao técnico do Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira - LEM, Luiz Eduardo Facco pela sua prontidão e disponibilidade em colaborar, sempre.

Aos “meninos” da carpintaria: Juca, Branquinho, Magrão, Maguila, Palhinha, Sidney e, em especial ao Biro Biro e ao Emílio que ajudaram na preparação das amostras, pelo apoio em todas as etapas e pela constante alegria de todos.

Ao Valdivino, da serralheria, que produziu o suporte metálico para a máquina fotográfica.

Ao Nilo, da empresa Qualiart, pela assessoria e treinamento na técnica da serigrafia.

Aos Engenheiros Florestais João Carlos e Rildo e ao Técnico Florestal Carlos Maria das estações experimentais de Itatinga e Anhembi.

Ao Sr. Valdir, motosserrista e ao tratorista da Estação Experimental de Itatinga, ao Sr. José Mandro, motosserrista da Fazenda Areão e ao “Lambari”, motorista do caminhão munck, que colaboraram na coleta e transporte das toras.

Ao Silvio e à Vilma do Empréstimo entre Bibliotecas.

À Leticia (Pedrita) Pedroso Ramos que compartilhou comigo as agruras de enveredar por caminhos ainda pouco conhecidos das medições por análise digital de imagens no campo das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

À Divisão de Atendimento à Comunidade – DVATCOM, da ESALQ, por conceder a oportunidade de morar por um ano na vila estudantil da PG.

À FAPESP e ao CNPq pelo aporte financeiro.

Ao ensino público e gratuito.



*“O que me tranquiliza é que tudo o que existe, existe com uma precisão absoluta.  
O que for do tamanho de uma cabeça de alfinete não transborda nem uma fração  
de milímetro além do tamanho de uma cabeça de alfinete.  
Tudo o que existe é de uma grande exatidão.  
Pena é que a maior parte do que existe com essa exatidão nos é tecnicamente invisível.  
O bom é que a verdade chega a nós como um sentido secreto das coisas.  
Nós terminamos adivinhando, confusos, a perfeição.”*

*Clarice Lispector*



## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Colocação do problema .....	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Geral .....	19
1.2.2 Específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Variação dimensional da madeira.....	21
2.1.1 Variação do teor de umidade da madeira .....	22
2.1.2 Anisotropia da retratibilidade e do inchamento da madeira.....	24
2.1.3 Variação dimensional x densidade da madeira.....	27
2.1.4 Defeitos relacionados à variação dimensional da madeira.....	29
2.1.5 Medição da variação dimensional da madeira.....	31
2.2 Processamento e análise digital de imagens .....	32
2.2.1 Processamento e análise digital de imagens aplicados ao estudo da madeira .....	34
2.2.2 Thin-plate spline - TPS.....	37
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1 Preparo das amostras .....	44
3.2 Captura, processamento e análise das imagens para estudo das deformações da madeira. .....	47
3.3 Validação do método da TPS.....	53
3.3.1 Deformações impostas.....	53
3.3.2 Deformações autoequilibradas .....	56
3.4 Ensaios preliminares para definição dos parâmetros de preparo das amostras .....	57
3.4.1 Definição do método de marcação dos pontos de controle nas amostras.....	58
3.4.2 Resistência da tinta serigráfica ao processo de umedecimento por imersão em água e secagem em estufa e definição do retículo a ser utilizado.....	61
3.5 Análises Estatísticas.....	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	71
4.1 Validação do método da Thin-plate Spline - TPS .....	71
4.2 Método TPS-Cunha .....	78
4.3 Método da NBR aplicado ao corpo-de-prova normatizado .....	90
4.4 Método da TPS aplicado ao corpo-de-prova normatizado pela NBR .....	93
4.5 Análise comparativa entre os métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR .....	95
5 CONCLUSÕES.....	111
REFERENCIAS .....	113



## RESUMO

### **Método da *Thin-plate spline* - TPS aplicado ao estudo das deformações específicas de retração ( $\epsilon_r$ ) da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis***

Este trabalho teve como objetivo principal contribuir para aprimoramento dos procedimentos de ensaio e da metodologia de medição dos deslocamentos para determinação das deformações específicas de retração das madeiras de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e do híbrido *urograndis* nas direções radial e tangencial utilizando o método da Thin-plate Spline - TPS. Foi realizado um estudo teórico e prático de maneira a contribuir para a revisão do texto da Norma Brasileira NBR 7190/97 no sentido de otimizar os ensaios de variação dimensional, principalmente no que se refere à especificação dos corpos-de-prova e ao método utilizado para o cálculo das deformações específicas por retração. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizadas 30 árvores das espécies *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, e *urograndis* provenientes da Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, SP. A análise estatística foi feita segundo o delineamento inteiramente casualizado, com amostragem independente e cinco repetições utilizando-se os esquemas fatoriais 3 x 2 x 4 (espécie x altura x posição radial) para o estudo das variáveis obtidas dos corpos de prova em forma de cunha; 3 x 2 (espécie x altura) para o estudo das variáveis obtidas dos corpos-de-prova da NBR 7190/97 e dos discos de umidade; e 3 x 2 x 3 (espécie x altura x método) para o estudo das variáveis obtidas entre os métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR. O método proposto mostrou-se sensível às deformações sofridas pelas amostras e possibilita uma análise detalhada das deformações em toda a superfície de um corpo-de-prova. Foram verificadas variações da retração no sentido medula-casca verificando-se que o método da TPS aplicado no corpo de prova do tipo cunha forneceu valores de retração sempre inferiores aos obtidos através dos procedimentos normatizados. Quando aplicado no corpo cúbico forneceu valores estatisticamente iguais aos obtidos pelo uso da NBR 7190/97. A umidade natural da madeira na árvore viva e a densidade básica da madeira não foram suficientes para explicar as variações encontradas na retração mas verificou-se uma tendência de a retração radial decrescer com o aumento dessas duas variáveis e de a retração tangencial crescer com o aumento da umidade natural e densidade básica.

Palavras-chave: Retração; Madeira; Thin-Plate Spline; *Eucalyptus*



## ABSTRACT

### ***Thin-plate spline - TPS method applied on the assessment of shrinkage ( $\epsilon_r$ ) of *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis****

The present research work had the aim to contribute for the development of testing procedures and evaluation of displacements to determine shrinkage of *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* and a hybrid *E. urograndis* in the radial and tangential directions using the Thin-plate Spline – TPS method. It was carried out a theoretical and practical study in order to contribute to reviewing of Brazilian Standard NBR 7190/97 looking forward to optimize the dimensional variation testes mainly on the specification of specimen and method of assessment of shrinkage. Thirty trees of those species from the Forest Sciences Experimental Station of Anhembi were utilized for the study. The statistical analysis were made according full randomly experimental design with independent sampling and five replications through factorial scheme 3 x 2 x 4 (species x longitudinal location x radial location) for the study on variables obtained from the specimens which had the wedge shape; 3 x 2 (species x longitudinal location) for the study on variable obtained from the NBR 7190 standardized specimen and for the study on natural moisture content in trees and 3 x 2 x 3 (species x longitudinal location x method) to compare the methods of assessment of wood shrinkage. The proposed method showed to be sensible to samples shrinkage and make possible a detailed analysis of strains in the whole specimen surface. Shrinkages variations from pith to bark were studied observing that the TPS method applied on the wedge shape specimen produced shrinkage values smaller than those obtained through standardized procedures. When applied on cubic specimen produced values statistically the same as those obtained through NBR 7190/97. The natural moisture content in alive tree and the basic density of wood were not enough to explain the verified shrinkage variation but it was verified a tendency of the radial shrinkage to decrease as those variables increase and a tendency of tangential shrinkage to increase as the natural moisture and basic density also increase.

Key words: strain, shrinkage, wood, Thin-Plate Spline, *Eucalyptus*



## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é utilizada na construção civil em diversas aplicações, sejam elas temporárias, como andaimes, escoramentos e formas, sejam definitivas como forros, pisos, estruturas de cobertura e esquadrias, situações nas quais já é tradicionalmente aceita, especialmente quando se tratam de espécies nativas. O desconhecimento de algumas propriedades e características da madeira, tanto por parte da população em geral, como também dos profissionais ligados à construção civil, graduados ou não, tem fomentado o preconceito existente de que a madeira é um material de baixa durabilidade e resistência para ser utilizado como principal matéria prima na produção de componentes construtivos. O preconceito é ainda maior quando se trata de madeira de plantios florestais como o *Eucalyptus*, que carrega o estigma de madeira de baixa qualidade, que empena, racha e apresenta índices de retração e inchamento muito altos.

Algumas dessas propriedades e características, por não terem sido ainda suficientemente estudadas, colocam a madeira em desvantagem em relação a outros materiais, com destaque para a instabilidade dimensional como uma das que mais interferem na sua utilização plena. A madeira de eucalipto, por exemplo, é conhecida por possuir altos índices de retração e inchamento, o que tem sido motivo suficiente para vetar o seu emprego em diversas situações.

Os defeitos mais comuns que ocorrem nas peças de madeira serrada e que estão relacionados às propriedades de retração e inchamento são as rachaduras internas e superficiais, os empenamentos e as variações de suas dimensões ao longo do tempo de uso. Os componentes construtivos apresentam frestas, distorções de formas e alterações nas dimensões que comprometem seu desempenho geral, chegando muitas vezes a inviabilizar o uso.

Torna-se, portanto, indispensável o estudo dos fatores relacionados à variação dimensional da madeira para melhor compreensão do fenômeno, bem como para definir os procedimentos mais adequados para minimizar seus efeitos na produção de componentes construtivos para a construção civil. Calil Jr.; Lahr e Dias (2003) destacam a importância de estudos mais apurados da retração e do inchamento. É notório que são poucos os pesquisadores que se dedicam a estudar o fenômeno, tanto em nível nacional como internacional, haja vista a escassez de literatura científica que trata do assunto com profundidade.

## 1.1 Colocação do problema

Segundo as normas brasileira NBR 7190/97, americana ASTM-D143 e panamericana COPANT 462, a caracterização das madeiras deve incluir, dentre outros, os ensaios de variação dimensional. No caso da NBR 7190/97 muitos pesquisadores têm identificadas, no texto que trata da metodologia e dos procedimentos de ensaio para determinação do índice de estabilidade dimensional, algumas lacunas e/ou pontos que necessitam ser aprimorados e, a partir dos quais, têm encontrado motivação para o desenvolvimento de diversos trabalhos.

Destaca-se o trabalho de Logsdon (2002) que, após analisar alguns desses autores, propõe uma nova redação para o ensaio de estabilidade dimensional da madeira, incluindo recomendações para o traçado dos diagramas de retração e inchamento em função da umidade. Recomenda também, alterações nos procedimentos de ensaio, especialmente no que se refere à qualidade da água utilizada na saturação dos corpos-de-prova bem como aos instantes nos quais devem ser feitas as avaliações de massa e de dimensões da amostra. Na literatura consultada não foram encontrados trabalhos voltados à especificação da geometria do corpo-de-prova, nem tampouco aos métodos e instrumentos preconizados para a obtenção das deformações específicas que guardem maior fidelidade com as condições reais de aplicação da madeira, onde as direções importantes de deslocamentos devem ser as direções principais especificadas na norma.

Para o estudo das propriedades de retração e inchamento da madeira as normas panamericana COPANT 462 e brasileira NBR 7190/97, especificam a utilização de corpos-de-prova de geometria cúbica, com dimensões de 5 x 5 x 10 cm e 2 x 3 x 5cm, respectivamente, fabricados com o lado maior da seção transversal paralelo à direção radial, como mostra a Figura 1. Já a norma americana ASTM-D143 especifica para o estudo das retrações radiais e tangenciais a utilização de corpos-de-prova saturados de 2,5 x 10 x 2,5 cm, obtidos de pranchas de 2,5 x 10 cm, orientados conforme a Figura 2.

Mesmo em peças de pequenas dimensões como estas, não se verificam direções estritamente tangenciais ou radiais que, por não serem paralelas aos lados da seção transversal, sofrem influência da curvatura dos anéis de crescimento. Além disso, a tangente varia ao longo dos anéis de crescimento cuja curvatura diminui no sentido da medula para a casca e, assim, os corpos-de-prova obtidos das regiões mais periféricas da tora apresentam maiores proporções de madeira de direção tangencial do que os obtidos das regiões mais internas. Consequentemente,

apresentam maiores valores de retração tangencial. Conclui-se então que a retratibilidade ou inchamento determinado de acordo com as normas supracitadas, é dependente das características geométricas dos corpos-de-prova.

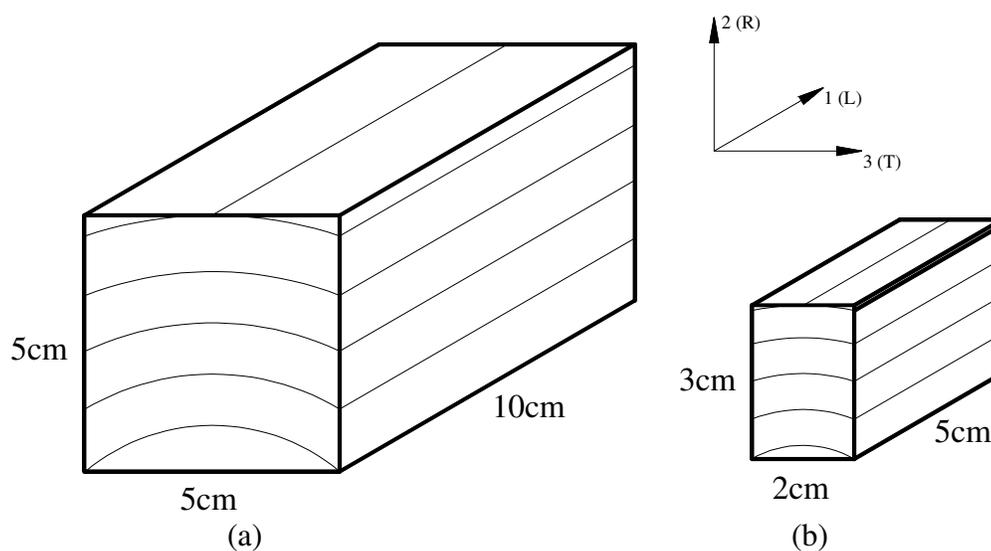


Figura 1 – Corpo-de-prova para determinação das propriedades de retração e inchamento, conforme especificações das normas panamericana COPANT 462 (a) e brasileira NBR 7190/97 (b)

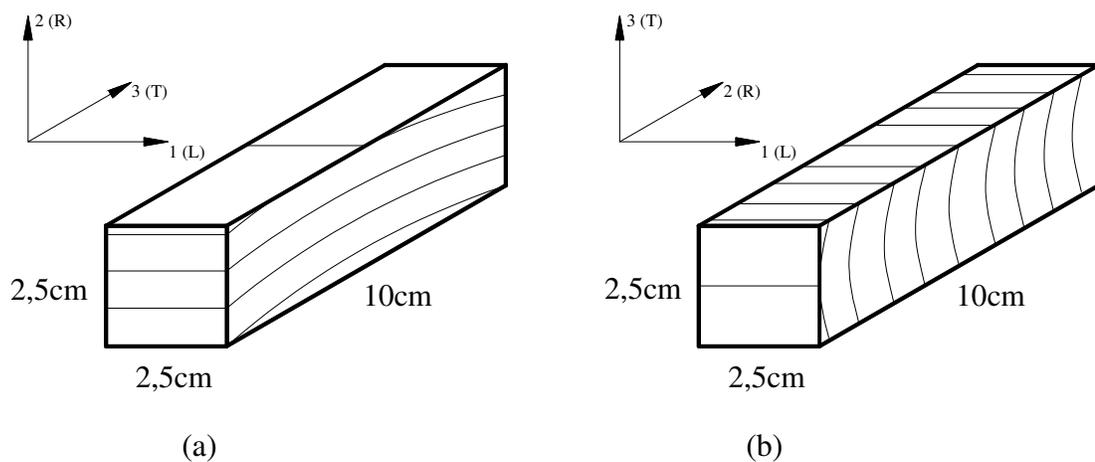


Figura 2 - Corpos-de-prova especificados pela norma americana – ASTM-D143 para o estudo das retrações radial (a) e tangencial (b)

Conforme colocado por Kollmann e Côté (1968) e Giordano (1971), devido às dimensões das peças comerciais não existem, na prática, retrações e/ou inchamentos puros nas direções radial, tangencial ou longitudinal que são as direções principais de elasticidade. Isso deve-se ao

fato de que as peças serradas não apresentam somente esta ou aquela direção, mas sim uma combinação delas nas suas três dimensões. Além disso, o desdobro das toras raramente produz peças essencialmente radiais, tangenciais e/ou longitudinais, sendo mais comum a obtenção de peças orientadas de forma aleatória. Assim, as deformações reais por retração e inchamento nas diferentes direções de corte das peças comerciais corresponderão apenas a uma parcela da deformação pura, além de sofrerem influência das demais direções, bem como dos desvios de grã ao longo da peça. Em relação às peças compostas como no caso de painéis sarrafeados (Figura 3), também não se verifica a utilização de peças homogêneas, orientadas numa única direção de corte, mas sim uma combinação de peças heterogêneas, serradas nas mais diversas direções, de modo que a deformação total do painel resulta do conjunto das deformações de cada uma das peças as quais estão sujeitas às interferências dos fatores supracitados.



Figura 3 – Combinação possível de direções anatômicas dos anéis de crescimento na seção transversal de um painel sarrafeado

Há que se considerar ainda que, na prática, dadas às dimensões das peças comerciais, as deformações por retração e inchamento também nunca ocorrerão na sua totalidade. Segundo Hansen (2005) a madeira retrai somente cerca de 1/30 do seu potencial total. Considerando que a madeira atinge o equilíbrio com o ambiente partindo da superfície para o interior da peça, ocorre que, durante o processo de retração da madeira as camadas mais superficiais voltam a inchar devido ao aumento de umidade do ambiente, enquanto as camadas mais internas ainda não retraíram totalmente. O mesmo acontece para o processo inverso, ou seja, as camadas mais superficiais podem voltar a retrair, pela perda de umidade para o ambiente, enquanto as mais internas ainda não incharam totalmente.

Outro fator, pelo qual pode-se concluir que a madeira não retrai ou incha no total de sua potencialidade, relaciona-se ao intervalo de umidade no qual tais variações acontecem. Conforme os estudos realizados, a variação dimensional só ocorre entre o ponto de saturação das fibras (PSF) e 0%. Da umidade no ponto de saturação das fibras (PSF) à umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), a madeira retrai cerca de 1/2 a 2/3 do total previsto e, caso seja empregada na construção antes disso, os riscos de surgirem problemas relacionados à retratibilidade são

muito grandes (HANSEN, 1987). Considerando-se que, uma vez em equilíbrio com o ambiente, dificilmente ocorrerá uma situação na qual a madeira atinja novamente o PSF ou 0% de umidade (SKAAR, 1972), nunca haverá na madeira em uso, retração ou inchamento no máximo de sua potencialidade. Tais deformações ocorrerão, na prática, somente dentro de um pequeno limite de variação em torno do teor da UEH. Verifica-se assim, que as especificações das normas existentes, para a determinação do grau de estabilidade dimensional da madeira resulta, em alguns casos, em valores muito acima daqueles verificados na prática, inviabilizando muitas vezes o uso de espécies como o eucalipto, por exemplo, considerada uma madeira com altos índices de instabilidade dimensional (*E. citriodora*: 9,6%, *E. maculata*: 9,4% e *E. tereticornis*, 16,7% na direção tangencial, segundo Galvão e Jankowsky, 1985).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

Propor uma alternativa para aprimoramento dos procedimentos de ensaio e da metodologia de medição dos deslocamentos para determinação das deformações específicas por retração das madeiras de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* nas direções radial e tangencial.

### 1.2.2 Específicos

- Contribuir para a revisão do texto da Norma Brasileira NBR 7190/97, da ABNT, no sentido de otimizar os ensaios de variação dimensional, especialmente no que se refere à especificação dos corpos-de-prova e ao método utilizado para a determinação das deformações específicas por retração ou inchamento;
- Estudar a utilização do método da *Thin-plate spline-TPS* na determinação retração( $\epsilon_r$ ) nas direções radial e tangencial da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, *E. urograndis*;

- Estudar a utilização de uma nova geometria de corpo-de-prova na determinação da variação dimensional da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, *E. urograndis*, nas direções radial e tangencial;
- Verificar as relações existentes entre a retração determinados segundo as recomendações da NBR 7190/97 e o método proposto;
- Verificar a(s) relações(s) existente(s) entre e os valores de retração e os valores de teor de umidade natural da árvore da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, *E. urograndis*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Variação dimensional da madeira

A variação dimensional da madeira é um fenômeno caracterizado pelas propriedades de retração e inchamento e está relacionado a uma série de fatores, tais como: a variação do teor de umidade da madeira, a direção estrutural (longitudinal, radial e tangencial), a densidade ou peso específico, a variação da temperatura e o gradiente de secagem. Destaca-se, sobretudo, a variação do teor de umidade como o principal fator responsável pela instabilidade dimensional.

Por ser um material altamente higroscópico a madeira está sujeita a constantes trocas com o ambiente de forma que, conforme perde ou ganha umidade, retrai ou incha causando sérios problemas de funcionamento dos componentes construtivos em geral.

No que se refere à variação da temperatura e ao gradiente de secagem, trata-se de um assunto pouco abordado pelos pesquisadores. Na literatura consultada, foram encontradas referências a estudos desenvolvidos por Setevens apud Kollmann e Cotê (1968), os quais demonstram que a retratibilidade da madeira tende a crescer com o aumento da temperatura, ao mesmo tempo em que decresce com o aumento da taxa de secagem. Contudo, isso ocorre, invariavelmente, devido aos defeitos de secagem, tais como, rachaduras superficiais e internas e colapso da parede celular. Dessa forma, não é a retração que varia, e sim, a precisão de sua medida.

A influência da idade da madeira também tem sido muito pouco abordada, apesar de ser um assunto extremamente importante. Num estudo das relações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira de *pinus caribaea* var. *hondurensis* de oito anos de idade, Rezende; Saglietti e Guerrini (1995) verificaram que as maiores variações de massa específica para uma mesma variedade de pinus ocorrem em função da idade sendo que essa propriedade cresce a uma taxa de 4,1% ao ano. Verificaram também que a retratibilidade nas principais direções estruturais da madeira variam em função da massa específica e, por consequência, são dependentes da idade e da posição radial da amostra.

### 2.1.1 Variação do teor de umidade da madeira

A árvore quando viva contém um determinado teor de água que possibilita o transporte e armazenamento de compostos essenciais à formação de sua estrutura tridimensional, conhecida como umidade natural da madeira (LOPES, 2000 e LOPES e GARCIA, 2002). Para Panshin e Zeeuw (1970), a quantidade de água existente na madeira das árvores vivas, pode atingir o máximo de 2/3 da quantidade correspondente à saturação total. Existem variações de árvore para árvore e dentro de uma mesma árvore como nas coníferas onde a umidade do alburno pode ser superior a 200%, sendo mais úmido do que o cerne. Nas folhosas não parece haver muita diferença entre as partes do lenho. Ainda de acordo com os mesmos autores, o teor total de água na madeira de uma árvore viva parece não variar significativamente nas diferentes épocas do ano, entretanto, a distribuição dessa água dentro do fuste pode sofrer variações entre os meses e as estações.

A madeira começa a perder água imediatamente após a derrubada da árvore, em princípio pela evaporação da chamada água livre ou água de capilaridade, localizada nos vasos, canais e lumes das células, até atingir o ponto de saturação das fibras (PSF), geralmente contido no intervalo de 20 a 30% de umidade. A partir daí, permanece na madeira apenas as moléculas de água localizadas no interior das paredes celulares, que compõem a denominada água de impregnação ou água de adesão (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). A evaporação dessa água se processa de forma mais lenta, até atingir a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), definida por Peña e Peris (2000) como o percentual de umidade que a madeira atingiria ao longo do tempo, submetida às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente. A UEH varia, portanto, em função das condições do ambiente e da espécie considerada.

De acordo com Kollmann e Côté (1968) e Giordano (1971) a perda de água livre não interfere na estabilidade dimensional da madeira. Da mesma forma, Calil Jr.; Lahr e Dias (2003) colocam que o aumento ou diminuição de moléculas de água livre não influi na retração ou inchamento, visto que tais fenômenos se manifestam somente no intervalo entre o PSF e 0% de umidade (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). O surgimento de defeitos internos durante o processo de secagem, influenciado pelo gradiente de secagem da madeira e, principalmente, a secagem mais acelerada das camadas superficiais, podem levá-la a apresentar variações dimensionais antes do PSF.

A retração e o inchamento se caracterizam pela dessorção e adsorção de água pela madeira, respectivamente. Estes fenômenos causam aproximação ou afastamento das cadeias de celulose, bem como diminuição ou aumento dos espaços entre as microfibrilas (CALIL JR.; LAHR e DIAS, 2003). A espessura da parede celular varia, com ela, o diâmetro da célula e, conseqüentemente, as dimensões da madeira. Segundo Skaar (1972) tais alterações são proporcionais ao volume de água que a madeira ganha ou perde. Diversos estudos comprovam que não há uma relação direta entre adsorção e dessorção, ocorrendo um fenômeno de histerese, segundo o qual, sob as mesmas condições de temperatura e umidade, o volume de água adsorvido é sempre inferior ao volume dessorvido (Figura 4). Além disso, a UEH na primeira dessorção é, invariavelmente, maior do que nas dessorções subseqüentes (FPL, 1999).

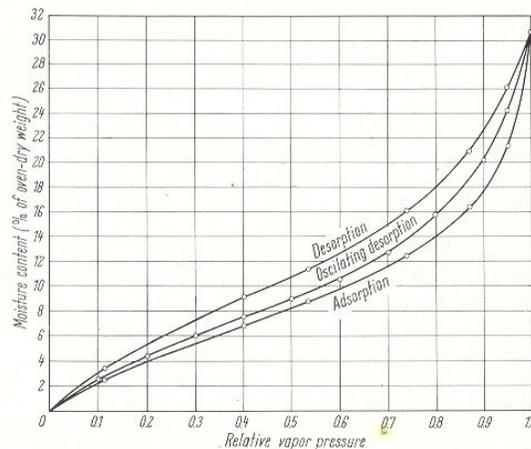


Figura 4 - Histerese adsorção-desorção de spruce a 25°C (fonte: PECK apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1968)

O processo de secagem da madeira consiste, basicamente, na remoção da umidade de sua superfície. Como a água se desloca sempre para pontos ou regiões de menor umidade, ocorre uma movimentação da umidade do interior para a sua superfície. Tecidos mais superficiais secam mais rapidamente do que os mais internos de uma peça de madeira e, portanto, haverá sempre um diferencial de retração entre dois pontos, desde que um deles seja mais externo do que o outro.

A retração que ocorre no tecido superficial quando este está numa umidade inferior à do PSF prejudica a correta determinação desse ponto de transição porque modifica o caráter linear da função que relaciona retração com umidade, conforme mostrado na Figura 5 de Kollman e Côté (1968). As retas tracejadas mostram que a retração se anula na umidade do PSF, mas as curvas cheias, reais, mostram que existem retrações acima desse ponto, influenciadas,

primordialmente pelas diferenças de umidades em pontos distintos no que se refere à distancia do centro da peça de madeira.

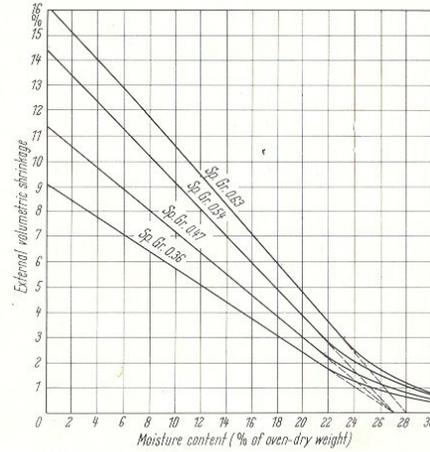


Figura 5 - Retração volumétrica em tábua de 7/8" de espessura (Fonte: PECK apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1968)

Skaar (1972) ressalta que a madeira em uso nunca estará sujeita às mudanças extremas de umidade, ou seja, do PSF a 0% de umidade de modo que não apresentará mudanças extremas em suas dimensões. Por esse motivo, surgem então, questões relacionadas ao real grau de variação dimensional que ocorre na madeira durante o uso, sujeita às flutuações de umidade propiciada pelo ambiente em que está exposta.

### 2.1.2 Anisotropia da retratibilidade e do inchamento da madeira

As deformações lineares específicas por reatragão e inchamento da madeira são dadas como um percentual de variação em relação à dimensão inicial, de modo que a reatragão é calculada em relação às dimensões verdes e o inchamento em relação às dimensões secas, conforme as Equações (1) e (2) (ABNT, 1997).

$$\varepsilon_r = \frac{L_{sat} - L_{seca}}{L_{sat}} \times 100 \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{L_{sat} - L_{seca}}{L_{seca}} \times 100 \quad (2)$$

As deformações volumétricas, por sua vez, podem ser calculadas a partir dos volumes dos corpos-de-prova, saturados e secos em estufa (Equações 3 e 4), podendo também ser estimadas diretamente dos valores das deformações transversais e longitudinais.

$$\varepsilon_{rv} = \frac{V_{sat} - V_{seco}}{V_{sat}} \times 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{iv} = \frac{V_{sat} - V_{seco}}{V_{seco}} \times 100 \quad (4)$$

Skaar (1972) coloca que, as deformações volumétricas por si mesmas não são suficientes para caracterizar o fenômeno da instabilidade dimensional. Assim como outras propriedades, a retração e o inchamento também possuem característica anisotrópica, isto é, ocorrem de forma diversa nas três direções principais de elasticidade (tangencial, radial e longitudinal), sendo que as maiores deformações ocorrem na direção tangencial aos anéis de crescimento da madeira, podendo variar de 3,5 a 15% em relação à dimensão da madeira verde. Kollmann e Côté (1968) afirmam que a retração na direção radial é relativamente menor e variam de 2,4 a 11%. Já na direção longitudinal estes valores, quase sempre, podem ser considerados desprezíveis, pois variam de 0,1 a 0,9%. Diversas razões são apontadas por alguns autores como sendo a causa de tais diferenças. Verifica-se um senso comum de que as principais delas residem, basicamente, na estrutura da parede celular (Figura 6).

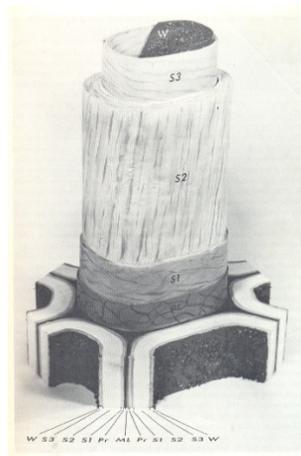


Figura 6 – Modelo de uma célula de conífera, mostrando a organização das microfibrilas nas três camadas que compõem a parede celular (fonte: Panshin e Zeew, 1970)

Segundo Skaar (1972), quando a madeira absorve umidade dentro da parede celular a mesma incha volumetricamente proporcional ao volume de água adsorvido. Este inchamento está relacionado também às variações dimensionais que ocorrem nos espaços vazios ou nas cavidades celulares, de modo que existem três possibilidades: o tamanho do lume pode diminuir, aumentar ou se manter constante, como é mais comum. O autor explica que tal fato provavelmente está relacionado à orientação das fibrilas nas três camadas da parede secundária da célula da madeira. A camada S2 sendo mais espessa faz com que haja uma predominância de fibrilas quase paralelas ao eixo longitudinal das células e que tendem a inchar transversalmente. As camadas externa (S1) e interna (S3), por sua vez, possuem as fibrilas quase perpendiculares ao eixo longitudinal da célula atuando na contenção das variações dimensionais para o interior e/ou exterior da célula o que, em síntese, configura um confinamento da variação transversal.

Kollmann e Côté (1968) também apontam que o arranjo das fibrilas nas direções tangencial e radial das paredes celulares pode explicar as diferenças entre as retrações tangencial e radial da madeira. Exemplificam tal fato a partir das paredes das células radiais das coníferas onde, segundo os autores existem cerca de 50 a 300 pontuações em torno das quais as fibrilas desviam do seu curso normal.

Kollmann e Côté (1968) creditam à orientação das micelas, fibrilas e fibras uma das causas da anisotropia das propriedades da madeira. Acrescentam ainda que, resumidamente, isso pode indicar que tais diferenças estão relacionadas à alternância do incremento de lenho tardio e primaveril entre os anéis de crescimento, à influência da compressão radial da madeira, às características da estrutura das paredes celulares e às mudanças dos ângulos das fibras, bem como aos vazios e à composição química da lamela média.

Para as variações dimensionais para o interior e/ou exterior da célula, os mesmos autores colocam que não somente a estrutura das paredes explica anisotropia transversal, como também a heterogeneidade do que definem como “tecidos mais grosseiros da madeira” constituídos por traqueídeos, fibras, vasos com diâmetros variados, células parenquimáticas e raios do lenho primaveril e lenho tardio.

Giordano (1971) relaciona uma série de fatores, os quais podem ser total ou parcialmente responsáveis pela anisotropia da retração e inchamento da madeira. São eles:

- 1) Diferença entre os ângulos fibrilares nas paredes tangenciais e radiais;
- 2) Diferença no conteúdo de lignina nas paredes tangenciais e radiais;
- 3) Maior influência do comportamento da lamela média sobre o comportamento da parede secundária;
- 4) Consideração do lenho como um complexo laminar, no qual:
  - a. Os raios podem influir seja sobre a retração como sobre a elasticidade;
  - b. Os lenhos tardio e juvenil, cujas retrações diferem-se entre si, podem sofrer influência mútua,
- 5) Relação existente no plano transversal entre a anisotropia da retração e inchamento, devido:
  - a. À distribuição espacial da substância que constitui a parede e a cavidade celular;
  - b. A outras causas concorrentes à anisotropia supracitada.

Especialmente em relação à anisotropia no sentido transversal, existem diversas teorias que tentam explicá-la e que foram agrupadas por Pentoney apud Skaar (1972) em três grupos: as que se baseiam na estrutura anatômica da madeira, segundo as quais a retratibilidade é influenciada pelos tecidos radiais, como também pela interação entre os lenhos tardio e primaveril; as que se baseiam no alinhamento das fibrilas e micro fibrilas, e aquelas baseadas nas variações das camadas da parede celular, já explicadas anteriormente.

O que parece ser consenso entre todos os autores e teorias é o fato de que, dada a complexidade das estruturas encontradas na madeira, não existe um fator que seja, isoladamente, responsável pela anisotropia da retratibilidade e do inchamento na madeira. É provável que o mecanismo de maior influência varie conforme a espécie analisada bem como de acordo com outros mecanismos que possam alterá-lo.

### **2.1.3 Variação dimensional x densidade da madeira**

A alta higroscopicidade da madeira faz com que esta ofereça grandes problemas na determinação de sua densidade, visto que sua massa e volume variam em função da variação do seu teor de umidade. Na prática, podem-se utilizar três maneiras diferentes para expressar a

densidade da madeira: densidade aparente, na qual a massa e o volume são determinados sob a mesma condição de umidade; densidade a 0% de umidade e densidade básica, que é obtida a partir da relação entre a massa seca ( $u = 0\%$ ) e o volume saturado em água (REZENDE; ESCOBEDO e FERRAZ, 1988). Tal fato indica a existência de relações entre a densidade e a variação dimensional da madeira.

Estudos desenvolvidos por Newlin apud Kolmann e Côté (1968) demonstram que a retratibilidade volumétrica total é diretamente proporcional à densidade básica e pode ser dada pela equação  $R_v = 28\rho_b$ . Nesse sentido, Kolmann e Côté (1968) apontam a densidade da madeira como outro fator responsável pela anisotropia da retratibilidade e do inchamento. De acordo com os autores, quanto mais densa a madeira, maior sua variação volumétrica, o que acaba interferindo especialmente nas retratibilidades tangencial e radial, visto que a madeira de lenho primaveril é menos densa do que a madeira de lenho tardio.

Rezende (2003) estudou a retratibilidade da madeira de *Pinus caribaea var. hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade e concluiu que a retratibilidade volumétrica de ambas as espécies variou conforme uma equação exponencial do tipo:  $R_v = R_{vmax} e^{-ku}$ . Verificou ainda que a retratibilidade tangencial foi 1,3 vezes maior do que a radial e 9,0 vezes maior do que a axial. O autor coloca também que as retratibilidades volumétricas máximas podem ser consideradas exclusivamente dependentes da densidade básica ou da densidade a 0%. Stamm e Greenhill apud Galvão e Jankowsky (1985) já haviam verificado experimentalmente uma correlação entre a variação volumétrica e a densidade básica da madeira, na qual observaram que tal relação é numericamente igual à umidade de saturação ao ar (USA) (Equação 5).

$$\frac{R_v}{D_b} = USA \quad (5)$$

Considerando o valor médio de 28% encontrado para a umidade de saturação ao ar (NEWLIN apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1968), e conhecendo-se a densidade básica, é possível, a partir da equação (6) estimar-se a retração volumétrica total de qualquer tipo de madeira. Eventuais desvios nessa relação, Galvão e Jankowsy (1985) atribuem à presença de extrativos ou a um alto percentual de lignina.

#### 2.1.4 Defeitos relacionados à variação dimensional da madeira

A maior parte dos defeitos de secagem da madeira está relacionada à sua retratibilidade bem como às tensões internas que a acompanham e devem-se, principalmente, à sua característica anisotrópica. As diferenças de variação dimensional entre os lenhos tardio e primaveril contribuem para alguns dos principais defeitos de secagem da madeira (KOLLMANN E CÔTÉ, 1968), dentre os quais destacam-se:

- 1) Fissuras superficiais e de topo, causadas pelas tensões entre as fibras da madeira, devida à perda mais rápida de umidade na superfície, de modo que as células aí localizadas começam a retrair mais cedo do que as mais internas;
- 2) Distorções de forma tais como, arqueamento, torção, encurvamento e encanoamento, causadas pelas retrações diferenciadas nas direções radial, tangencial e longitudinal, e/ou pelo gradiente de retração que existe ao longo do raio, de maneira que é possível prever se a madeira vai retrair, empenar e/ou distorcer, simplesmente observando a orientação dos anéis de crescimento;
- 3) Colapso: ocorre geralmente quando altas temperaturas são empregadas no início da secagem, de forma que a madeira torna-se um tanto quanto plástica, favorecendo a aproximação das paredes opostas da célula descolando-as das adjacentes, devido à tensão capilar.

A superposição de efeitos da retração radial e tangencial na secagem causa distorções nas peças retangulares, quadradas e circulares obtidas da tora, conforme mostra a Figura 7. As diferentes direções presentes numa mesma peça fazem com que não haja, na prática, retrações puras nas direções das arestas da seção transversal. Segundo Kollmann e Côté (1968) e Giordano (1971) geralmente as bordas das seções se curvam proporcionalmente ao desvio da principal direção.

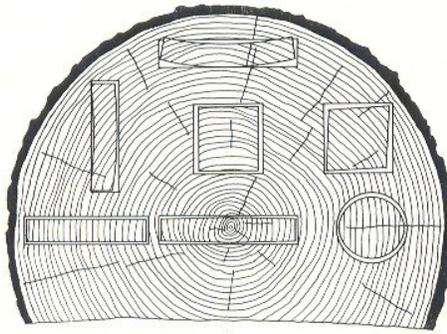


Figura 7 - Retração e distorções características em peças de seção retangular, quadrada e circular, devidas às diferentes direções dos anéis de crescimento e diferentes distâncias da medula (fonte: FPL, 1999)

Giordano (1971) aponta algumas conseqüências práticas das variações dimensionais. No caso das madeiras roliças, as principais são: as rachaduras longitudinal-radiais de grande profundidade e que são vistas no topo em forma de “pé de galinha” ou “V” com os vértices centrados na medula e as fissuras longitudinal-radiais de pequena profundidade que afetam apenas a superfície externa do tronco. Na madeira serrada, destacam-se: os empenamentos das tabuas, a redução das dimensões, o aparecimento de fissuras superficiais, o surgimento de tensões internas não aparentes, fissurações alveolares internas e, até mesmo, o colapso da parede celular. Tais conseqüências causam prejuízos estéticos e econômicos à indústria de produtos de madeira.

As alternativas correntes para controlar os efeitos da variação dimensional da madeira compreendem métodos essencialmente mecânicos, como a superposição de camadas finas orientadas ortogonalmente entre si (chapas compensadas) e métodos químicos impermeabilizantes, como o uso de vernizes e ceras, além de soluções ou emulsões hidrorrepelentes ou hidrofugantes.

Giordano (1971) comenta que pesquisas desenvolvidas sobre o emprego de estratégias de confinamento, não forneceram dados suficientes para a compreensão do que realmente ocorre nas peças de madeira cuja variação dimensional é limitada por forças autogeradas e auto-equilibrantes opostas ao inchamento.

### 2.1.5 Medição da variação dimensional da madeira

Para o estudo da retração e do inchamento da madeira, a Norma Brasileira especifica que os valores de deslocamento por retração ou inchamento sejam obtidos em corpos-de-prova prismáticos, conforme apresentado na Figura 1 e que as distâncias entre os lados dos corpos-de-prova devem ser determinadas com pelo menos três medidas em cada lado, com precisão de 0,01mm. Ao não especificar os pontos e os instantes exatos em que as medidas devem ser tomadas, nem tampouco os instrumentos que devem ser utilizados, o texto da norma permite que diferentes interpretações interfiram nos resultados dos ensaios.

A respeito dos instrumentos de medição, o mais comum é a utilização de um paquímetro ou um micrômetro, que pode ser analógico ou digital. Porém, o tratamento e análise dos dados obtidos, utilizando técnicas convencionais de medição como essas são particularmente complexas, uma vez que a medição exige contato do instrumento com a superfície do corpo-de-prova em estudo.

A utilização de instrumentos de medição de contato deve estar submetida a um princípio conhecido como princípio de *Abbe* que diz que “a parte onde se deseja medir o comprimento e a escala padrão (extremidade móvel do paquímetro ou do micrômetro) devem estar alinhadas” (CAVACO, 2002). Caso contrário, à dimensão obtida terá sido acrescentado um erro devido à movimentação angular do instrumento utilizado e que pode ser classificado em:

a) **Erro de primeira ordem:** o eixo de medição não está alinhado com o eixo da escala onde é realizada a leitura, como no caso do paquímetro. Mesmo que o trecho a medir se encontre paralelo à escala, pode ocorrer um erro em função da distância entre a escala do instrumento e o ponto de contato com o objeto como mostra a Figura 8.

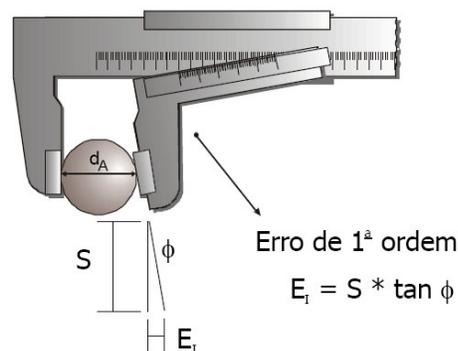


Figura 8 - Erro de 1ª ordem: eixo de medição não alinhado com eixo da escala (fonte:CAVACO, 2002)

b) **Erro de segunda ordem:** no caso de instrumentos como o micrômetro, por exemplo, mesmo que os eixos de medição e da escala estejam alinhados, é preciso ter cuidado com o alinhamento das extremidades fixa e móvel pelas quais o instrumento toca o objeto a ser medido (Figura 9):

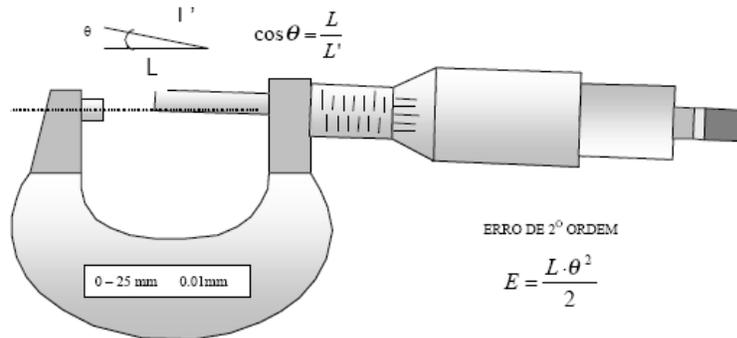


Figura 9 - Erro de 2ª ordem: as extremidades de contato não estão alinhadas (fonte: CAVACO, 2002)

Em sistemas de medição de contato nos quais o instrumento de medição toca o objeto a ser medido pontualmente, especialmente no caso dos deslocamentos por retração e inchamento da madeira, em que as variações são muito pequenas e nos quais o corpo-de-prova pode apresentar uma série de deformações advindas do processo de secagem, torna-se difícil identificar o exato ponto de contato da medida anterior.

Torna-se imprescindível, portanto, o desenvolvimento de um processo alternativo que aumente o grau de precisão e a exatidão das medições dos deslocamentos por retração e inchamento da madeira e que elimine o contato direto com o objeto a ser medido. Nesse caso, os sistemas de medição que utilizam processos ópticos digitais, bem como ferramentas de processamento e análise digital de imagens, podem ser bastante viáveis, uma vez que eliminam o contato entre o instrumento de medição e o objeto a ser medido. Reduzindo-se a probabilidade de erros devido ao processo de obtenção dos dados, aumenta-se o grau de confiabilidade dos resultados.

## 2.2 Processamento e análise digital de imagens

O processamento e análise de imagens compreendem técnicas manuais ou digitais usadas para melhorar a geometria e a aparência, identificar as características e extrair informações de

uma imagem. Com a evolução digital que ocorreu nas últimas décadas as técnicas manuais foram gradativamente substituídas por tecnologias digitais, nas mais diversas áreas, sendo usadas por muitos setores para retificar geometricamente imagens, preparar contraste, fazer mapas temáticos e outros (ROBINSON et al, 1995).

Segundo Schenk (1999) o processamento digital de imagens concentra-se em como adquirir, transmitir, processar e representar imagens. Para Costa e César Jr. (2001) o processamento digital de imagens envolve uma série de operações realizadas na imagem original buscando a redução de distorções inesperadas e informações secundárias da imagem enfatizando as informações mais relevantes.

O processamento digital de imagens pode ser dividido nos seguintes passos (SCHENK, 1999):

- Aquisição: busca adquirir a imagem por meio do uso de câmeras digitais (método direto) ou por digitalização de imagens, através de fotografias ou escaneamento (método indireto);
- Armazenamento e compilação de dados: refere-se às técnicas de armazenamento das fotos que requerem grandes capacidades de armazenamento. Está relacionado ao tamanho da imagem, bem como à sua resolução, em número de pixels<sup>1</sup>;
- Melhoria e Restauração: são usadas e estudadas diversas técnicas para realizar a melhoria da qualidade das imagens, bem como realizar a restauração de imagens degradadas;
- Segmentação: trata-se da subdivisão da imagem em partes mais significativas;
- Visualização: busca-se o conhecimento em como realizar a melhor apresentação das imagens usando os diversos meios, incluindo telas e monitores, impressoras, papel.

Já a análise de imagens é o processo de medição quantitativa de um determinado aspecto da imagem com a finalidade de gerar uma descrição desta, na análise o resultado será sempre um gráfico ou um valor referente à propriedade da imagem a que se deseja estimar (Antunes, 1999).

As técnicas de processamento e análise digital de imagens são utilizadas nas mais diversas áreas para diferentes finalidades. Costa (2006) cita como exemplos o controle da qualidade de frutos, inspeção e classificação de topografias de objetos em geral e deformações em peças

---

<sup>1</sup> Do inglês: *picture element*. Corresponde à menor parte de uma imagem digital.

ativas, determinação de alterações ou defeitos em peças mecânicas oriundas do processo de fabricação ou desgaste natural, o controle de qualidade de operações de preparo do solo, com base na determinação do micro-relevo ou rugosidade superficial antes e após o tratamento e a determinação de áreas de aves entre outros animais.

Destaca-se ainda que o processamento e a análise digital de imagens são procedimentos de medição não contactantes e, quase sempre, menos oneroso em razão do menor dispêndio de tempo e de recursos financeiros e processos. O processamento digital de imagens é usado para aperfeiçoar processos, reduzir custos e aumentar a produtividade (COSTA, 2006 e SILVA et al, 2005).

### **2.2.1 Processamento e análise digital de imagens aplicados ao estudo da madeira**

A utilização dos métodos de processamento e análise digital de imagens ainda é um assunto recente e um recurso pouco utilizado no campo de estudo das propriedades da madeira, sendo mais freqüentemente encontrado no estudo de suas propriedades anatômicas. Yanosky e Robinove (1986) foram, segundo Rosot et al (2003), os primeiros pesquisadores a efetuarem medições de área e estruturas anatômicas de anéis de crescimento usando programas de processamento e análise digital de imagens de satélites.

Neste sentido, Rosot et al (2003) desenvolveram um método digital para medição de anéis de crescimento na análise de tronco usando técnicas fotográficas associadas ao processamento de imagens e sistemas de informações geográficas (SIG). 30 fatias de *Pinus elliottii* Engelm, de 17 anos de idade, foram fotografadas com uma câmera digital CCD de 4.1MP, logo após a obtenção, ainda na floresta. Foram utilizados os programas *Adobe Photoshop* e *Microsoft PhotoEditor* para processamento das imagens com o objetivo de realçar as características de cor, brilho, contraste e intensidade e, assim, facilitar a identificação dos anéis de crescimento. Os dados de área e raio médio dos anéis de crescimento, necessários para os cálculos de altura total, volume da seção e volume total por idade, foram obtidos a partir do programa *ArcView*, após vetorização dos limites dos anéis de crescimento. Os resultados foram comparados aos resultados obtidos através do método convencional e, exceto no cálculo do volume por idade em que a análise digital retornou valores maiores devido à condição verde das amostras fotografadas, os parâmetros calculados para cada idade não apresentaram diferenças significativas. A principal vantagem do método

digital, destacadas pelos autores foi a eliminação das etapas de transporte das amostras até o laboratório, secagem e polimento.

Schaitza et al (2003), pesquisadores do Laboratório de Qualidade da Madeira da Embrapa Florestas, em Colombo, PR, utilizaram técnicas de análise digital de imagens para medição de áreas transversais em corpos-de-prova e comprimento de fibras, feitas em laboratório, e de rachaduras em topos de toras e danos causados por doenças em folhas e troncos de árvores, no campo.

As áreas transversais, rachaduras e danos causados por doenças, foram medidos utilizando-se o programa para análise de raízes e cobertura do solo, *SIARCS*, desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária da Embrapa. A medição por esse programa é feita a partir de uma escala de referência e da seleção de pontos de mesma cor. A precisão do método foi comprovada a partir da digitalização de 30 pedaços irregulares de papel, cujas áreas eram conhecidas. Numa análise de regressão simples verificou-se que o método era equivalente a 0,999 da medição convencional. Nas medições de rachaduras de topo de tora, o programa apresentou vantagens em relação aos métodos de notas e índices utilizados usualmente, uma vez que foi possível medir o comprimento total de rachaduras e da área das rachaduras em relação à área do tronco, evitando-se a subjetividade presente nos métodos tradicionais.

Para a medição do comprimento de fibras foi utilizado um microscópio com câmera clara, um computador, uma mesa digitalizadora e um programa para medições. Na medida em que as fibras são desenhadas acompanhando-se o seu percurso com o cursor do mouse ou com a ponta da caneta, os comprimentos são obtidos automaticamente pelo programa, em função de uma escala previamente definida. As vantagens desse método em relação ao convencional residem, segundo os autores, na possibilidade de medição de fibras irregulares e no aumento da precisão das medições quando comparadas com as medições feitas a partir da escala do microscópio. Os autores sugerem a utilização do programa *Image Tools*, desenvolvido pela Universidade do Texas, por ser de interface mais amigável do que o *SIARCS*.

Macedo et al (1998), também utilizaram o *SIARCS* como ferramenta em estudos de rachaduras de toras e tábuas, medições de elementos anatômicos da madeira e avaliação da densidade e movimentação da água na madeira por meio de imagens tomográficas e de raio-x. A

diferença desse trabalho para o trabalho de Schaitza et al (2003) é que nesse, as análises foram feitas sobre imagens binárias.

Soille e Misson (2001) desenvolveram um algoritmo para detecção automática de anéis de crescimento em imagens em escala de cinza, de cinco amostras de *Picea abies* de 50 anos de idade. As imagens foram obtidas pela digitalização das amostras em um scanner com resolução de 600dpi. Os autores relatam algumas dificuldades encontradas, especialmente em relação à baixa intensidade de contraste das imagens, existência de nós, e anéis pouco espessos, dentre outros. Ressaltam que ajustes devem ser feitos para o estudo de outras espécies.

Em relação ao estudo das propriedades físicas e mecânicas, na literatura consultada, além dos estudos sobre rachaduras de tora e de pranchas e densidade supracitados, foram encontrados poucos trabalhos, dentre os quais se inclui o estudo de Abrahão et al (2003) que testaram o desempenho de dois tipos de algoritmos de limiarização automática na quantificação de falhas na madeira em ensaios de adesão de juntas coladas, utilizando imagens adquiridas em digitalizadores de mesa. Os autores concluíram que os métodos propostos podem substituir o método convencional das quadrículas, preconizados pela norma americana ASTM D5266-99, visto que os algoritmos testados apresentaram erro médio absoluto menor que 3% em relação ao sistema convencional.

Destaca-se também o estudo de Silva & Trugilho (2003) que analisaram o comportamento dimensional (retrações lineares, seccional e volumétrica) de cerne e alburno da madeira de jatobá (*Hymenae courbaril*) submetida a pirólise, com temperaturas finais de 200°, 300°, 400°, 500°, 600°, 700°, 800°, e 900°C. A análise das imagens foi feita utilizando-se um sistema composto por um analisador de imagens denominado *Micro-Videomat* da *Zeiss*, equipado com uma vídeo câmera em preto e branco, dotada de uma objetiva macro 1:3,5/28mm com tubos de extensão. A análise das imagens foi feita por dupla exposição das amostras, sendo uma à temperatura ambiente e a outra após a exposição à temperatura final. As medidas lineares dos corpos de prova, que permitiram o cálculo dos demais parâmetros estudados, foram obtidas diretamente da tela do analisador de imagens. Os autores concluíram que o método utilizado foi eficiente e funcional.

### 2.2.2 Thin-plate spline - TPS

Segundo Costa e Cesar Jr. (2001) o conceito de *thin-plate spline* (TPS) foi utilizado inicialmente para análise de formas planas por F. L. Bookstein, pesquisador da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos. A definição recorrente na literatura é a de que uma TPS é compreendida como uma placa fina de metal de proporções lineares infinitas na qual pontos de carga provocam deformações. A formulação das funções que modelam a superfície interpolante assegura as restrições de que essa superfície apresenta mínima energia de deformação ( $E$ ) em relação aos pontos de carga impostos, originando variações localizadas mínimas dos elementos de uma grelha relativamente aos seus elementos vizinhos (Bookstein, 1989).

Segundo Bookstein (1989) as TPS's são formadas pela combinação linear de funções radiais. Isso significa que os valores da função são obtidos pela diferença (ou distância) entre as coordenadas dos pontos onde a função deve ser avaliada e dos pontos de referência. Na medida em que se afasta dos pontos de carga, a função apresenta um comportamento quase linear de forma que os efeitos das distorções locais que afetam toda a imagem tendem a diminuir conforme aumenta a distância do ponto de influência da deformação (CASTANHO E TOZI, 1996). Métodos globais, baseados em ajustes por mínimos quadrados, propagam o efeito das distorções locais por toda a imagem. Com a função TPS, os efeitos das distorções locais afetam toda a imagem, porém diminuem à medida que se afasta do ponto de influência da deformação. (CASTANHO E TOZI, 1996)

O conceito de TPS pode ser aplicado ao estudo de variações morfométricas de formas planas, através da interpolação entre pares de TPS (COSTA E CÉSAR JR, 2001). Neste tipo de estudo, as formas são analisadas a partir da utilização de marcos anatômicos (*landmarks*), pontos nos quais as estruturas são amostradas e que permitem verificar as variações de forma entre as mesmas estruturas e em exemplares diferentes (RODRIGUES E SANTOS, s.d). Esses marcos, também chamados pontos de controle, possibilitam o mapeamento da superfície estudada e a geração de um plano reticulado. A interpolação entre os pares de TPS, dada pela homologia entre os pontos, transforma o retículo ortogonal (Figura 10a) correspondente à imagem original, no retículo deformado (Figura 10b).

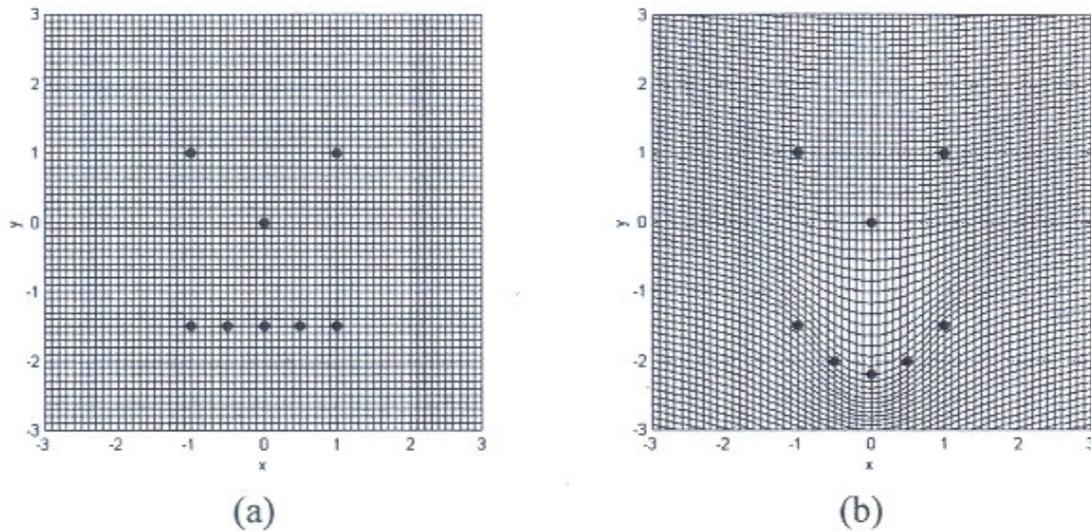


Figura 10 - Retículo original (a) e retículo transformado (b) resultante da interpolação entre os pares de TPS (Fonte: Costa e César Jr, 2001)

Embora ainda inédita no campo do estudo da madeira, a função TPS é amplamente utilizada em análises morfométricas para o estudo de estruturas biológicas.

Cadrin e Silva (2005) utilizaram a função TPS para estudar a variação morfométrica entre machos e fêmeas de peixes da espécie *Limanda ferruginea*, coletados em 8 diferentes pontos na costa atlântica entre o nordeste dos Estados Unidos e o Canadá. A partir da análise de imagens, foram medidas as variáveis morfométricas das amostras e a acurácia dessa medição foi verificada comparando-se três parâmetros específicos, previamente determinados, medidos manualmente em cada amostra. Para a análise morfométrica foram utilizados 12 pontos anatômicos, cujas coordenadas foram digitalizadas utilizando-se o programa *tpsDig*, desenvolvido por Rohlf, 1998, enquanto que as variações de forma foram analisadas através do programa *Thin-plate spline*, desenvolvido por Rohlf (1997).

Foram encontradas diferenças relativas entre machos e fêmeas, as quais possuem o abdômem mais profundo e a cabeça maior do que os machos. Também foram encontradas diferenças morfométricas entre os peixes coletados nos Estados Unidos e os peixes coletados no Canadá, porém essas diferenças não foram grandes o suficiente para delinear estoques geográficos.

Da mesma forma, Gomes Jr. (2006) estudou a variação morfológica entre peixes da espécie *Poecilia vivípara*, coletados em lagoas da região Norte Fluminense. Foram fotografados de 40 a 60 espécimes de cada sexo em cada população, nos quais identificaram-se 13 marcos anatômicos. As diferenças de tamanho corporal entre as populações foram verificadas por uma medida de tamanho geométrico e a quantificação de forma corporal foi realizada através da análise de deformações e da função TPS. Os resultados indicaram diferenças de formas entre populações e entre gêneros.

Di Mare e Corseuil (2004) também utilizaram a função TPS no estudo das variações morfológicas nas asas anteriores de 520 borboletas pertencentes a 11 espécies de *Papilioninae*. Os parâmetros estudados foram: área das asas e comprimento e largura da célula discal. A digitalização dos marcos anatômicos utilizados na análise, foi feita através do programa TPSDIG32. As configurações de consenso<sup>2</sup> de cada espécie foram computadas a partir das coordenadas originais de cada amostra, através do método de superposição ortogonal pelos mínimos quadrados. As deformações relativas foram analisadas através dos programas *TPSSPLIN* versão 1.17 e *TPSPLS* versão 1.05, desenvolvidos por Rohlf (1998). As imagens obtidas com esses programas permitiram visualizar a direção e magnitude das diferenças de forma. Os autores não encontraram diferenças significativas entre as espécies estudadas.

Chang et al (2002) descreveram dois casos de mal oclusão de classe III, em pacientes com e sem tratamento ortodôntico. Os autores utilizaram a função TPS para visualizar, em radiografias cefalométricas laterais, as transformações das mandíbulas. Em ambos os casos, as radiografias foram obtidas no início e no final do período analisado, 2,5 anos em média e submetidas à análise TPS, para a qual utilizaram 12 pontos de homologia (*landmarks*). As imagens inicial e final de cada caso foram ajustadas uma em relação à outra, seguindo-se a análise de Procrustes, pela qual as coordenadas de cada ponto foram transladadas, rotacionadas e escaladas iterativamente até que as distâncias entre os pontos fossem as mínimas possíveis (método dos mínimos quadrados). Segundo os autores, no momento da pesquisa, as transformações ocorridas nas mandíbulas não eram detectáveis pelos métodos cefalométricos convencionais e a utilização da função TPS, cujo algoritmo foi desenvolvido no ambiente MATLAB, possibilitou a visualização.

---

<sup>2</sup> Tamanho médio de cada conjunto de formas, utilizadas como parâmetro de comparação para estudo de variação morfológica.

Franchi et al (2007) também estudaram o desenvolvimento craniofacial de pacientes com mal oclusão classe II, comparando-os com pacientes com oclusão normal, entre as idades pré e pós-pubertária, analisando cefalogramas laterais através da função TPS.

Não obstante a diversidade de aplicações, até o presente momento, não foram encontrados na literatura, tanto nacional como internacional, trabalhos que utilizem a função TPS para o estudo das variações das propriedades físicas e mecânicas da madeira, nem tampouco de sua anatomia, onde é mais comum a utilização da análise digital de imagens.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

As árvores utilizadas na pesquisa foram coletadas em populações experimentais pertencentes à Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, SP, sendo um talhão de *Eucalyptus urophylla*, de 9 anos de idade, um talhão de *E. saligna*, e outro de *E. urograndis*, ambos com 11 anos de idade. A Estação Experimental está localizada a 22°20'S e 48°10'W. O solo do local é classificado como latossolos e neossolos quartzarenicos e o clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Koeppen.

Foram tomadas, aleatoriamente, 10 árvores de cada talhão, perfazendo um total de 30 árvores. Após a derrubada, os fustes foram seccionados a 0,30m; a 3,30; a 3,60 e a 6,60m da base, produzindo-se duas toras que foram denominadas de basal e adjacente superior, e dois toretes de 30cm de comprimento, sendo um da base da árvore e outro da região entre toras, conforme esquema da Figura 11.

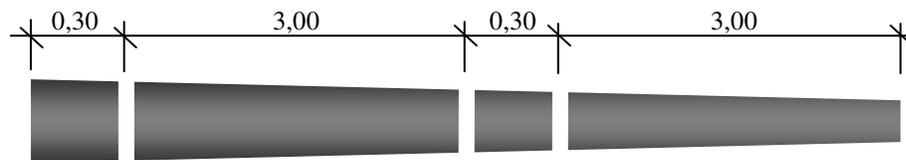


Figura 11 – Esquema de obtenção dos toretes

Os toretes foram identificados segundo a espécie (1,2,ou3), a árvore (1 a 10) e a posição no fuste (a ou b) e, em seguida, acondicionados em sacos plásticos para retardar a perda de umidade durante o transporte até o Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira – LEM, em Piracicaba, SP. As toras remanescentes foram identificadas segundo a espécie (1, 2 ou 3) e também transportadas para o LEM para posterior utilização em outros experimentos.

Para possibilitar uma amostragem independente com cinco repetições, foram tomados os toretes da base de cinco das dez árvores de cada talhão e os toretes da região superior das outras cinco árvores. De cada torete foram retirados dois discos de 3,0cm de espessura, sendo um para estudo da umidade natural da madeira e outro para estudo das deformações por retração (Figura 12a e b). Tal estudo foi efetuado em dois tipos de corpos de prova: um em forma de cunha, proposto, e outro conforme as especificações da NBR 7190/97. Foi traçada uma reta passando pela medula, na direção do diâmetro que continha a maior excentricidade. Com auxílio de um

esquadro, traçou-se outra reta, de maneira a formar um ângulo de  $45^\circ$  com a primeira, com vértice na medula conforme esquema da Figura 12c, originando-se o corpo-de-prova proposto em forma de cunha. Já os corpos-de-prova especificados pela NBR 7190/97 foram obtidos da parte remanescente do mesmo disco, tendo sido produzidas três unidades, tomando-se o cuidado de posicioná-los em diferentes porções no sentido radial, e o mais adjacente possível do corpo-de-prova em forma de cunha conforme ilustra a Figura 12c. Em seguida, sorteou-se um dos corpos-de-prova da NBR para as avaliações das variações de massa e de dimensões que ocorrem por perda de umidade.

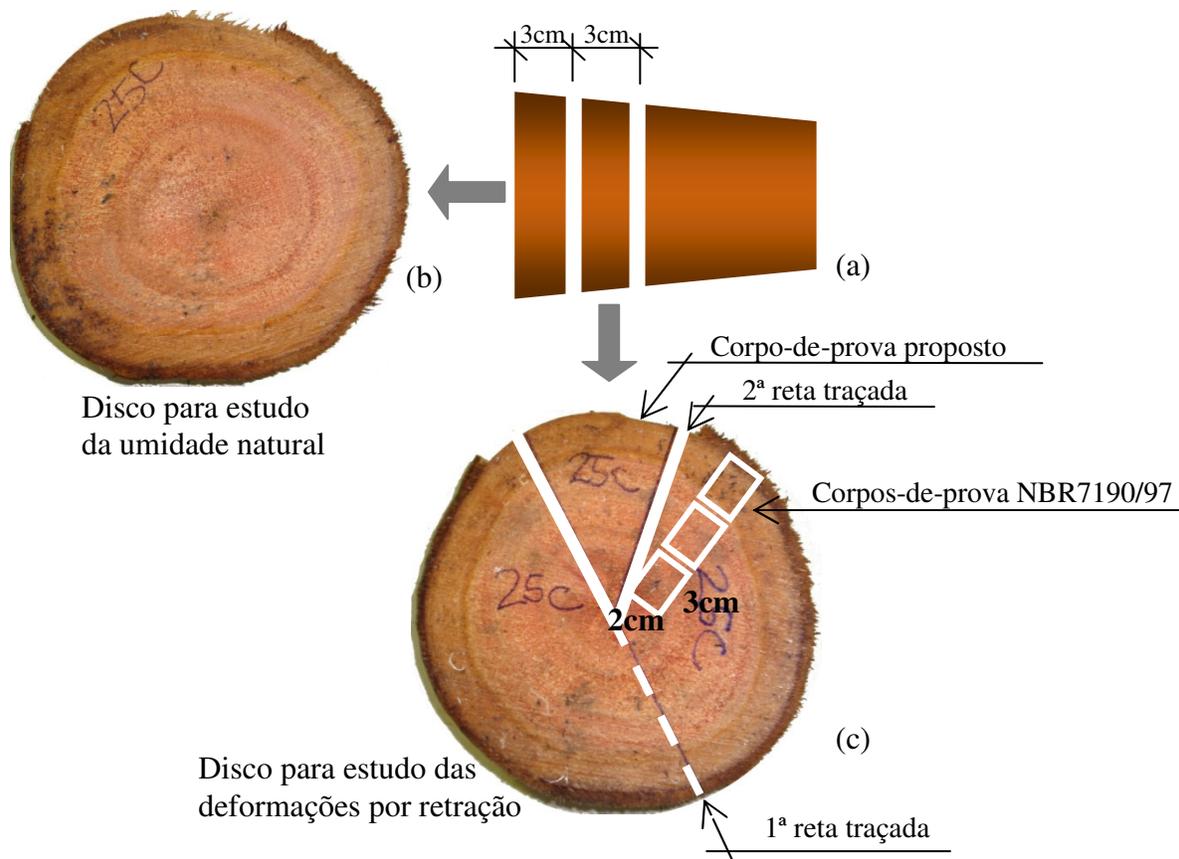


Figura 12 – Esquema de seccionamento dos torres (a) e dos discos para estudo da umidade natural (b) e das deformações por retração (c)

A determinação da umidade natural da madeira foi feita pelo método gravimétrico e utilizada no estudo da correlação entre o teor de umidade natural e a retração da madeira. Os

discos recém cortados foram pesados em uma balança com precisão de 0,01g e, em seguida secos em estufa à temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . As avaliações de massa dos corpos-de-prova foram feitas a cada 24h até que apresentassem uma variação menor ou igual a 0,5% entre duas leituras, quando as amostras foram consideradas secas. O teor de umidade natural da madeira foi calculado de acordo com a Equação 6.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

$m_i$  = massa inicial da amostra de madeira (g)

$m_s$  = massa da amostra seca (g)

As deformações específicas por retração ( $\epsilon_r$ ) nos corpos-de-prova em forma de cunha e especificados pela NBR7190/97 foram determinadas no intervalo entre os instantes saturada ( $U_{sat}$ ) e seca ( $U_0$ ). Após o preparo (ver item 3.1) as amostras saturadas (“verdes”) foram fotografadas e, no caso das amostras da NBR, tiveram também as distâncias entre as faces medidas com o paquímetro com precisão de 0,01mm em três pontos distintos para cada direção, radial e tangencial, conforme as recomendações da norma. Em seguida, as amostras foram deixadas no ambiente do laboratório para secagem inicial ao ar e, ao atingirem a Umidade de Equilíbrio Higroscópico, foram colocadas na estufa para secagem a uma temperatura inicial de  $40^{\circ}\text{C}$ . Quando a taxa de variação da umidade da amostra tendia a zero, aumentava-se a temperatura da estufa em  $20^{\circ}\text{C}$ . O processo foi se repetindo até atingir-se a temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , recomendada pela NBR 7190/97 para os ensaios de determinação do teor de umidade e de estabilidade dimensional. O acompanhamento da secagem foi feito pelo método gravimétrico utilizando-se uma balança digital, com precisão de 0,01g. As avaliações de massa também foram feitas a cada 24h até que apresentassem uma variação menor ou igual a 0,5% entre duas leituras, quando as amostras foram consideradas secas, sendo novamente fotografadas e medidas. Os deslocamentos ocorridos foram medidos através do processamento e análise digital de imagens nos corpos-de-prova em forma de cunha e da NBR 7190/97, utilizando-se o método da *thin-plate spline* - TPS. Nos corpos-de-prova da NBR7190/97 também foram feitas as avaliações segundo os procedimentos recomendados por essa norma.

### 3.1 Preparo das amostras

Como citado no 2.2.2, o estudo das variações morfométricas de formas planas com base no conceito de TPS utiliza-se de marcos anatômicos, também chamados de pontos de controle, para o mapeamento da superfície estudada. Nos estudos de variação morfométrica apresentados nesse item, a geometria complexa das estruturas analisadas, permitiu a identificação desses pontos diretamente na imagem. Uma vez que esses estudos visavam à comparação entre diferentes amostras de geometria semelhante, o posicionamento dos pontos de controle em cada imagem era independente. No caso do presente estudo, além da geometria simples dos corpos-de-prova não permitir a identificação de um número representativo de pontos significativos em seu contorno, o fato das diferentes imagens corresponderem à mesma amostra, requer que os pontos sejam rigorosamente os mesmos e que os seus deslocamentos acompanhem os reais deslocamentos ocorridos. Para garantir esse pressuposto, a marcação dos pontos foi feita diretamente na amostra, por meio de processo serigráfico.

As amostras em forma de cunha e os corpos-de-prova especificados pela NBR 7190/97 para ensaios de retração, foram cortados e aparelhados de modo a garantir o paralelismo entre a face de estudo e a oposta. A face de estudo foi polida utilizando-se uma lixa grossa (granulometria 80) e, quando necessário, uma lixa fina (granulometria 120). Em seguida foi impressa, na face preparada, uma grade linear com espaçamento de 5mm entre linhas e colunas, utilizando-se uma tela serigráfica, preparada com uma malha de 75 fios contendo o desenho da grade numa área de 19cm x 25cm, no caso das amostras tipo cunha (Figura 13a) e de 5,5cm x 15cm para as amostras da norma (Figura 13b). A tela foi apoiada sobre uma base de madeira (Figura 14), confeccionada de forma a permitir o encaixe de amostras de diferentes tamanhos e mantê-las niveladas para garantir o contato permanente com a tela e evitarem-se falhas de impressão. Observa-se que, no caso das amostras da norma, a base de apoio utilizada possibilitou o posicionamento e reticulagem de seis corpos-de-prova simultaneamente. No caso das cunhas, o perfeito encaixe foi garantido pela regularização das faces laterais através do lixamento com lixa grossa.

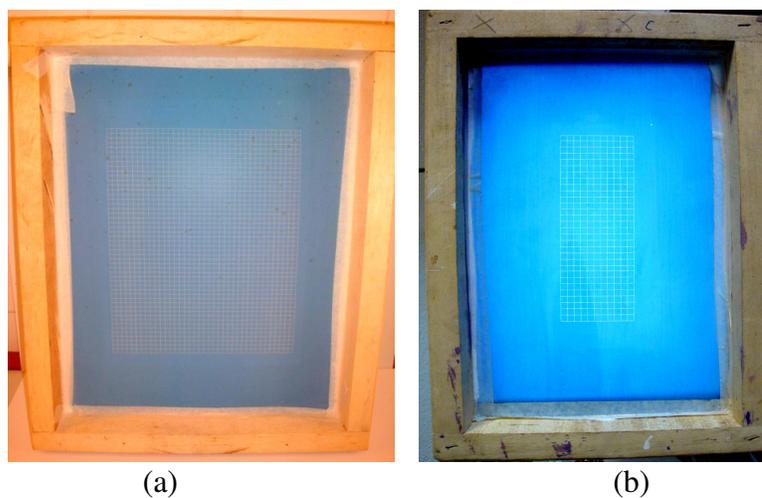


Figura 13 – Telas serigráficas contendo os desenhos das grades de linhas utilizadas para as amostras em forma de cunha (a) e da norma (b)

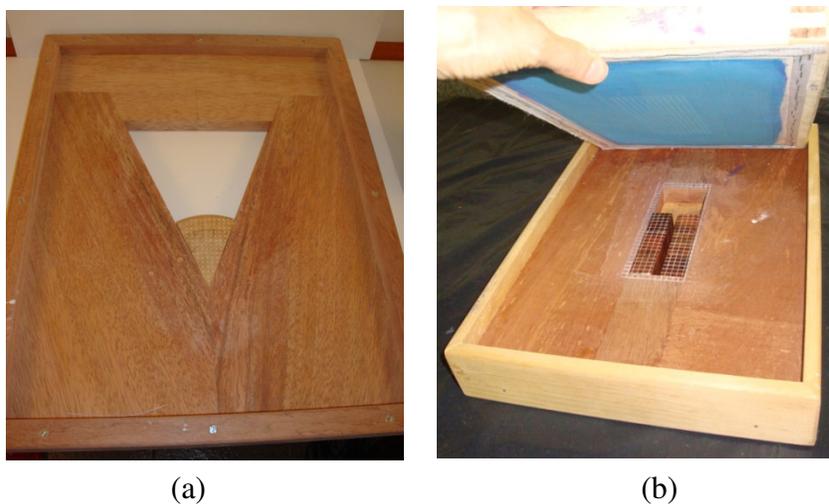


Figura 14 – Bases de apoio para telas de impressão nas amostras tipo cunha (a) e nas amostras paralelepípedicas da norma (b) com as respectivas amostras para serem reticuladas

A impressão do retículo foi feita com tinta sintética branca espalhada com um rodo próprio para impressão serigráfica. A Figura 15 ilustra a sequência de obtenção e preparo das amostras e a Figura 16 mostra exemplos do resultado final da estampagem nas amostras.



Figura 15 – Sequência de obtenção e preparo das amostras, da esquerda para a direita e de cima para baixo: Obtenção do disco após regularização da base do torete; marcação das cunhas; corte das amostras na serra-fita; polimento da superfície de estudo; regularização das laterais; posicionamento da amostra na base; impressão da grade e amostra em forma de cunha estampada

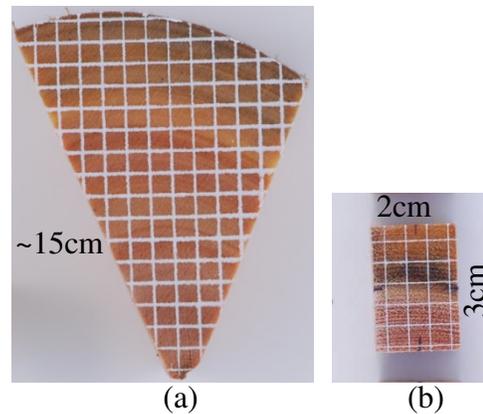


Figura 16 – Exemplo de uma amostra em forma de cunha e de uma amostra da NBR após estampagem da grade

### 3.2 Captura, processamento e análise das imagens para estudo das deformações da madeira

A captura das imagens foi feita nos instantes saturada ( $U_{sat}$ ) e seca ( $U_0$ ) no laboratório de imagens do LEM (Figura 17), utilizando-se uma câmera fotográfica digital de 10.2MP equipada com uma lente micro 105 mm com redutor de vibrações, um computador equipado com um programa que permite o disparo e captura das imagens sem necessidade do contato direto do operador com a câmera, um conjunto de iluminação composto por duas luminárias incandescentes e um sistema de flashes sem fio, uma bancada para apoio das amostras e um dispositivo para fixação da câmera fotográfica que permite manter constante a distância focal, definida de forma a permitir o enquadramento da maior amostra analisada. Uma placa de PVC foi utilizada para proporcionar melhor contraste entre a amostra e o fundo da imagem.

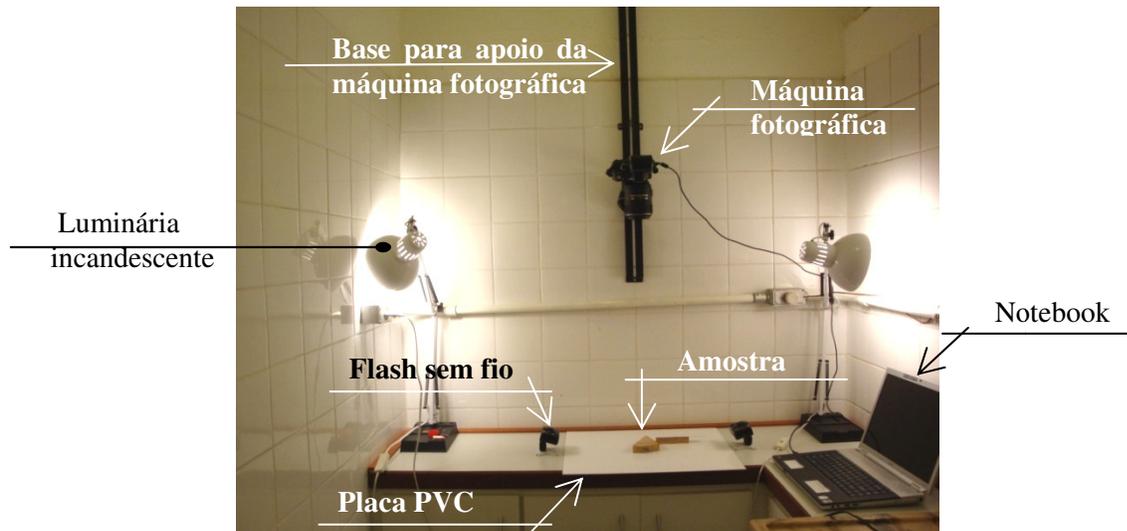


Figura 17 - Vista do laboratório de imagens do LEM, com os equipamentos utilizados na captura das imagens e com uma amostra, posicionada sobre a bancada para ser fotografada

O pré-processamento foi feito no programa de edição de imagens GIMP 2.4.5 - *Gnu Image Manipulation Program* (Spencer Kimball, Peter Mattis and the GIMP Development Team), tendo sido transformadas em imagens binárias, através do processo de binarização<sup>3</sup>.

Como a obtenção da função TPS é feita a partir dos centros de massa dos pontos de interseção entre as linhas e colunas da grade, após a binarização das imagens (Figura 18b), com a ferramenta “borracha” fez-se a marcação desses pontos, cujo posicionamento foi feito de forma visual, tendo-se o cuidado de centralizá-lo o mais próximo possível da interseção. Por ser um processo essencialmente visual, essa marcação ficou dependente do olhar do operador que, por esse motivo, foi sempre o mesmo a realizar o processo em todas as imagens. Para o preenchimento do ponto, definiu-se inicialmente uma cor qualquer como cor de fundo da

<sup>3</sup> Técnica de segmentação da imagem em que se define um ou mais limiares de separação no qual as regiões da imagem serão segmentadas. Nesse processo, uma imagem com diversos tons de cinza é transformada numa imagem com apenas dois tons (0 ou 1) preto ou branco, sendo que o pico mais alto corresponde à tonalidade clara e o pico mais baixo à tonalidade escura, isto é, os pixels com tonalidade acima do limite definido, assumem o valor 1, correspondente à cor branca e os pixels com tonalidade abaixo deste limite assumem o valor 0, correspondente à cor preta. Nos programas de edição de imagens esse processamento é feito a partir de ferramenta própria, na qual a definição do limite é feita em um gráfico que mostra a frequência de pixels existentes na imagem, em cada um dos 256 tons possíveis. Nesse gráfico é possível escolher os limites inferior ou superior, deslizando-se um dos cursores existentes no eixo  $x$ . A escolha do limite ideal é feita pela visualização do efeito na própria imagem.

imagem, diferente de preto ou branco, que na imagem binária é representada em tons de cinza. Esse procedimento foi necessário para facilitar as etapas posteriores de limpeza da imagem.

Após a marcação dos pontos, utilizando-se a ferramenta de “seleção por cor”, foram selecionadas todas as áreas de cor branca da imagem, as quais foram preenchidas com a cor preta. Com esse procedimento, foram eliminadas as porções de linhas das grades que não faziam parte da interseção e que, portanto, não seriam úteis à obtenção da função TPS. Também foram eliminados eventuais pixels brancos, identificados como “sujeiras” da imagem, resultante do processo de binarização, os quais poderiam ser confundidos com pontos de controle pelo algoritmo utilizado na identificação dos centros de massa.

Tendo toda a imagem na cor preta, à exceção dos pontos de interseção das linhas, utilizou-se novamente a ferramenta de “seleção por cor” para selecionar os pontos marcados e preenchê-los com a cor branca (Figura 18c).

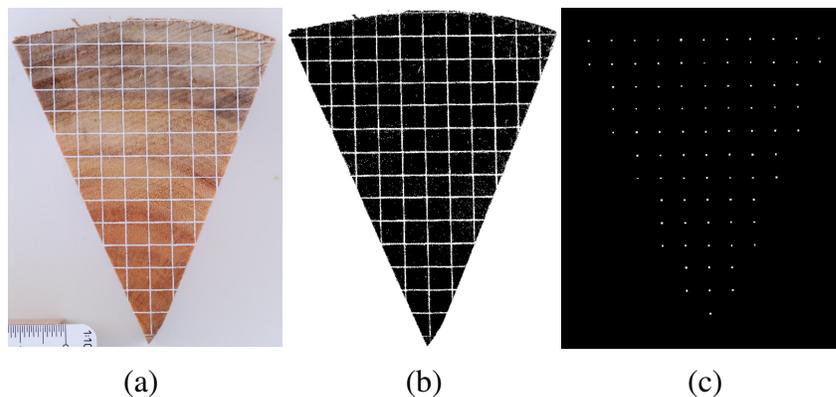


Figura 18 – Imagem de uma amostra em forma de cunha com grade impressa (a) e imagem da mesma amostra após binarização (b) e após a eliminação das linhas e colunas e definição dos pontos de interseção (c)

Os pares de imagens binárias contendo os pontos de controle foram processadas no algoritmo “convert\_patts.sci” que gera um arquivo com extensão “.dat” compatível com os demais algoritmos utilizados nas diferentes etapas de geração do retículo da TPS. O arquivo gerado nessa etapa foi processado no algoritmo “mark\_points.sci”, que faz a localização dos centros de massa dos pontos de controle nos pares de imagens correspondentes às imagens das amostras não deformadas (Figura 19a) e deformadas após o evento causador da deformação (Figura 19b).

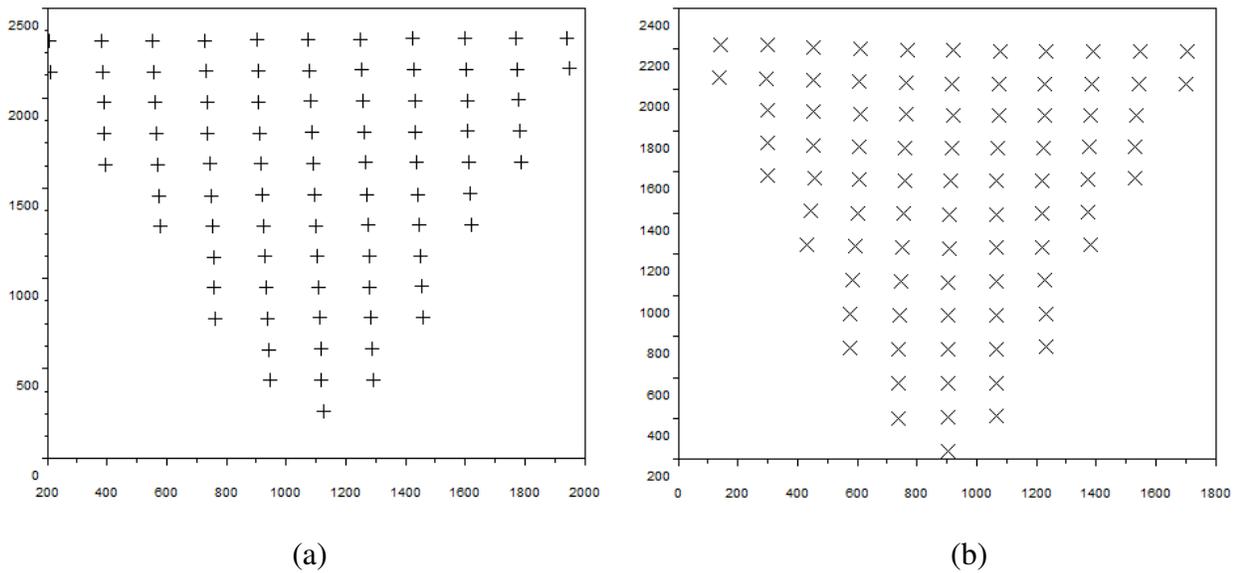


Figura 19 – Exemplo de arquivo gerado após localização dos centros de massa dos pontos de controle nas imagens de uma amostra não deformada (a) e deformada (b)

Em seguida, através do algoritmo *rename.sci*, os pontos de controle foram nomeados, utilizando-se uma numeração sequencial, que deve ser a mesma em ambas as imagens (Figura 20), já que o retículo da TPS é dado pela homologia entre os pontos de controle devendo, portanto, haver correspondência entre os pontos das duas imagens.

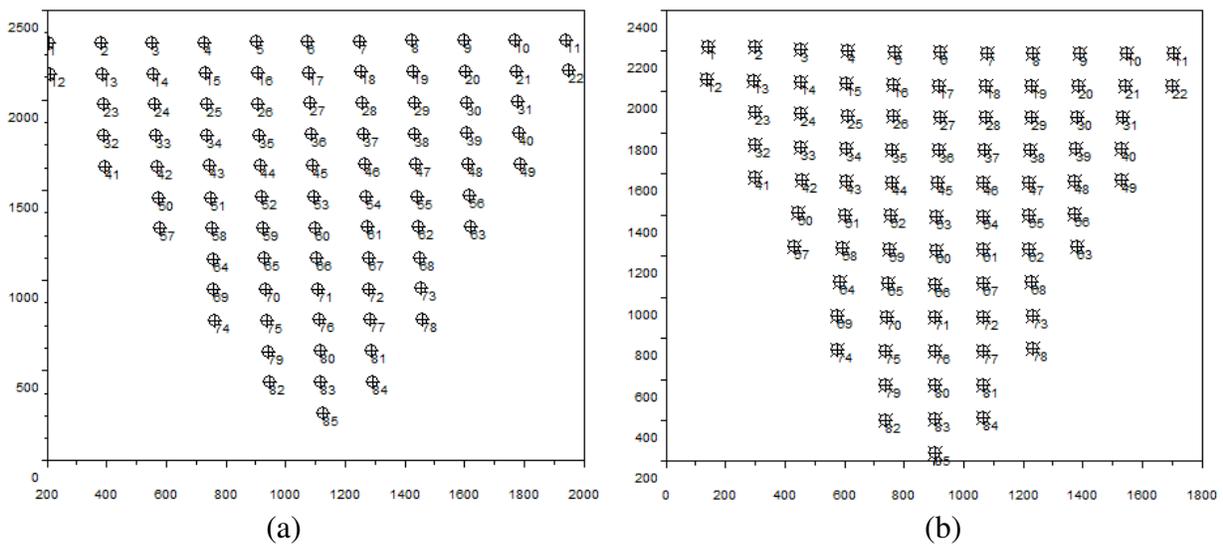


Figura 20 – Exemplo de arquivo após localização e nomeação dos centros de massa dos pontos de controle nas imagens de uma amostra não deformada (a) e deformada (b)

O algoritmo *analyse.sci* utiliza os pontos de controle como matriz para a obtenção de um plano retículo para cada uma das imagens, original e deformada. Nesse processo, as imagens contendo os centros de massa já nomeados são ajustadas de forma a minimizar as distâncias entre os pontos e, assim, garantir a mesma orientação para ambas. A interpolação entre os pares de TPS transforma o retículo ortogonal correspondente à imagem indeformada (inicial) no retículo deformado que acompanha as alterações sofridas pela amostra. Além disso, o algoritmo “Analyse.sci” fornece também, para cada par analisado:

1. Os valores referentes à energia total de deformação correspondente à soma de todas as energias de deformações ocorridas nas imagens e que são obtidas derivando-se a função TPS;
2. As coordenadas  $(x, y)$  dos pontos do reticulado em uma matriz quadrada  $X_{ij}$  de ordem 80, contendo as coordenadas  $x$  e outra matriz quadrada  $Y_{ij}$  de ordem 80 contendo as coordenadas  $y$ ;
3. As coordenadas  $(x, y)$  dos pontos de controle correspondentes aos instantes deformado e não deformado;
4. As distâncias ( $lx$  e  $ly$ ) entre os pontos do retículo não deformado.

As deformações por retração nos intervalos entre os pontos do retículo ou dos pontos de controle foram calculadas de acordo com a Equação 7 para a direção  $x$  e com a Equação 8, para a direção  $y$ . A coluna central do retículo foi planejada para coincidir com as direções  $y$ .

$$\varepsilon_x = \frac{lx_{indef} - lx_{def}}{lx_{indef}} \times 100 \quad (7)$$

$\varepsilon_x$  = deformação na direção  $x$ ;

$lx_{indef}$  = distância, na direção  $x$ , entre os pontos da amostra indeformada, dada pelo programa no caso dos pontos do retículo e dada pela equação:  $lx_{indef} = Pos\ x_{i+1,j+1} - Pos\ x_{i,j}$ , calculada na amostra indeformada, no caso dos pontos de controle;

$lx_{def}$  = distância, na direção  $x$ , entre os pontos da amostra deformada dada pela equação:

$$lx_{def} = Pos x_{i+1,j+1} - Pos x_{i,j}, \text{ calculada na amostra deformada}$$

$$\varepsilon_y = \frac{dy_{indef} - dy_{def}}{dy_{indef}} \times 100 \quad (8)$$

$\varepsilon_y$  = deformação na direção  $y$ ;

$ly_{indef}$  = separação na direção  $y$  entre os pontos da amostra indeformada, dada pelo programa no

caso dos pontos do retículo e dada pela equação:  $ly_{indef} = Pos y_{i+1,j+1} - Pos y_{i,j}$ ,

calculada na amostra indeformada, no caso dos pontos de controle;

$ly_{def}$  = separação na direção  $y$  entre os pontos da amostra deformada dada pela equação:

$$ly_{def} = Pos y_{i+1,j+1} - Pos y_{i,j}, \text{ calculada na amostra não deformada}$$

As matrizes das coordenadas  $x$  e  $y$ , juntamente com as coordenadas dos pontos de controle, permitiram a reconstrução no *Excel* do retículo da TPS e a construção, no *Minitab*, de um gráfico  $z = f(x,y)$  em que  $z$  corresponde à deformação no intervalo entre o ponto e seu vizinho imediato, que representa a variação da retração em qualquer ponto da superfície da amostra.

Todos os algoritmos citados acima foram desenvolvidos pelo Prof. Luciano da Fontoura Costa, do Instituto de Física de São Carlos / Universidade de São Paulo – IFSC/USP, para o ambiente “Scilab”.

### 3.3 Validação do método da TPS

A validação do método da TPS para o estudo das deformações específicas das madeiras foi realizada através da avaliação da sua sensibilidade na detecção das deformações impostas e autoequilibradas.

#### 3.3.1 Deformações impostas

O estudo foi realizado em duas amostras de MDF (*Medium Density Fiberboard*), que permite a imposição de grandes deslocamentos com pequenas cargas, de dimensões aproximadas de 30 x 50 x 140 mm e três amostras de *Eucalyptus sp* de dimensões aproximadas de 40 x 50 x 140 mm, obtidas de forma aleatória, a partir de lotes existentes no LEM, sendo que duas foram serradas segundo as direções de corte ilustrada pela Figura 21a e uma conforme a Figura 21b.

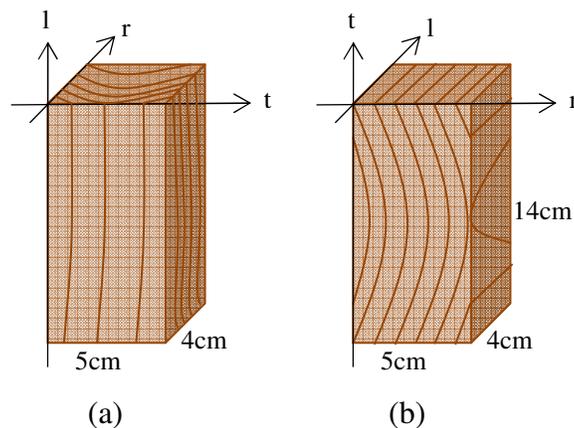


Figura 21 – Esquema de orientação dos corpos-de-prova de *Eucalyptus* utilizados nos testes auxiliares de validação da TPS

Um retículo linear, com espaçamento de 5mm entre linhas e colunas, foi impresso em uma das faces, utilizando-se uma tela serigráfica que continha o desenho do retículo, uma base para apoio da tela, rodo e tinta vinílica fosca na cor branca (Figura 22). A tela foi preparada com uma malha fina (100 fios) para garantir uma espessura mínima e melhor definição das linhas impressas na madeira. A base de apoio foi confeccionada de forma a permitir manter a amostra fixa e nivelada para possibilitar uma impressão sem falhas.



Figura 22 – Aparatos utilizados para impressão do retículo nas amostras

Na avaliação da sensibilidade do método, a idéia central foi a de impor aos corpos de prova uma deformação com uma magnitude tal que permitisse sua visualização sem o auxílio de outros métodos ou equipamentos, para posteriormente servir de base de comparação com a deformação detectada pela TPS. Foram executados dois ensaios de compressão numa Máquina Universal de Ensaios, sendo um com carga distribuída num pequeno trecho, centralizada na face superior da amostra (Figura 23a) e outro com carga distribuída excêntrica (Figura 23b). Foi necessária a utilização de um bloco metálico para garantir o direcionamento e o posicionamento da carga distribuída no corpo-de-prova.

Os deslocamentos foram analisados de duas formas: a convencional, com uso do LVDT e a proposta, através do processamento e análise digital de imagens. No modo convencional, foram instalados nos corpos-de-prova, dois LVDTs, sendo um na região comprimida e outro na região tracionada (Figura 23). As leituras foram registradas a cada 10KN de carga, aproximadamente, numa tabela do *Excel*, programada para gerar, automaticamente, um gráfico “Tensão x Deformação” facilitando a identificação do ponto de transição em que o corpo-de-prova migrasse do regime elástico para o regime plástico e a determinação do fim do carregamento.

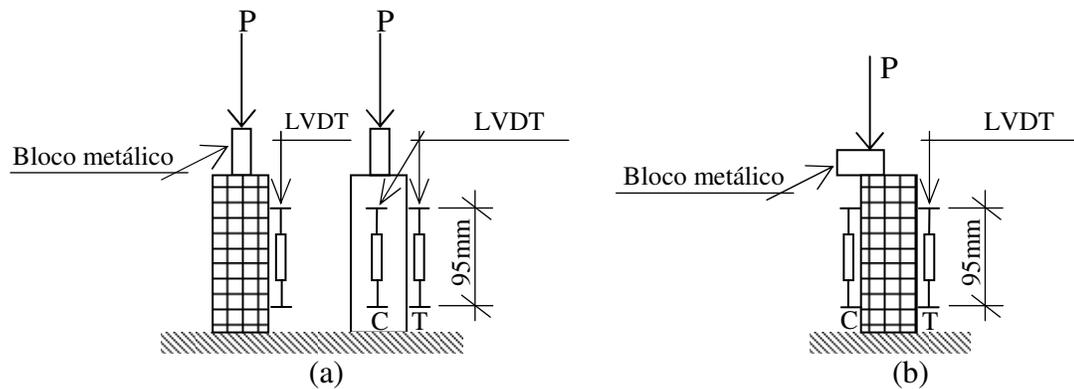


Figura 23 – Esquema do ensaio de compressão com carga centrada na face superior (a) e com carga excêntrica (b)

Nos mesmos instantes em que foram realizadas as leituras dos LVDTs, foram tomadas imagens digitais para serem depois analisadas e delas obtidos os deslocamentos pontuais para serem comparados àqueles obtidos pelo método convencional.

As imagens foram capturadas utilizando-se o mesmo aparato citado em 3.2, sendo que a distância focal foi determinada em função da altura do corpo-de-prova, de forma a permitir, exclusivamente, o seu enquadramento.

Uma placa de PVC e uma folha de papel sulfite branco foram utilizadas, respectivamente, como fundo branco e para cobrir o cutelo da máquina e, assim, eliminar as interferências de cor e objetos do fundo e no entorno. A placa de PVC e o papel sulfite funcionaram também como rebatedores de luz ajudando a reduzir a formação de sombras e contribuindo para minimizar problemas de iluminação.

Um escalímetro com graduação impressa com tinta preta sobre fundo branco foi utilizado como escala de referência, tomando-se o cuidado de posicioná-lo no mesmo plano da face de estudo do corpo-de-prova, fixando-o num bloco metálico justaposto ao corpo-de-prova.

O processamento e análise das imagens seguiram as mesmas etapas descritas no item 3.2, com exceção da etapa que trata do cálculo dos deslocamentos e das deformações.

### 3.3.2 Deformações autoequilibradas

A validação do método da TPS pelo estudo das deformações autoequilibradas foi realizada em relação ao retículo de linha contínua e de pontos.

Foram utilizadas oito amostras saturadas de *Eucalyptus sp* preparadas de acordo com as etapas descritas em 3.1, sendo que em quatro delas foi impresso um retículo de linhas e nas demais um retículo de pontos.

Após a impressão dos retículos, as amostras foram deixadas no ambiente do laboratório para secagem inicial ao ar. O acompanhamento da secagem foi feito pelo método gravimétrico utilizando-se uma balança digital com precisão de 0,01g. A avaliação da variação de massa de água foi feita a cada meia hora nas primeiras quatro horas da secagem e, após esse período, houve duas pesagens nas 12 e 24 horas. A partir daí, seguiram-se avaliações regulares a cada 24 horas, até a estabilização da massa das amostras, quando foram colocadas em estufa à temperatura inicial de 40°C. Nas três primeiras horas de secagem em estufa, foram feitas pesagens a cada meia hora e, em seguida, a cada 24 horas, até a estabilização, quando aumentou-se a temperatura em 20°C. Na medida em que as amostras estabilizavam aumentava-se a temperatura em 20°C até atingir a temperatura máxima para determinação do teor de umidade recomendada pela NBR7190/97, que é de 103°C  $\pm$ 2°C. As amostras foram consideradas secas quando a variação de massa foi menor ou igual a 0,5% em duas medições consecutivas.

Durante o processo de secagem das amostras, as imagens foram capturadas em três instantes:

1. Com a umidade inicial, correspondente à saturação das amostras ( $U_{sat}$ );
2. Num ponto intermediário, tendo as amostras um teor de umidade em torno de 5% ( $U_5$ ) e
3. Com a umidade correspondente à amostra seca ( $U_0$ ).

A análise foi feita nos pares de imagens “ $U_{sat}$ - $U_5$ ” para estudar um ponto intermediário da secagem num ambiente controlado, no caso a estufa e “ $U_{sat}$ - $U_0$ ”.

A captura, processamento e análise das imagens seguiram as mesmas etapas descritas em 3.2, com exceção da etapa que trata do cálculo dos deslocamentos e das deformações, no caso das amostras com retículo de linhas contínuas.

Nas amostras com grade de pontos podem aparecer pixels brancos e pretos resultantes do processo de binarização distribuídos aleatoriamente na imagem (Figura 24a), podendo ocorrer pixels pretos internos às áreas das circunferências correspondentes aos pontos de controle, como também pixels brancos no fundo preto do restante da imagem. Ambas as situações interferem negativamente na etapa de identificação dos centros de massa dos pontos de controle. Uma por gerar uma geometria que não corresponde à real e, como consequência, um posicionamento equivocado do centro de massa e outra por possibilitar que o algoritmo identifique os pixels brancos como pontos de controle não desejados e sem correspondente nas imagens subseqüentes. Assim foi necessária uma etapa de “limpeza” da imagem, que seguiu os mesmos procedimentos descritos para a identificação dos pontos de controle das amostras com grade de linhas, tendo sido utilizados pontos redondos ao invés de quadrados (Figura 24b).

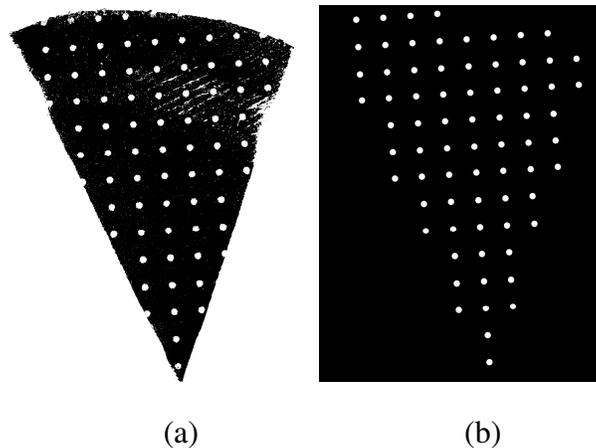


Figura 24 – Imagem binária de uma amostra com grade de pontos antes (a) e após (b) a limpeza da “sujeira”

### 3.4 Ensaios preliminares para definição dos parâmetros de preparo das amostras

Os métodos de análise digital de imagens, especialmente a função TPS, são ainda inéditos no campo de estudo das propriedades físicas e mecânicas da madeira. Por esse motivo, os procedimentos de preparo das amostras, descritos no item 3.1, para que as imagens capturadas atendessem aos requisitos básicos de qualidade para processamento e análise tiveram que ser definidos em ensaios preliminares.

### 3.4.1 Definição do método de marcação dos pontos de controle nas amostras

Dos requisitos de qualidade da imagem para processamento, o principal deles refere-se à marcação dos pontos de controle, a partir dos quais são obtidos os retículos que representam as deformações sofridas pelas amostras. Considerando-se as condições inerentes ao ensaio de retração, essa marcação deve ser feita utilizando-se um material que seja, ao mesmo tempo, resistente à umidade e temperatura, já que as marcações são feitas na amostra ainda verde sendo em seguida secas em estufa. Devem ser também resistentes ao manuseio das amostras, ter os contornos bem definidos e não perder a forma no processo de secagem, pois a medição dos deslocamentos é feita com base no centro de massa destes pontos. As cores devem ser, preferencialmente, branca ou preta, que proporcionam a intensidade de contraste ideal nas imagens binárias, como a da figura 25b, que representam as transformadas das imagens capturadas (figura 25a) e sobre as quais são feitas as análises digitais dos deslocamentos de todos os pontos marcados.

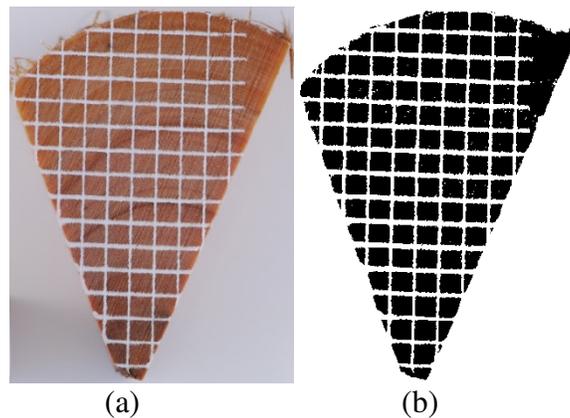


Figura 25 – imagem original (a) e imagem binária (b)

Os seguintes materiais foram testados: a caneta esferográfica, caneta de retroprojeter, caneta permanente, grafite 6B, lápis com mina de carvão, esmalte vitral, tinta acrílica, tinta tridimensional, lantejoulas fixadas com alfinete e com resina epóxi, alfinete para mapas, alfinete de costura e prego 6x6 com a cabeça pintada com esmalte vitral.

Dentre todos os materiais testados os que melhor atenderam às expectativas num momento inicial, foram os pregos e os alfinetes de costura, mas eles requerem uma pintura prévia com tinta eletrostática, que é resistente à umidade, temperatura e manuseio das amostras e dá mais agilidade ao trabalho de marcação dos pontos. As canetas e lápis foram descartados, pois

não permitem gravação sobre superfícies úmidas e, quando permitem, não se consegue uma marcação com contornos bem definidos, como no caso do carvão, ou ocorre o espalhamento da tinta, como no caso da caneta permanente e das tintas testadas. No caso da mina de carvão, há ainda o agravante de não resistir ao manuseio da amostra. O grafite 6B, embora permitisse gravação sobre superfície úmida, não ofereceu intensidade de contraste suficiente para o processamento e análise digital.

A utilização dos pregos e dos alfinetes continuou sendo testada nos ensaios subsequentes, como por exemplo, nos primeiros estudos para verificação da malha de pontos adequada ao mapeamento da superfície dos corpos-de-prova e verificação da sensibilidade do método para a obtenção das deformações por retração ou inchamento através da função *thin-plate spline* (TPS), realizados em corpos-de-prova em forma de cunha, semelhantes aos propostos na pesquisa, apresentado no Exame Geral de Qualificação, em 25/6/2008 e no trabalho de Ramos (2008), que estudou a utilização do processamento e análise digital de imagens na medição de deslocamentos impostos e autoequilibrados em madeira de *Eucalyptus*. Verificou-se nesses ensaios que a marcação dos pontos de controle com alfinetes ou pregos era um processo lento, devido à necessidade de uma marcação prévia dos pontos de cravação na amostra, de uma pintura prévia com tinta branca e de um retoque posterior dessa pintura quando danificada pelo manuseio da amostra e principalmente na cravação do alfinete ou prego.

Outro problema identificado foi a imprecisão devida à diferença de densidade entre os anéis de crescimento. Os alfinetes e pregos tendiam a escorregar para as regiões de menor densidade, de modo que, em alguns casos, o ponto de controle não pôde ser cravado exatamente no ponto desejado. Em outros casos, dependendo das características da madeira e do corpo-de-prova, uma linha de pregação abriu fendas e fissuras ao longo da grã da madeira, de modo que na realização do ensaio, o prego ou alfinete pode escorregar por elas, acusando um deslocamento não correspondente ao real. Neste caso, uma solução cogitada foi a redução da profundidade de penetração, mas isso, além de configurar um trabalho adicional de corte, não solucionou o problema. Isso pode ser observado na Figura 26 que apresenta os instantes inicial e final de um ensaio de compressão paralela em uma amostra de *Eucalyptus* realizado por Ramos (2008), onde se verifica um fendilhamento na linha de pregação (a) e sua interferência na ruptura do corpo-de-prova (b). Observa-se na imagem da amostra rompida, uma tendência da ruptura em seguir a linha de alfinetes.

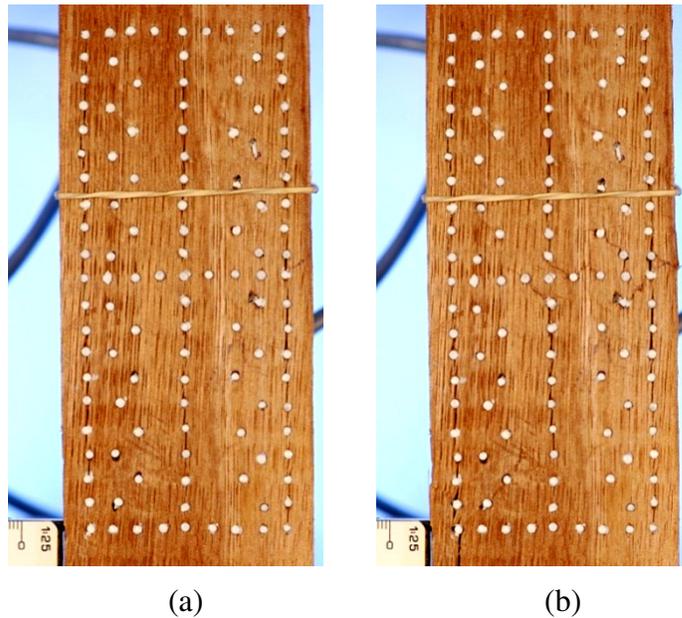


Figura 26 – Fendilhamento na coluna de alfinetes alinhados de uma amostra de *Eucalyptus sp* original (a) mostrando possíveis desconfinamentos dos alfinetes (b) após evento deformador

Ocorreram também nesse ensaio, o entortamento de alfinetes no momento da cravação, implicando em desperdício de tempo, de material e com prejuízo no número de pontos.

No mesmo trabalho, verificou-se nos ensaios de retração que, ao serem cravados na madeira os alfinetes ou pregos causam um deslocamento lateral das fibras fazendo com que fiquem adensadas entre duas marcações. Isso altera as características da madeira e, conseqüentemente os valores de deslocamento e deformação no trecho medido. Além disso, esse tipo de marcação dificulta a análise da superfície como um todo, já que não é possível a cravação dos pontos nas extremidades dos corpos-de-prova onde são tomadas as medidas de dimensões no método convencional, de modo que sempre haverá uma diferença para menor, na comparação entre os dois métodos.

As dificuldades observadas no trabalho de Ramos (2008) foram determinantes na opção pelo modo de marcação dos pontos de controle. Além dos problemas relatados acima, não foi encontrada, em tempo hábil, uma alternativa viável, ágil e não invasiva, para a marcação dos pontos de controle nos anéis de crescimento, inicialmente idealizada para medição dos deslocamentos nas direções radial e tangencial reais. Em função disso, optou-se pela marcação de uma malha ortogonal, que permitiu a utilização do processo de impressão serigráfica conferindo a

agilidade desejada. O teste de marcação dos pontos de controle nas amostras, utilizando processo serigráfico de impressão e de resistência da tinta à diversidade de condições dos ensaios, está relatado no item 3.4.2 a seguir.

### 3.4.2 Resistência da tinta serigráfica ao processo de umedecimento por imersão em água e secagem em estufa e definição do retículo a ser utilizado.

Esse ensaio preliminar teve como objetivo analisar o comportamento da tinta serigráfica em relação à diversidade de condições da amostra e dos ensaios de retração e inchamento, tais como, variações de umidade temperatura e resistência ao manuseio.

Foram utilizadas 20 amostras cortadas em forma de cunha, de ângulo de 45° a partir da medula e com espessura de 3cm, com faces rigorosamente aparelhadas e bem polidas, semelhantes às utilizadas no experimento final. Oito dessas amostras, todas do gênero *Eucalyptus*, que encontravam-se saturadas, foram submetidas ao ciclo retração-inchamento. As outras doze, seis de *Eucalyptus* e seis de *Pinus*, que encontravam-se à umidade de equilíbrio ao ar, foram submetidas ao ciclo inchamento-retração.

Em quatro das amostras submetidas ao ciclo retração-inchamento foi impressa uma grade de linhas espaçadas de 5mm x 5mm (Figura 27a) e nas outras quatro, uma grade de pontos, de mesmo espaçamento (Figura 27b).

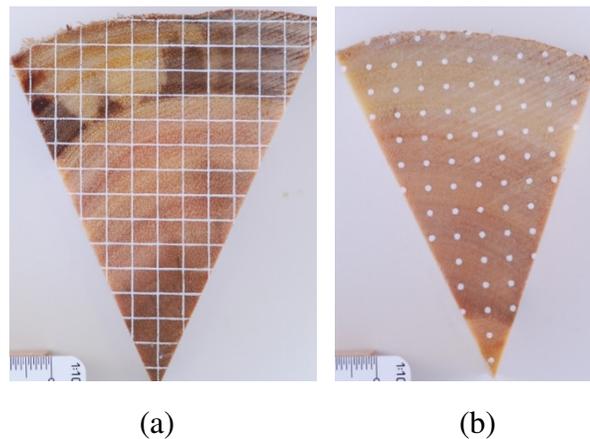


Figura 27 – Exemplos de amostras de *Eucalyptus* em forma de cunha, com grades de linhas contínuas (a) e de pontos (b) de espaçamento de 5mm x 5mm

Nas amostras submetidas ao ciclo inchamento-retração em três amostras de *Pinus* e em três de *Eucalyptus*, foi impresso o retículo de linhas contínuas e nas demais imprimiu-se o retículo de pontos, ambos com espaçamento de 5mm x 5mm. A impressão dos retículos foi feita por processo serigráfico, conforme descrito em 3.1

**a) Ciclo retração - inchamento**

Após a impressão dos retículos, as amostras foram deixadas no ambiente do laboratório para secagem inicial ao ar. O acompanhamento da secagem foi feito pelo método gravimétrico utilizando-se uma balança digital com precisão de 0,01g. A avaliação da variação de massa de água foi feita a cada meia hora nas primeiras quatro horas de secagem. Em função da diminuição visível da taxa de variação da umidade, foi feita uma pesagem na 12<sup>a</sup> hora e a partir daí, seguiram-se avaliações regulares a cada 24 horas, até a estabilização da massa das amostras, quando foram colocadas em estufa à temperatura inicial de 40°C. Nas três primeiras horas de secagem em estufa, foram feitas pesagens a cada meia hora e, em seguida, a cada 24 horas, até a estabilização, quando aumentou-se a temperatura em 20°C. Na medida em que as amostras estabilizavam aumentava-se a temperatura em 20°C até atingir a temperatura máxima para determinação do teor de umidade recomendada pela NBR7190/97, que é de 103°C ±2°C. As amostras foram consideradas secas quando a variação de massa foi menor ou igual a 0,5% em duas medições consecutivas. Após a secagem completa as amostras foram novamente expostas ao ambiente do laboratório, dando início ao processo de inchamento, até atingir a umidade de equilíbrio. Da mesma forma, a avaliação da massa foi feita a cada meia hora nas quatro primeiras horas e, posteriormente, a cada 24 horas até a estabilização, quando foram novamente imersas em água até a saturação completa.

**b) Ciclo inchamento – retração**

No ensaio de inchamento, as amostras foram imersas em água 24h após a impressão das grades, período necessário à para secagem completa da tinta. O acompanhamento do processo de saturação também foi feito pelo método gravimétrico e a avaliação de massa dos corpos-de-prova foi feita a cada meia hora nas quatro primeiras horas. Em seguida houve duas avaliações defasadas de duas horas e depois a cada 24 horas até a estabilização, ocorrida após 22 dias de imersão, quando as amostras foram expostas ao ambiente do laboratório para secagem ao ar. No início do processo de secagem as amostras foram pesadas a cada meia hora nas três primeiras

horas e depois a cada 24h. Ao atingir o equilíbrio ao ar, as amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura inicial de 40°C e novamente tiveram suas massas avaliadas a cada meia hora nas duas primeiras horas e, posteriormente, a cada 24h, seguindo-se o mesmo procedimento descrito para o ciclo retração-inchamento, até a secagem completa.

**c) Captura, processamento e análise das imagens adequadas ao estudo das deformações pela TPS**

Durante o processo de secagem e reumidificação das amostras no ciclo retração-inchamento, as imagens foram capturadas em quatro instantes (Figura 28):

1. Com a umidade inicial, correspondente à saturação das amostras ( $U_{sat}$ );
2. Num ponto intermediário, tendo as amostras um teor de umidade em torno de 5% ( $U_5$ );
3. Com a umidade correspondente à amostra seca ( $U_0$ ) e
4. Com a umidade final, referente à amostra novamente saturada ( $U_{resat}$ ).

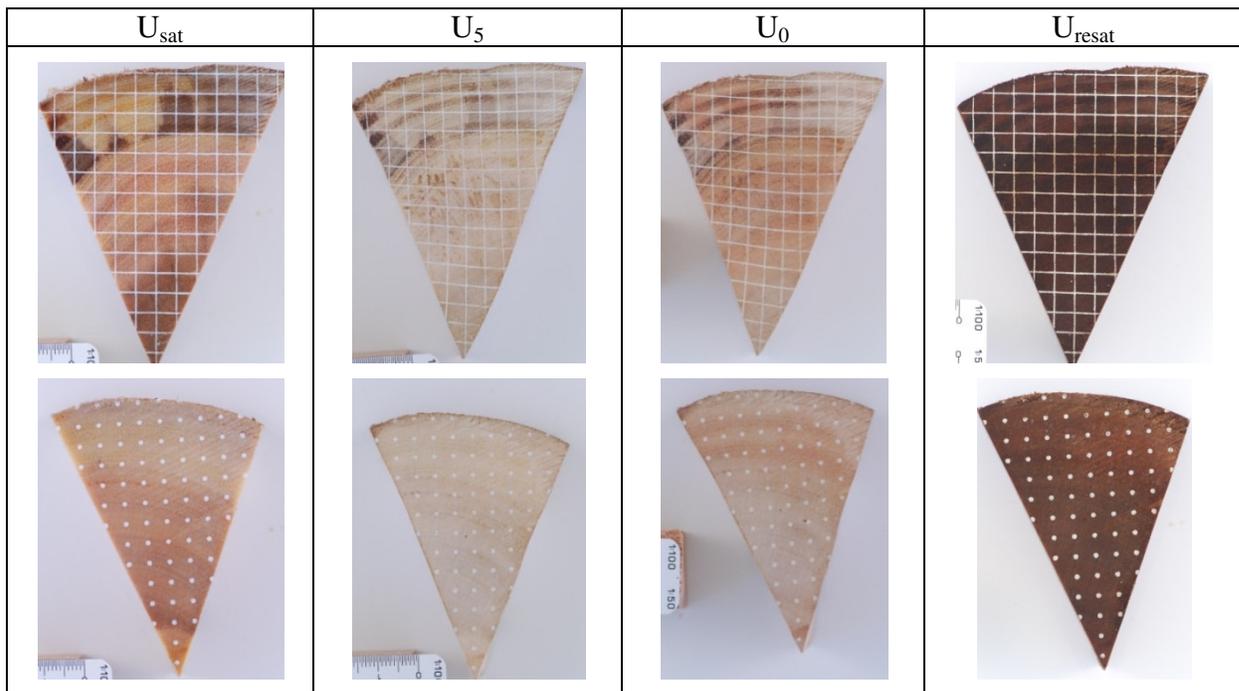


Figura 28 – Exemplo das imagens de amostras com grade de linhas contínuas e de pontos, capturadas nos instantes  $U_{sat}$ ,  $U_5$ ,  $U_0$ , e  $U_{resat}$  do ciclo de retração-inchamento

No ciclo inchamento-retração, as imagens foram capturadas nos instantes (Figura 29):

1. Na umidade inicial correspondente ao equilíbrio ao ar ( $U_{ar}$ );

2. Na umidade correspondente à amostra saturada ( $U_{sat}$ );
3. Na umidade correspondente à amostra seca ( $U_0$ ).

As amostras foram fotografadas com os mesmos equipamentos descritos no item 3.2, sendo que a distância focal utilizada foi de 0,70m correspondente à menor distância possível para o enquadramento da maior amostra do ciclo retração-inchamento. Como a decisão de inserir as amostras secas no teste de resistência da tinta quando o ciclo retração-inchamento já havia sido iniciado, a distância focal precisou ser mantida e, como as amostras secas do ciclo inchamento-retração eram maiores, em alguns casos foi preciso dividir a captura das imagens em duas ou mais partes.

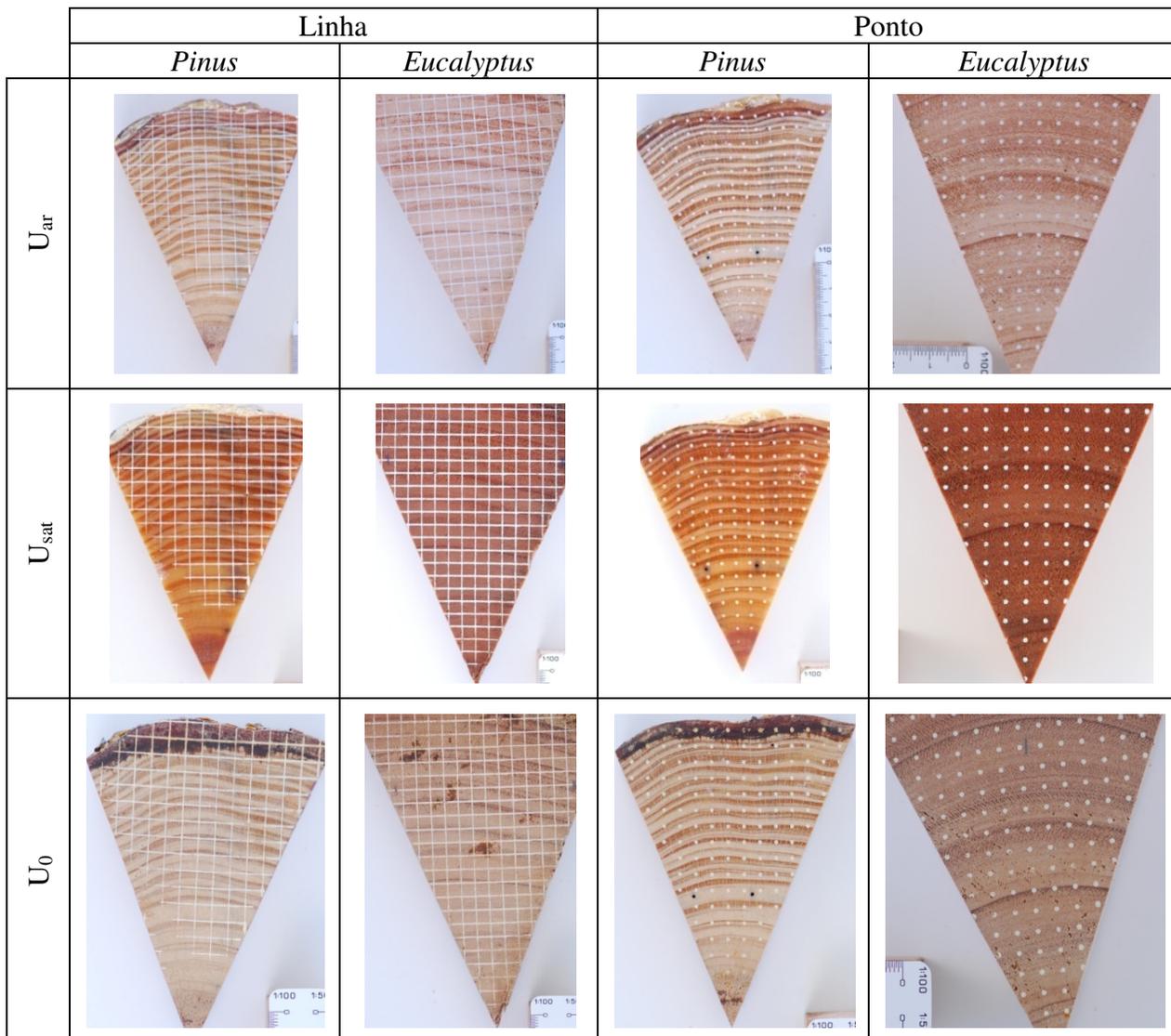


Figura 29 – Exemplo das imagens de amostras com grade de linhas contínuas e de pontos, capturadas nos instantes  $U_{ar}$ ,  $U_{sat}$ ,  $U_0$ , do ciclo inchamento-retração

O processamento das imagens seguiu as mesmas etapas descritas no item 3.2 para o pré-processamento no GIMP no caso das amostras com retículo de linhas contínuas, e no item 3.3.2, no caso das amostras com grades de pontos.

#### **d) Resultados e discussão**

Os resultados obtidos nesse ensaio preliminar mostraram que a principal diferença verificada entre os dois tipos de retículo, de linhas contínuas ou de pontos residiu na qualidade da impressão e na visualização das deformações diretamente na amostra. Na Figura 28, pode-se observar a sequência de fotos de duas amostras nos instantes saturada, seca e novamente saturada, sendo uma com grade de linhas contínuas e outra com grade de pontos. Observou-se que na amostra com grade de linhas contínuas, a deformação é mais facilmente identificada, já que a marcação é contínua, ao contrário das amostras com grade de pontos, em que os espaços entre eles dificultam a visualização da deformação.

Com relação à qualidade da impressão da grade na amostra, observou-se que nas amostras com grade de linhas contínuas, houve menos falhas e o contraste da tinta com a amostra, foi maior do que nas amostras com grades de pontos, o que resultou numa imagem de melhor qualidade para processamento. É provável que essa melhor qualidade de impressão seja devida à passagem de mais tinta na grade de linhas, favorecida pela continuidade do desenho na tela de impressão, do que na de pontos. Uma segunda passada do rodo, quando da impressão da grade de pontos foi experimentada, mostrou que esta operação pode ocasionar um vazamento da tinta para além dos limites desejados, causando a impressão de uma mancha, em vez de um ponto. Uma alternativa possível seria o aumento do diâmetro dos pontos até um limite tal, que não comprometa a sensibilidade do método. Para uma análise precisa a partir da TPS o diâmetro dos pontos de controle não pode ser muito grande, caso contrário pode ocorrer que alguns deslocamentos se dêem dentro da própria área do ponto e, por isso, não sejam captados pela função TPS.

A importância do preparo da amostra para a qualidade da impressão da grade ficou evidente nesse ensaio. Uma amostra bem preparada garante um permanente contato da face a ser impressa com a tela serigráfica. Para isso a amostra deve estar nivelada em relação à base de apoio, devendo, portanto, possuir a mesma espessura. A face oposta deve estar rigorosamente paralela para que não fique em falso quando apoiada na bancada de trabalho que deve estar

também plana e isenta de obstáculos. A face a ser impressa deve estar bem polida porque, a rugosidade diminui a área de contato da madeira com a tela e causa falhas na impressão. A Figura 30a mostra a diferença de qualidade de impressão de uma grade numa mesma amostra que possui uma zona bem polida e outra mal polida. Verificaram-se falhas por ausência de tinta na zona mal polida, mas por outro lado, um excesso de tinta na zona bem polida. Esse excesso de tinta não mostrou ser problemático na TPS, mas a falha foi bastante prejudicial por ter ocasionado perdas de conjuntos de pontos de controle. No processo de secagem ocorre, além da evaporação de água, uma volatilização parcial da tinta e isso piora a visibilidade da grade, principalmente na imagem da amostra seca (Figura 30b).

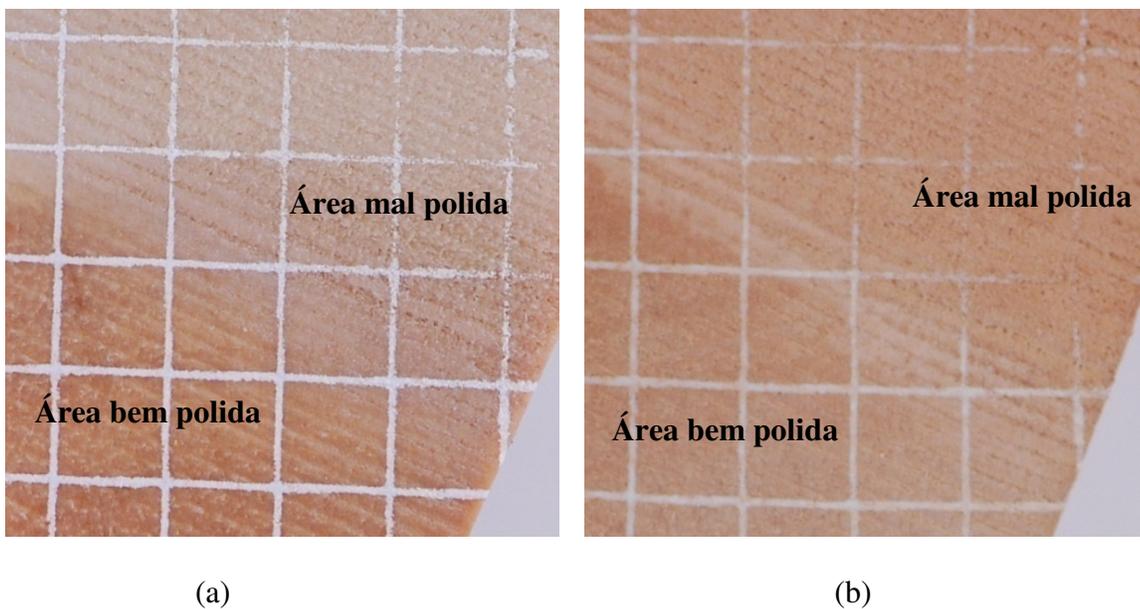


Figura 30 – Detalhe de uma amostra contendo uma zona bem polida, com boa qualidade de impressão, e outra mal polida com falhas na grade impressa na amostra úmida (a) e agravada na amostra seca (a)

Na binarização, ocorreram perdas de ponto de controle, tanto na imagem da amostra úmida (Figura 31a) quanto na da amostra seca (Figura 31b).

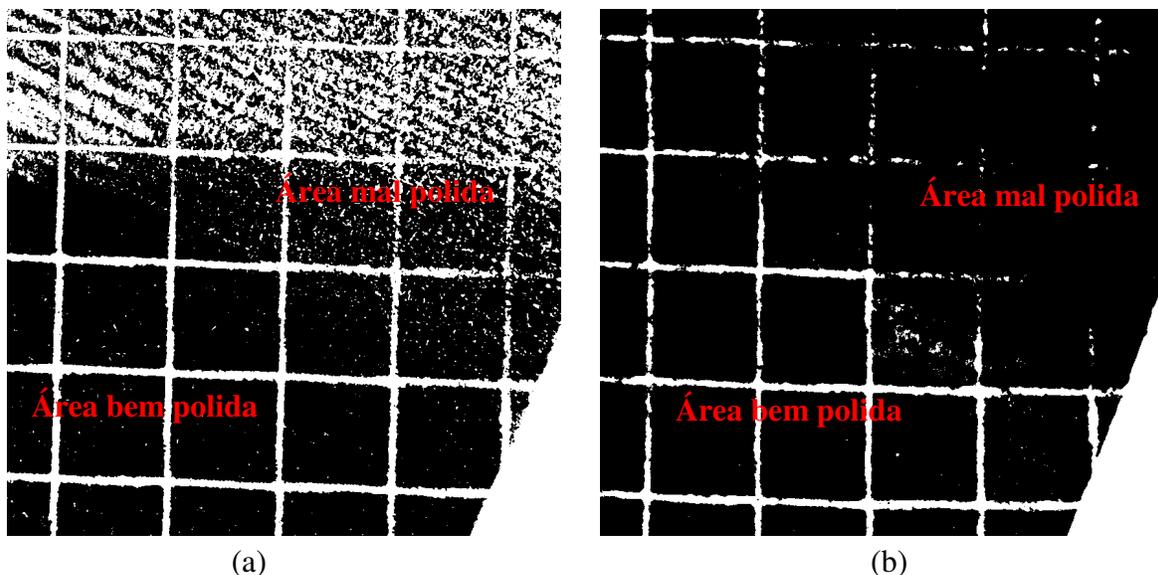


Figura 31 – Imagens binárias (com limiar 170) de uma mesma amostra saturada (a) e seca (b), com destaque para a perda de pontos de controle na zona mal polida

No processo de secagem há, ainda, uma perda de pigmentação da amostra que, associada à volatilização da tinta contribui para uma diminuição na intensidade de contraste entre as linhas e a madeira nas amostras secas. Isso pode ser percebido comparando-se as Figura 30 (a e b) onde se verifica que a madeira úmida possui uma coloração mais intensa do que a da madeira seca. Como a tinta utilizada é de cor branca, o contraste foi diminuindo à medida que a amostra foi secando. A utilização da cor preta foi testada anteriormente e verificou-se que não minimizou o problema, porque o efeito era inverso, isto é, o contraste diminuiu com o aumento da umidade da amostra. O contraste foi pior nas amostras com grade de pontos (Figura 32).

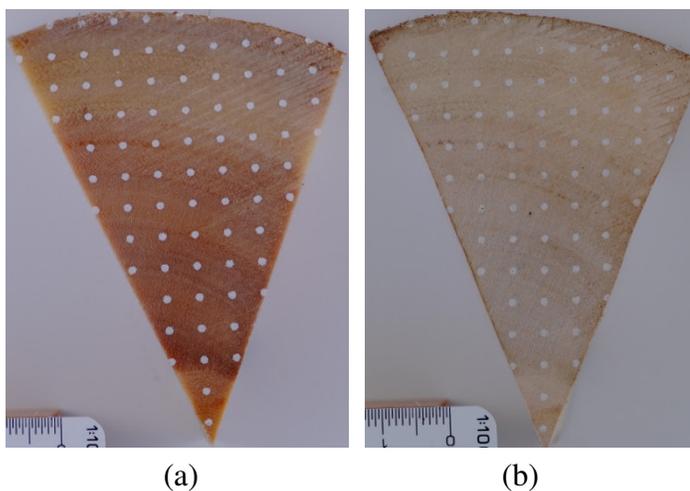


Figura 32 – Contraste entre imagens de uma mesma amostra saturada (a) e seca (b) com grade de pontos

### e) Conclusões

Com a realização desses testes auxiliares, pôde-se concluir que o cuidado no preparo das amostras, com um bom polimento da superfície em que será impressa a grade e um paralelismo o mais perfeito possível entre as faces opostas é mais importante do que o tipo de grade impressa. O acabamento da amostra garante uma boa qualidade de impressão e baixos níveis de perda de pontos de controle e, conseqüentemente, maior fidelidade na representação da deformação na obtenção do retículo representativo da TPS.

Com a automatização do processo de marcação dos pontos para a geração dos retículos da TPS tornou-se indiferente a utilização da grade de pontos ou de linhas. Contudo, optou-se por utilizar a grade de linhas contínuas para o estudo das deformações, pois apresentou maior facilidade no processo de impressão e melhor visualização das deformações diretamente na amostra.

### 3.5 Análises Estatísticas

A análise dos dados foi feita considerando-se cada método individualmente (TPS-cunha, TPS-NBR e NBR-NBR) e a comparação entre eles.

Nos estudos pelo método da TPS foram consideradas somente as deformações específicas por retração ( $\epsilon_r$ ) ocorridas entre os pontos de controle para restringir a análise à área da imagem correspondente à superfície do corpo-de-prova, cunha ou bloco da NBR.

Nos corpos-de-prova em forma de cunha, a análise da retração foi efetuada a 25, 50, 75 e 100% do raio, para verificar-se a variação medula-casca. Para a retração tangencial foi considerada a média das retrações entre os pontos de controle da linha mais externa de cada faixa, por estar mais próxima do anel de crescimento de menor curvatura da respectiva faixa. Para as retrações radiais foi considerada, em cada faixa, a média dos pontos da coluna central que passa pelo vértice da cunha, que contém a medula e que, portanto, apresenta a direção essencialmente radial.

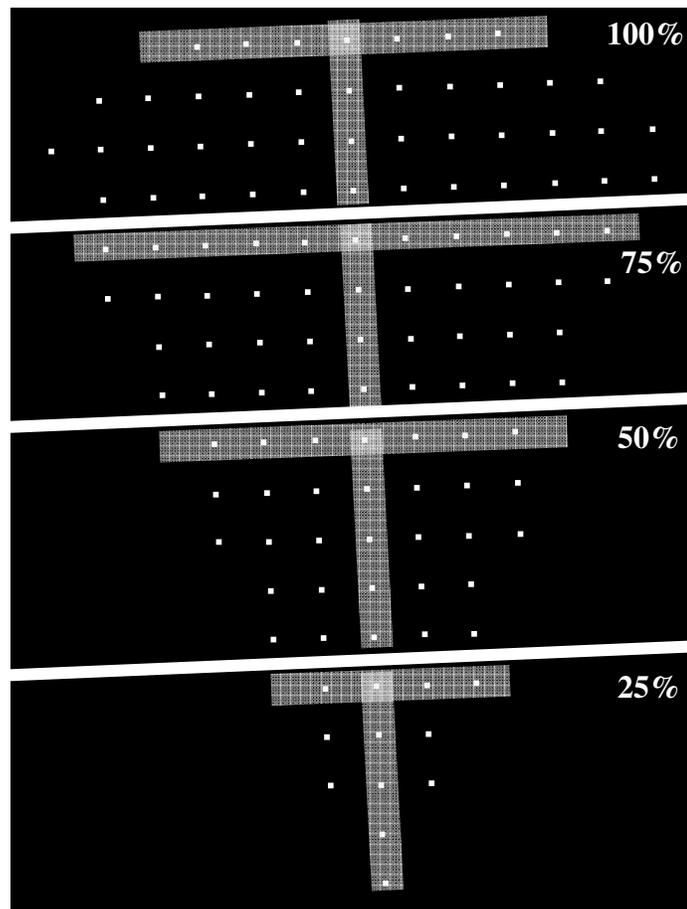


Figura 33 - Posições radiais e pontos considerados na análise estatística das retrações radiais (colunas) e tangenciais (linhas) dos corpos-de-prova em forma de cunha

Em todos os casos, o delineamento estatístico escolhido foi o inteiramente casualizado, com amostragem independente e cinco repetições. Foi utilizado o teste de Hartley para verificar a homogeneidade de variância e o teste F para análise de variância. Foram considerados os esquemas fatoriais  $3 \times 2 \times 4$  (espécie  $\times$  altura  $\times$  posição radial) para o estudo das variáveis obtidas dos corpos de prova em forma de cunha;  $3 \times 2$  (espécie  $\times$  altura) para o estudo das variáveis obtidas dos corpos-de-prova da NBR 7190/97 e dos discos de umidade; e  $3 \times 2 \times 3$  (espécie  $\times$  altura  $\times$  método) para o estudo das variáveis obtidas entre os métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR-NBR.

Na comparação entre os métodos, como o corpo-de-prova da NBR não possibilita a avaliação em diferentes pontos do raio, a análise na cunha foi feita para cada uma das quatro posições relativas do raio, ou seja, 25, 50, 75 e 100%, para permitir a comparação entre os métodos.

Foi aplicado o teste de Tukey, sempre que observadas diferenças significativas, ao nível mínimo de 5% de probabilidade, no teste F.

Toda a análise de variância efetuada com uso do programa de análises estatísticas SISVAR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item apresenta, inicialmente, os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados em amostras de *Eucalyptus sp* e de MDF e os ensaios de retração e inchamento realizados em amostras de *Pinus sp* e de *Eucalyptus sp* para a validação do método da Thin-plate Spline – TPS no que se refere à obtenção de deformações impostas e autoequilibradas. Na sequência estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de retração realizados com as amostras de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis*. Os resultados estão organizados segundo os métodos estudados. TPS-cunha ou simplesmente “cunha” refere-se à aplicação do método da TPS nos corpos-de-prova propostos, que tem a forma de cunha; TPS-NBR refere-se à aplicação do método da TPS nos corpos-de-prova da NBR 7190/97 e NBR que é o método dessa norma. As discussões foram elaboradas de forma a comparar esses métodos entre si.

### 4.1 Validação do método da Thin-plate Spline - TPS

#### a) Deformações impostas

Os ensaios de compressão realizados nas amostras de *Eucalyptus sp* com carga aplicada no sentido paralelo às fibras, e o ensaio com carga centralizada realizado na amostra de MDF não apresentaram magnitude suficiente para uma boa visualização e validação do método TPS pois as deformações foram muito pequenas. As análises foram feitas, então, somente nas imagens referentes aos ensaios com carga excêntrica, aplicada na amostra de *Eucalyptus sp* no sentido tangencial aos anéis de crescimento e na amostra de MDF, que apresentaram deformações mais visíveis. Foram utilizados somente os pares de imagens referentes ao início (amostra descarregada em repouso) e ao final do ensaio (amostra rompida) (Figura 34a e 34b).

Também foi testada a sensibilidade em relação ao número de pontos de controle utilizados para a obtenção da função TPS. Para tanto, utilizou-se os pares de imagem referentes ao ensaio de compressão tangencial com carga excêntrica na amostra de *Eucalyptus sp*, das quais foram suprimidos pontos de controle intermediários, de forma a dobrar a distância entre eles e reduzir o total pela metade (Figura 34d).

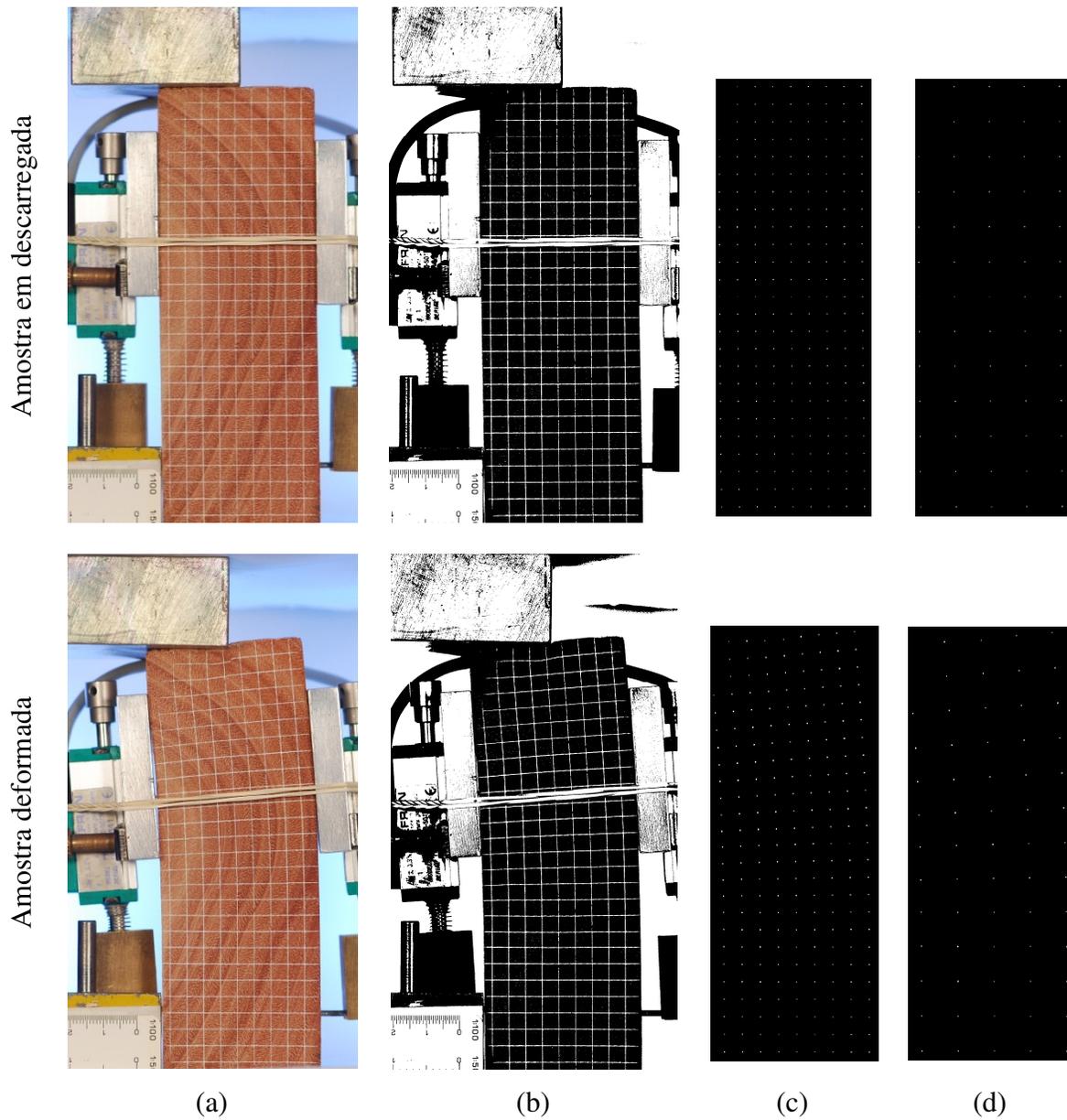


Figura 34 – Pares de imagens originais (a), binárias correspondentes (b), dos pontos de controle obtidos das inteseções das linhas e colunas (c) e retículo similar com metade dos pontos de controle (d) utilizados para obtenção do retículo da TPS no ensaio de compressão tangencial com carga excêntrica em amostra de *Eucalyptus sp*

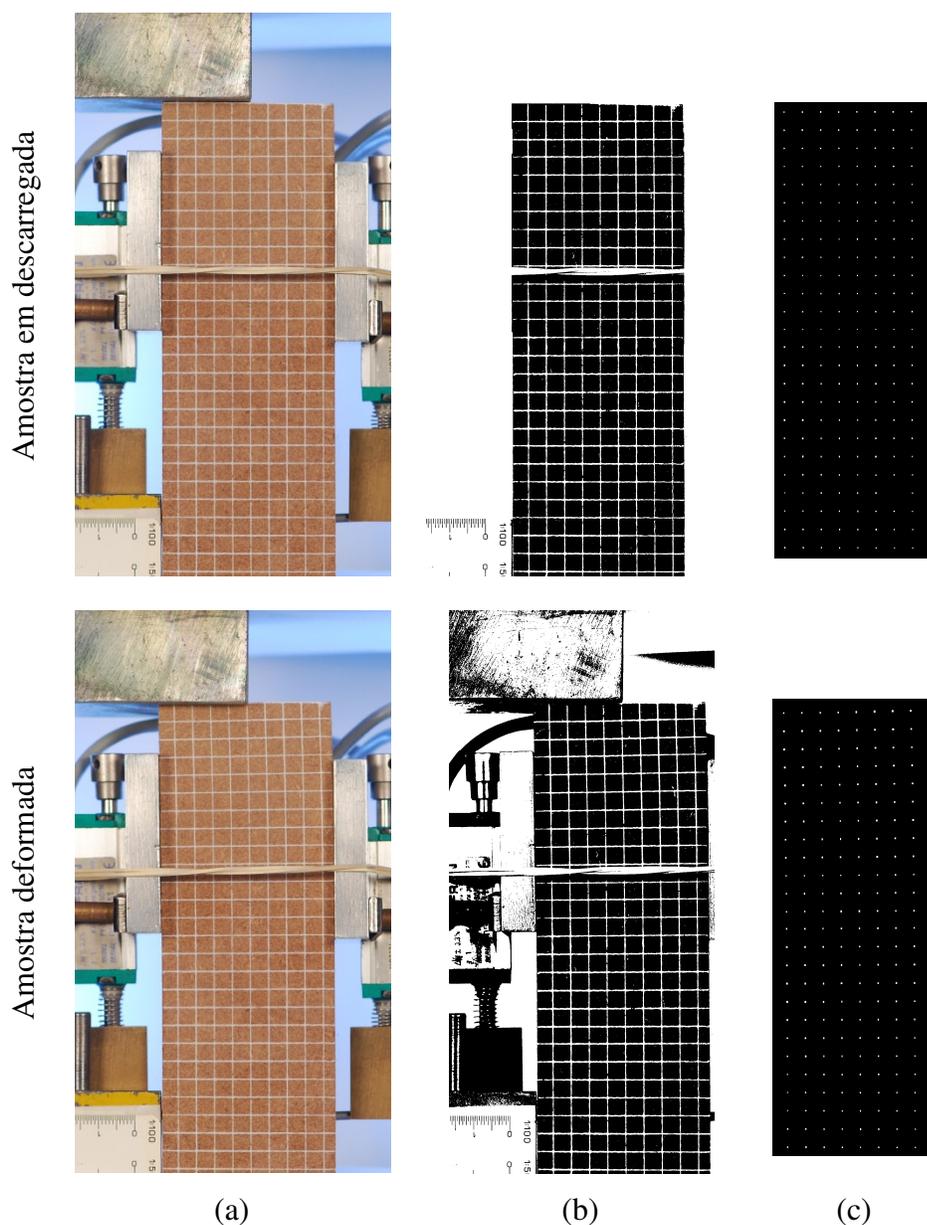


Figura 35 – Pares de imagens originais (a), binárias correspondentes (b) e dos pontos de controle obtidos das inteseções das linhas e colunas (c) utilizados para obtenção retículo da TPS no ensaio de compressão com carga excêntrica em amostra de MDF

O método TPS utiliza um polinômio interpolador para modelar a deformação em toda a superfície da amostra a partir dos pontos de controle da imagem disponibilizada para análise. O resultado foi representado através de um retículo que mostra a tendência de deformação (Figura 36).

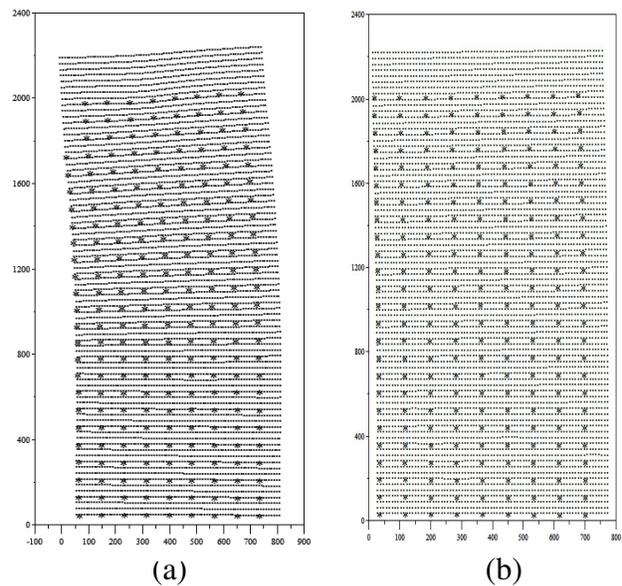


Figura 36 – Retículos resultantes da análise dos pares de imagens das amostras de *Eucalyptus sp* (a) e MDF (b)

Na sobreposição da grade da TPS à imagem binária da grade impressa nas amostras de *Eucalyptus* e MDF (Figura 37), observou-se que houve uma correspondência tanto dos pontos de controle como das linhas do retículo, mostrando que a função acompanha o deslocamento dos pontos e das linhas, o que prova a capacidade do método da TPS em detectar as deformações de forma plenamente coerente.

O mesmo aconteceu com uma redução do número de pontos de controle (Figura 38) de metade do caso anterior, significando que o método da TPS foi capaz de detectar as deformações impostas à amostra, não sendo necessária uma grande quantidade de pontos de controle. Mesmo com a redução do número de pontos de controle pela metade, foi possível ajustar o polinômio interpolador e obter a grade que representa a tendência da deformação.

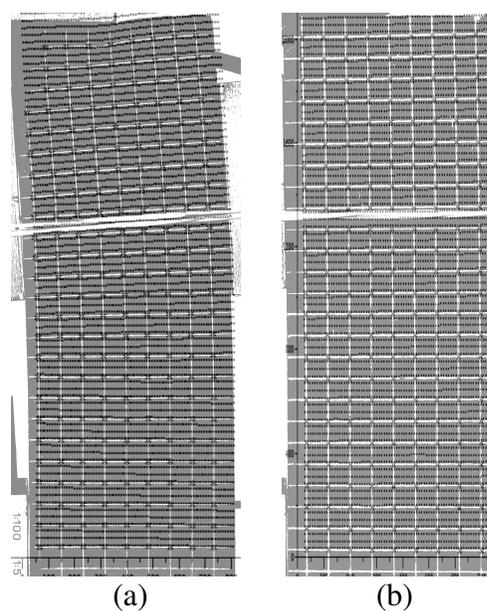


Figura 37 – Sobreposição da grade da TPS à imagem binária das amostras de *Eucalyptus* (a) e MDF (b) deformadas

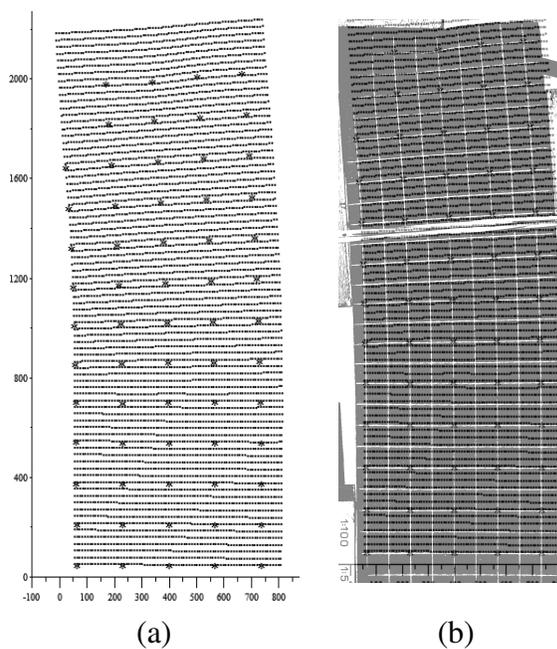


Figura 38 – Grade da TPS obtida com número reduzido de pontos de controle (a) e sua sobreposição à imagem binária da amostra deformada (b)

A Figura 39 mostra, pela sobreposição da grade obtida com a metade dos pontos àquela obtida com o número total de pontos, que não houve diferenças entre elas.

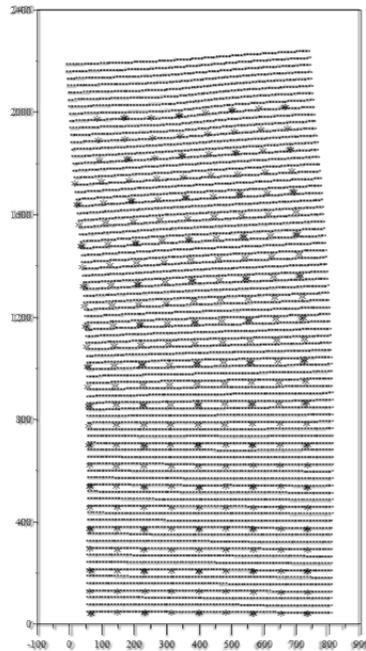


Figura 39 – Sobreposição do retículo da TPS obtida a partir da imagem binária com redução do número de pontos à grade TPS obtida a partir da imagem binária com o número total de pontos

### b) Deformações autoequilibradas

Na validação do método da TPS no estudo das deformações autoequilibradas, verificou-se que, além do método ser sensível às deformações, não houve influência do tipo de grade (linear ou de pontos) impressa nas amostras na obtenção do retículo produzido pela TPS, pois, em ambos os casos a interpolação modelada possibilitou a geração do retículo deformado que expressou de forma muito evidente as deformações sofridas pelas amostras, como mostram os exemplos da Figura 40.



Figura 40 – Retículos produzidos pela TPS através de funções interpoladoras ajustadas nos pares de imagens capturadas antes ( $U_{sat}$ ) e durante a secagem ( $U_0$ ) de amostras de *Eucalyptus* com grade linear (a) e de pontos (b)

A Figura 41a mostra como exemplo uma amostra deformada pela secagem ( $U_5$ ) sobreposta à mesma amostra no seu estado original ( $U_{sat}$ ) e a Figura 41b mostra o retículo produzido pela TPS sobreposto à imagem deformada ( $U_5$ ). Observou-se em todos os conjuntos de imagens que o retículo gerado pela TPS representa as deformações sofridas pela amostra e permite a evolução do estudo a partir desse ponto.

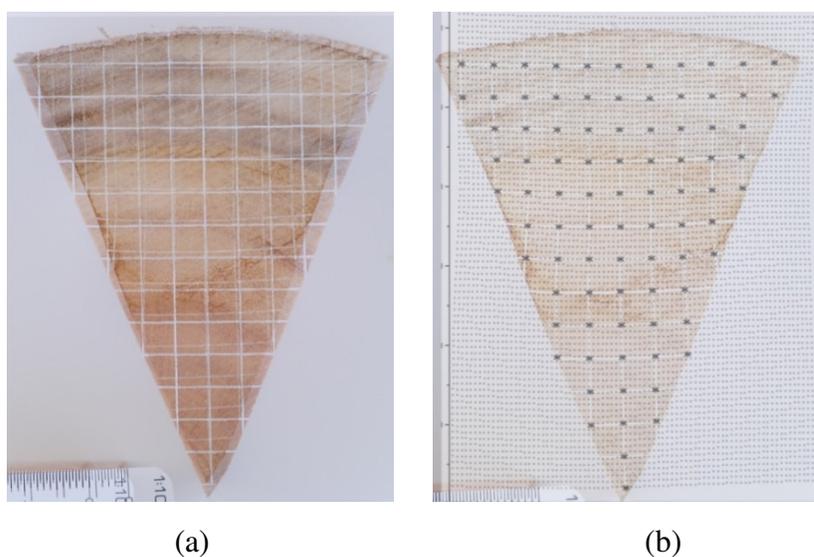


Figura 41 – Sobreposição da imagem da amostra deformada ( $U_5$ ) na imagem da amostra no estado original ( $U_{sat}$ ) (a) e do retículo da TPS na imagem da amostra deformada ( $U_5$ )

A grade de linhas também permitiu que na superposição do retículo da TPS na imagem original, confirme-se com mais confiabilidade, que o polinômio interpolador representa fielmente a deformação da superfície.

Concluiu-se então, que o método da TPS foi sensível aos deslocamentos impostos às amostras de madeira e MDF e também aos deslocamentos autoequilibrados, sendo capaz de representar graficamente a deformação sofrida. O programa desenvolvido ajusta um bom polinômio interpolador que modula a deformação em toda a superfície da amostra, tanto para as deformações impostas como para as autoequilibradas e permite obter os dados necessários para o cálculo das deformações relativas entre pontos do retículo.

#### **4.2 Método TPS-Cunha**

Os resultados obtidos a partir do processamento e análise digital de imagens utilizando o método da TPS nos corpos-de-prova em forma de cunha estão representados graficamente na Figura 42. Observa-se pela comparação entre o retículo gerado e as imagens das amostras nos instantes saturada e seca a 0%, que, assim como no teste de validação, o método representou fielmente as deformações ocorridas. Com isso, foi possível a construção dos gráficos de superfície apresentados nas Figura 43 e 44, e que representam as variações das retrações radiais e tangenciais entre os pontos de controle e obter os dados para o cálculo das retrações, bem como efetuar as análises apresentadas em seguida.

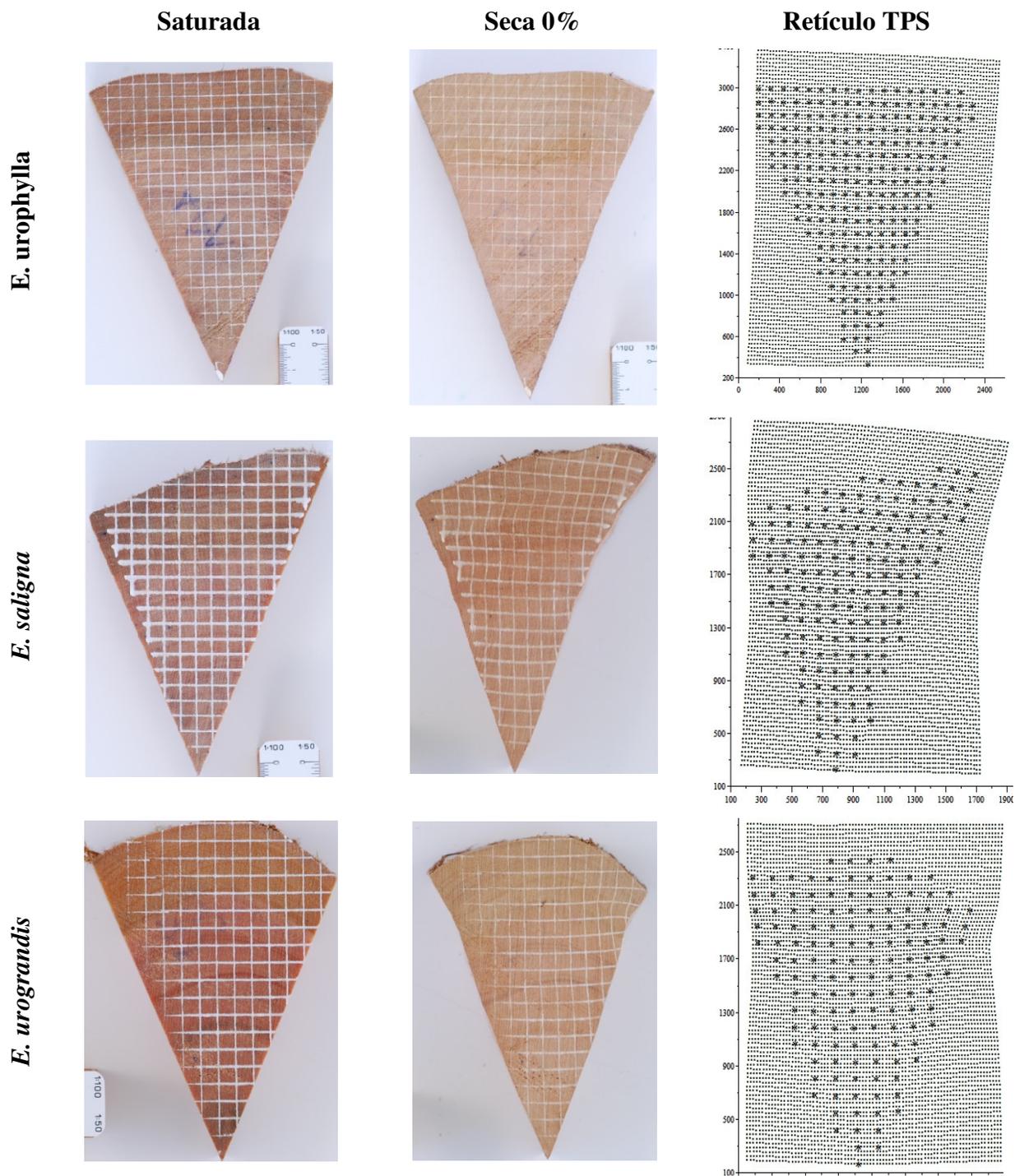


Figura 42 – Amostras do corpo-de-prova proposto em forma de cunha fotografados nos instantes saturado e seco e respectivos retículos gerados pelo método da TPS que representa as deformações ocorridas

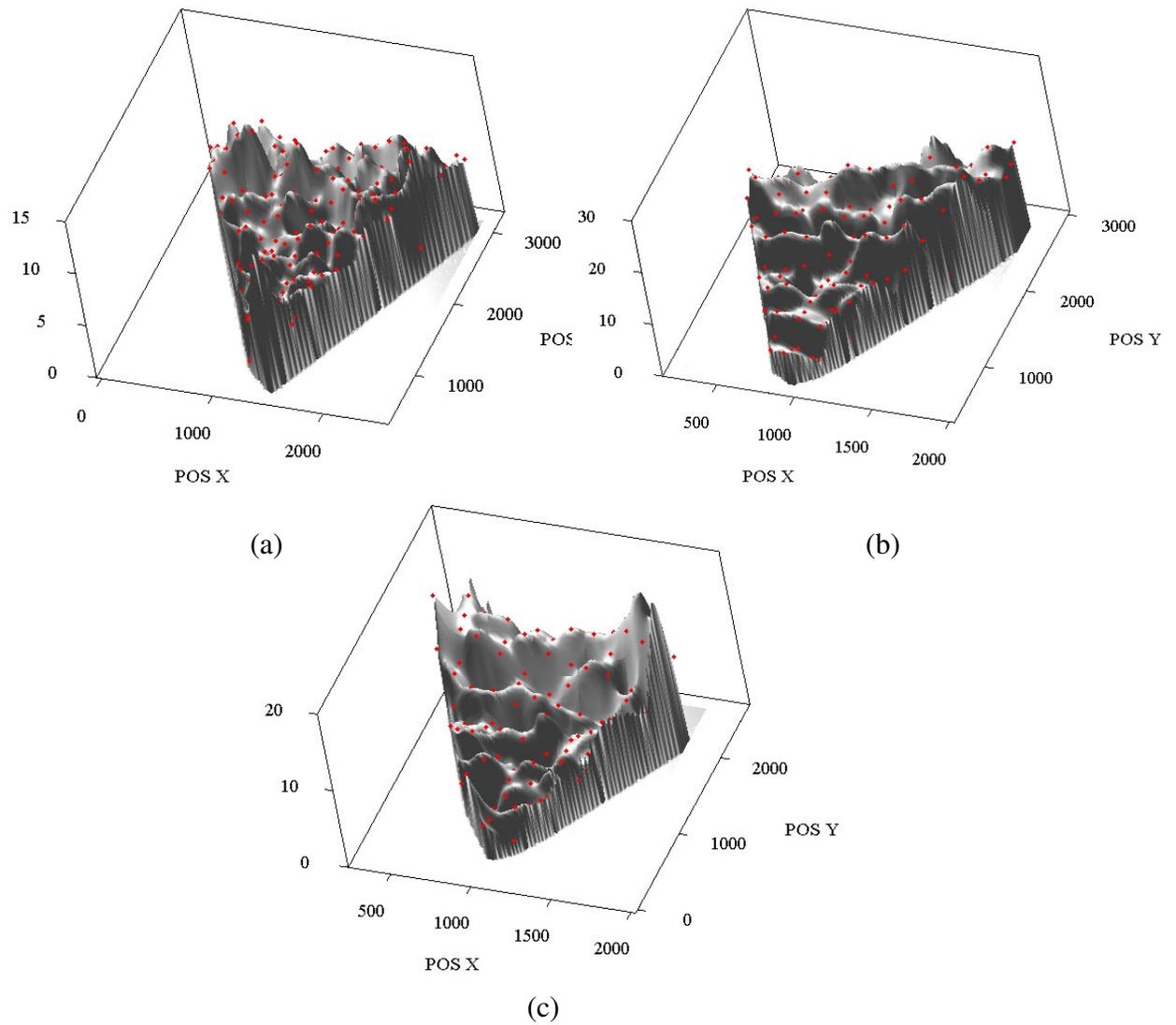


Figura 43 – Variação das retrações radiais entre os pontos de controle em amostras de *E. urophylla* (a), *E. saligna* (b) e *E. urograndis* (c) ao longo da superfície da cunha

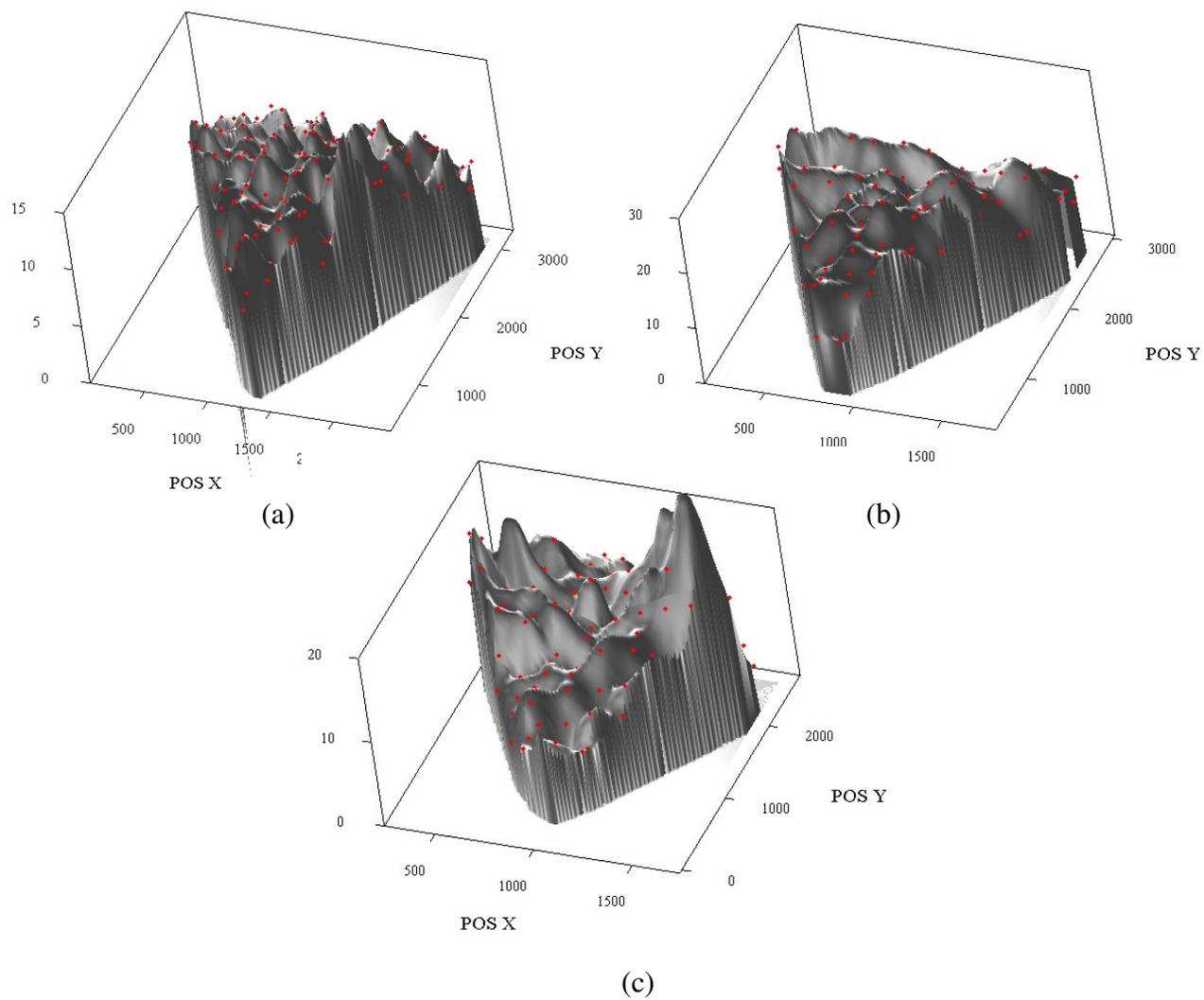


Figura 44 – Variação das retrações tangenciais entre os pontos de controle em amostras de *E. urophylla* (a), *E. saligna* (b) e *E. urograndis* (c) ao longo da superfície da cunha

Na análise de variância apresentada na Tabela 1 verifica-se que as retrações radial e tangencial calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS nos corpos de prova em forma de cunha, ou simplesmente “método da cunha”, apresentaram diferenças estatísticas significativas, ao nível mínimo de 5% de probabilidade, entre as espécies, entre posições longitudinais e entre posições radiais da tora na seção transversal do disco. As interações espécie-posição longitudinal e espécie-posição radial não foram significativas, indicando que tanto a posição longitudinal quanto a posição radial apresentam os mesmos comportamentos em todas as espécies. No entanto, as retrações calculadas nas quatro posições radiais possuem comportamentos diferenciados nas duas posições longitudinais analisadas, pois a interação posição longitudinal-posição radial foi significativa ao nível de 3,19% de probabilidade, no caso da retração radial, e de 1% de probabilidade, no caso da retração tangencial.

Tabela 1 - Tabela de análise de variância para as retrações radial ( $\varepsilon_{r,2}$ ) e tangencial ( $\varepsilon_{r,3}$ ) calculadas pelo método da TPS no corpo-de-prova em forma de cunha

Causa de variação	Graus de Liberdade	Prob>F	
		$\varepsilon_{r,2}$	$\varepsilon_{r,3}$
Espécie (E)	2	0,0000	0.0000
Posição Longitudinal (L)	1	0,0000	0.0234
Posição Radial (R)	3	0,0000	0.0023
E x L	2	0,8562	0.8465
E x R	6	0,1731	0.4682
L x R	3	0,0319	0.0152
E x L x R	6	0,0504	0.0490
Resíduo	96		
Total	119		

Como pode ser observado na Figura 45, as menores retrações foram encontradas para a o *E. urophylla* e as maiores para o *E. saligna*. O *E. urograndis* apresentou valor intermediário.

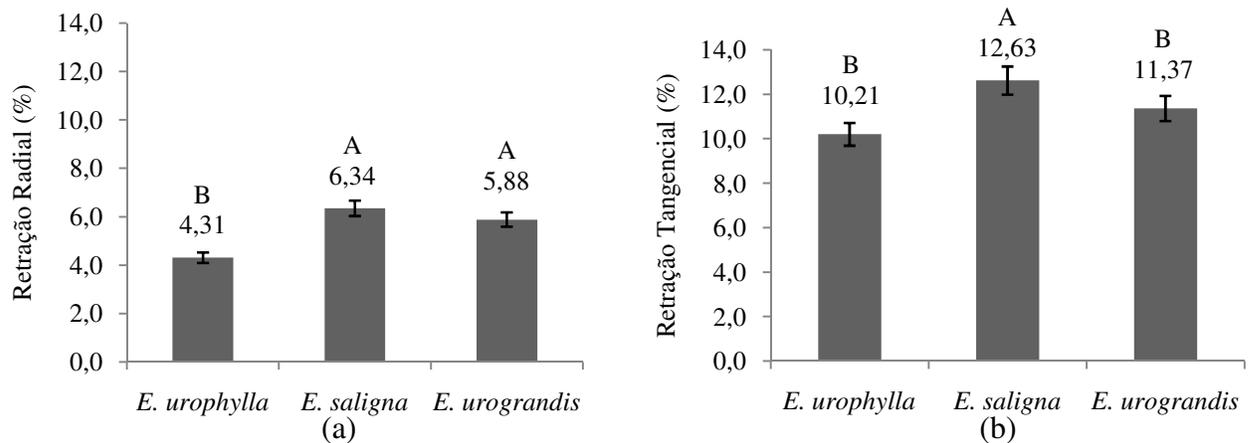


Figura 45 - Média das retrações radial (a) e tangencial (b) dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

Em relação à altura a Figura 46 mostra que a retração radial na tora da base foi inferior à da tora adjacente superior enquanto que na retração tangencial ocorreu o inverso, isto é, na tora basal ocorreram os maiores valores. Esse comportamento se repetiu em todas as espécies, como pode ser observado nos gráficos da Figura 47. Em ambos os casos a espécie que apresentou os menores valores de retração radial foi o *E. urophylla* e a maior o *E. saligna*. Entre as espécies *E. saligna* e *E. urograndis* não houve diferenças.

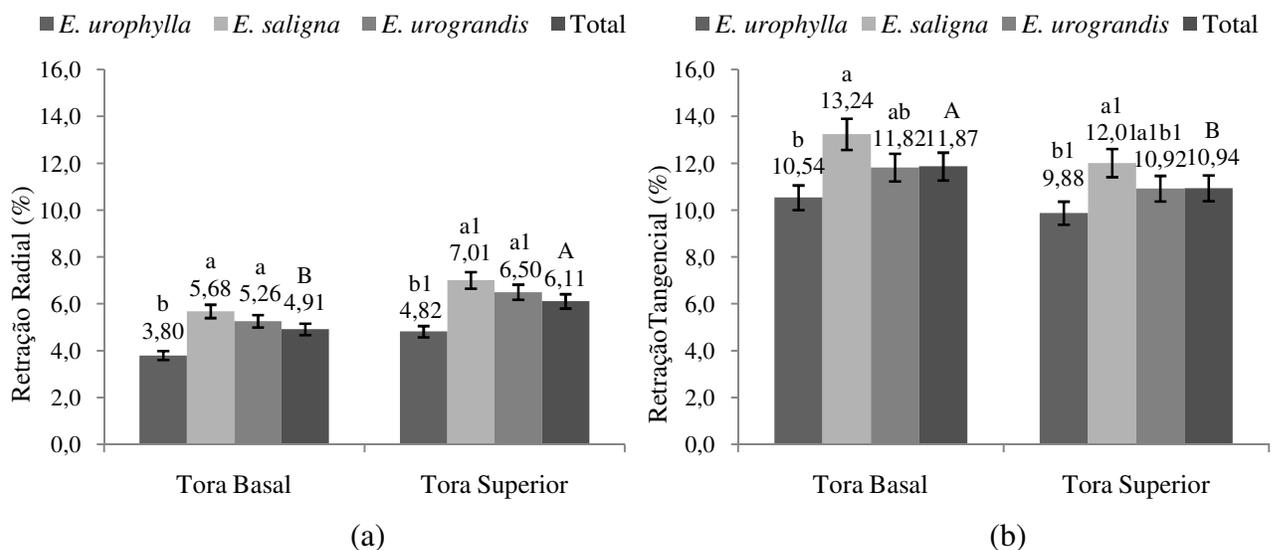


Figura 46 - Média das retrações radiais (a) e tangenciais (b) de espécies dentro de toras calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

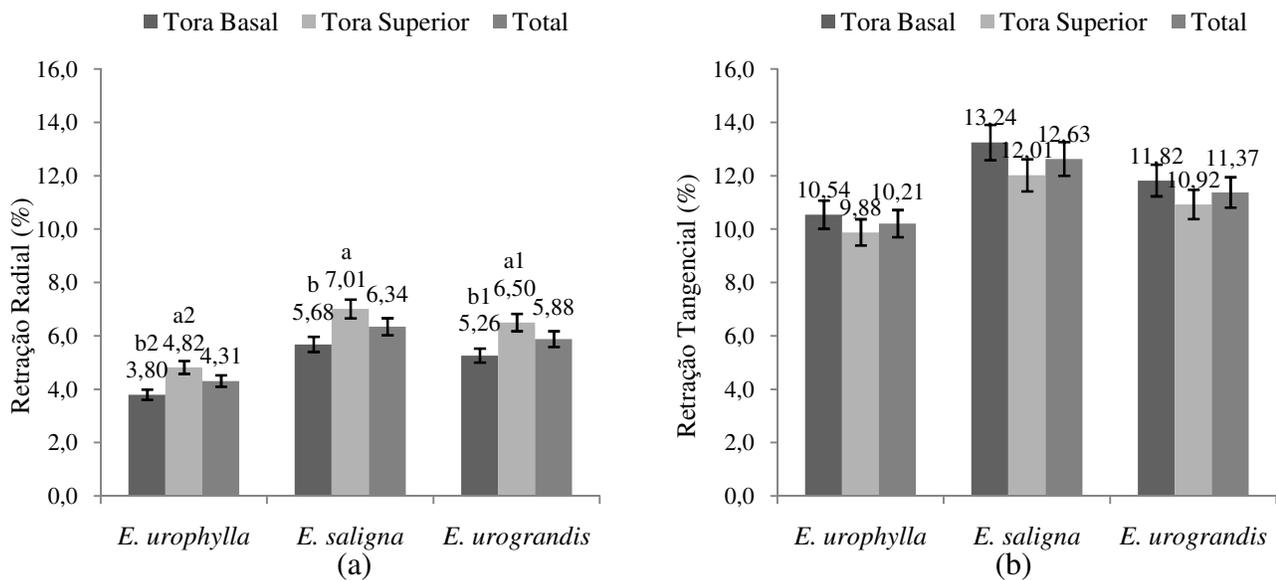


Figura 47 - Retrações radiais (a) e tangenciais (b) de toras dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

No sentido da medula para a casca, a Figura 48 mostra que as retrações radiais foram menores na faixa situada a 50% do raio e as maiores a 100%. Entre as porções a 25 e 75 % não foram encontradas diferenças estatísticas significativas. Em todas as posições, a retração radial foi maior para as espécies *E. saligna* e *E. urograndis*.

No caso das retrações tangenciais, verifica-se na Figura 49 que os valores cresceram no sentido da medula para a casca até a faixa de 75% do raio. Em todas as posições, as maiores retrações tangenciais foram encontradas para as espécies *E. saligna* e *E. urograndis*.

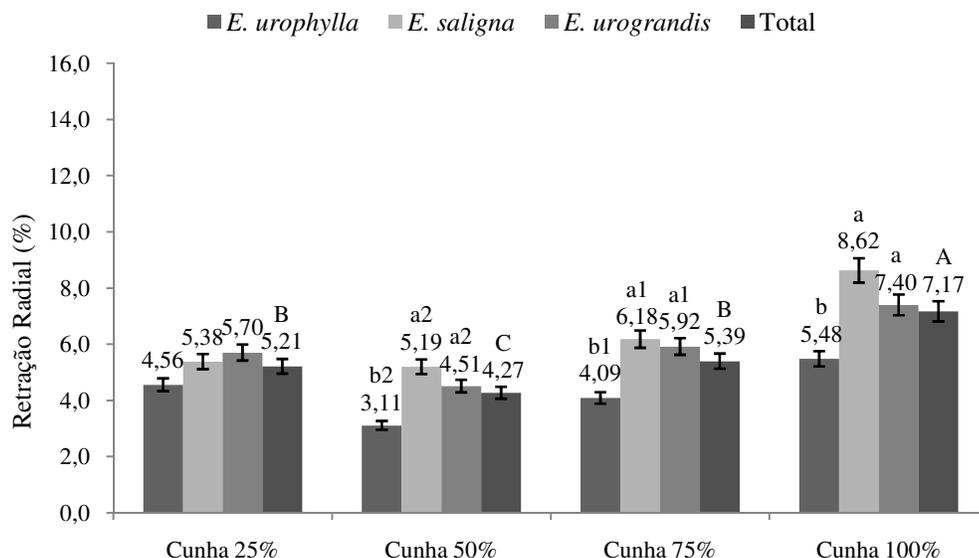


Figura 48 - Média das retrações radiais de espécies dentro de posições radiais medula-casca calculadas partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

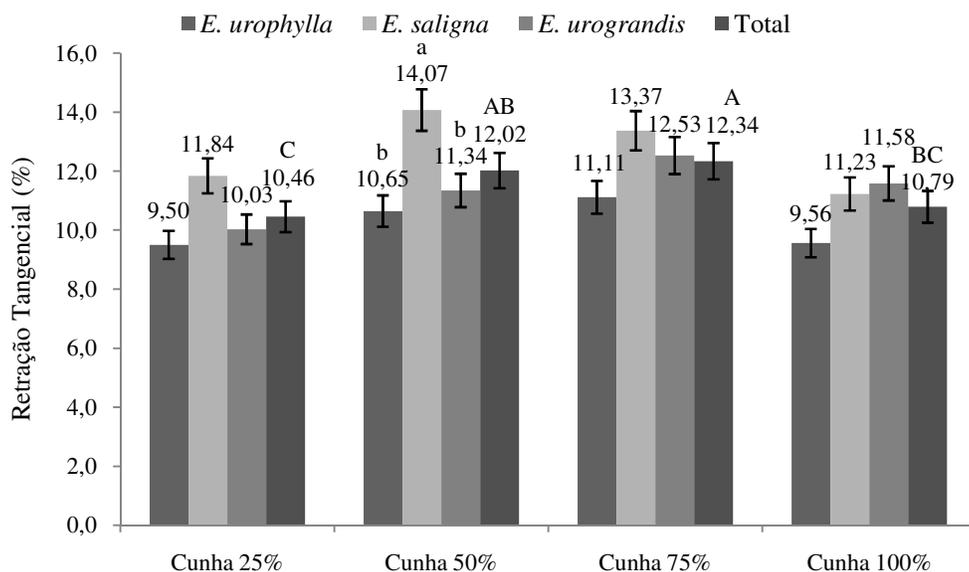


Figura 49 - Média das retrações tangenciais de espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* analisadas no sentido da medula para a casca calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da cunha

O comportamento das retrações radiais e tangenciais foi o mesmo para todas as espécies, como pode ser observado nos gráficos das Figura 50 e 51, respectivamente. Na espécie *E. urophylla* a retração radial a 50% do raio foi significativamente menor do que nas demais, mas não foi diferente das faixas a 25% e 75%. Nas espécies *E. saligna* e *E. urograndis* a retração

radial a 100% do raio foi significativamente maior. Além disso, para a espécie *E. saligna* a retração tangencial a 50% do raio foi significativamente maior, mas não foi diferente das faixas a 25% e 75% e a retração a 100% do raio foi significativamente menor.

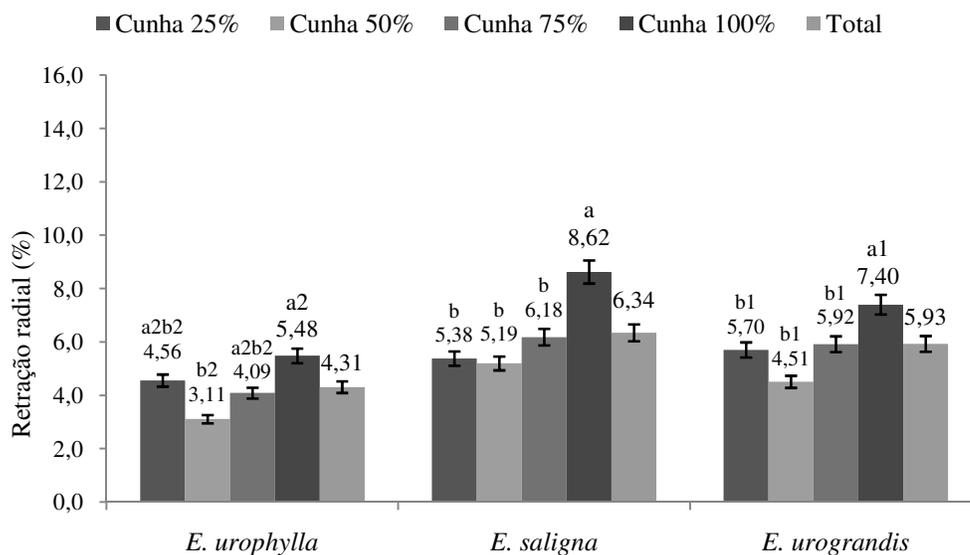


Figura 50 - Retrações radiais de posições radiais medula-casca dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

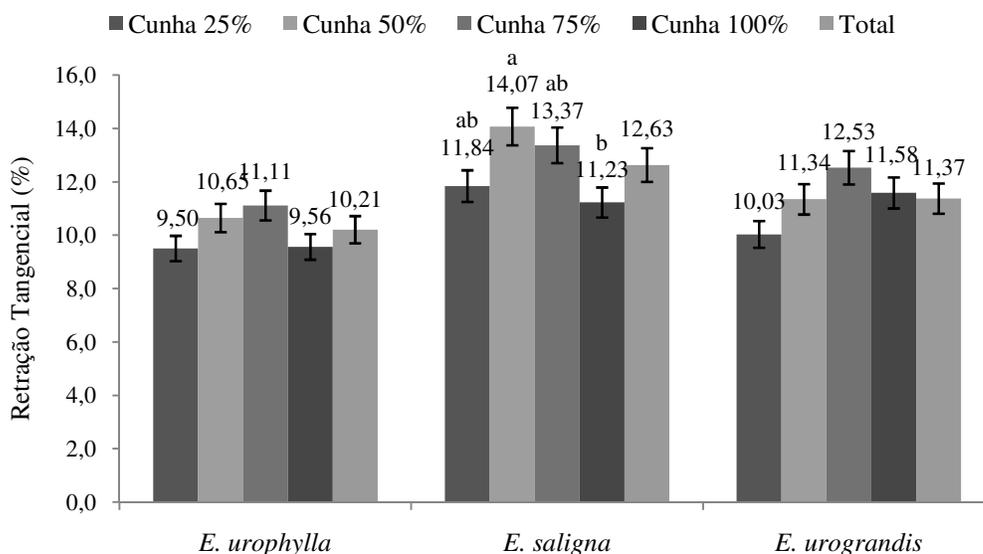


Figura 51 - Retrações tangenciais posições radiais medula-casca dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

Maiores retrações tangenciais na região mais periférica da tora eram esperadas, uma vez que aí ocorrem maiores proporções de madeira de direção tangencial devido à menor curvatura dos anéis de crescimento. Ocorreu contrariamente ao esperado a 100% do raio e as retrações tangenciais ficaram abaixo, tendo sido menores do que aquelas da faixa de 75% do raio e não se diferenciaram significativamente das menores retrações tangenciais obtidas na faixa de 25% do raio. As retrações tangenciais foram, como esperado, bastante superiores às retrações radiais. As variações de retrações observadas, ficaram evidentes em gráficos tridimensionais, como os exemplos da Figura 52, elaborados a partir das coordenadas (x,y) dos pontos de controle obtidos nas análises das imagens pelo método da TPS.

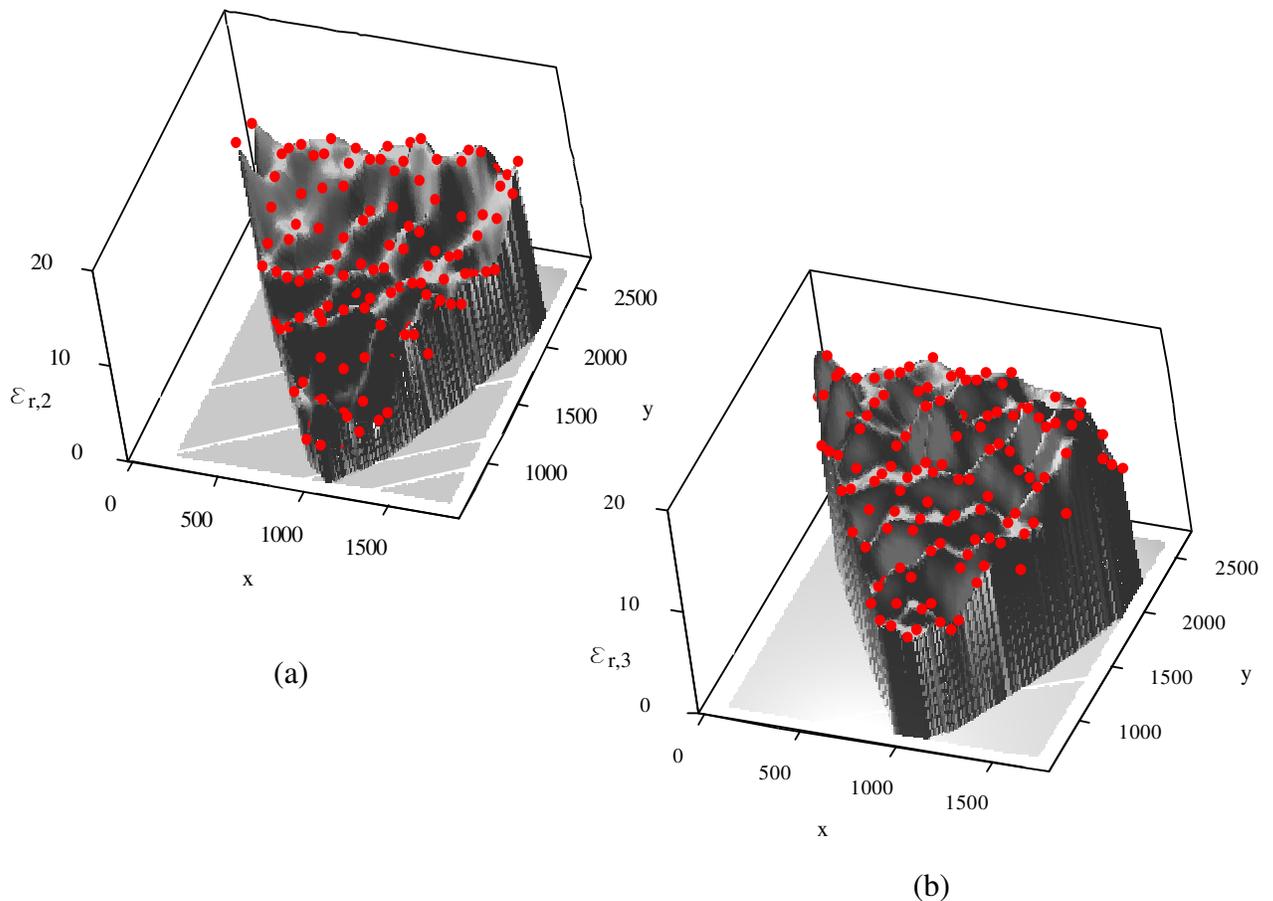


Figura 52 – Variação das retrações radial (a) e tangencial (b) na superfície de um corpo-de-prova em forma de cunha

Em relação às espécies, nas diferentes porções das cunhas, o *E. urophylla* sempre apresentou as menores retrações radiais e tangenciais. A espécie *E. saligna* apresentou as maiores retrações em quase todas das faixas. As exceções foram para a retração radial na faixa de 25% do

raio e para a retração tangencial a 100% do raio, nas quais o *E. urograndis* apresentou os maiores valores. Estatisticamente, porém, não existem diferenças entre *E. saligna* e *E. urograndis*.

Na interação posição longitudinal-posição radial as retrações radiais e tangenciais no sentido da medula para a casca, se comportaram de forma diferenciada para as duas posições longitudinais analisadas. As retrações radiais (Figura 53a) foram significativamente maiores na faixa de 100% do raio tanto da tora basal quanto na adjacente superior. Já as retrações tangenciais (Figura 53b) foram maiores nas faixas de 25% a 75% do raio na tora basal, enquanto que na tora adjacente superior, elas abrangeram a faixa que vai de 50% a 100%. Na faixa de 100% do raio as toras basais apresentaram as menores retrações tangenciais.

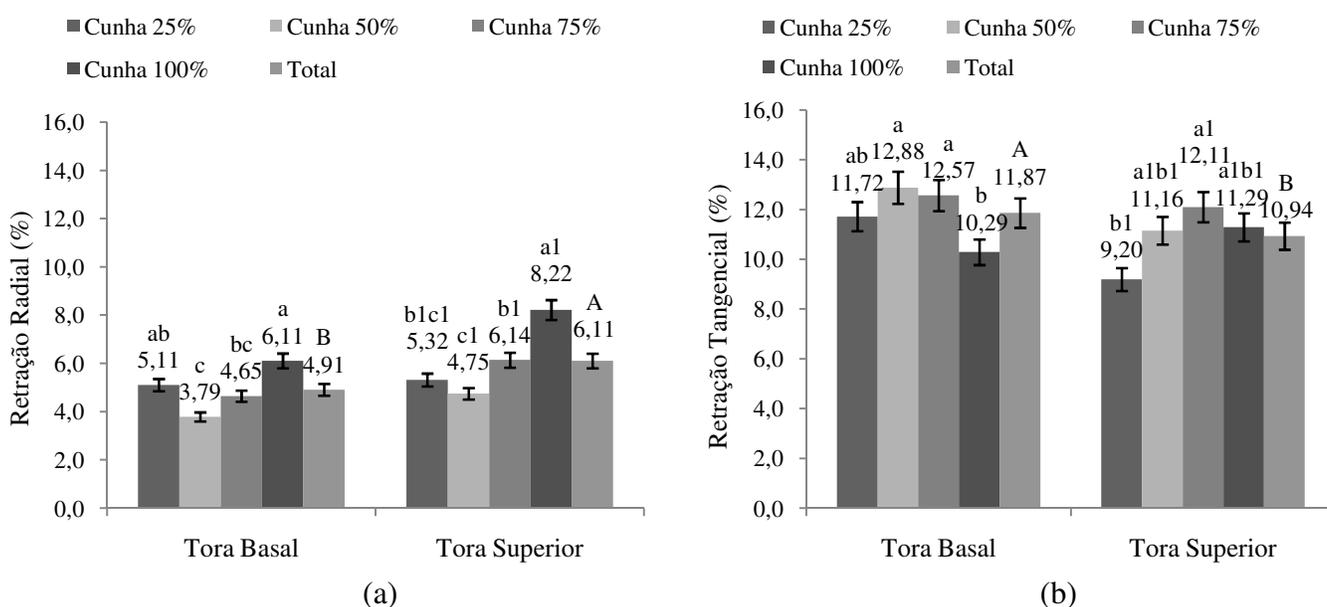


Figura 53 - Retrações radiais (a) e tangenciais (b) de posições radiais dentro de toras basais calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

Em relação às espécies, as retrações radiais no sentido da medula para a casca, apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade para as duas posições longitudinais estudadas. A Figura 54 mostra que, na tora da base a 25% do raio, não houve diferenças entre espécies. A 50% e 75% do raio, a espécie *E. saligna* retraiu mais e a espécie *E. urophylla* retraiu menos. A 100% do raio as maiores retrações radiais foram para a espécie *E. urograndis*. Na tora superior a 25% e 50% do raio também não foram encontradas diferenças entre as espécies. A 75% do raio as espécies *E. saligna* e *E. urograndis* apresentaram as maiores

retrações radiais e a espécie *E. urophylla* as menores. A 100% do raio a maior retração foi da espécie *E. saligna* e a menor do *E. urophylla*.

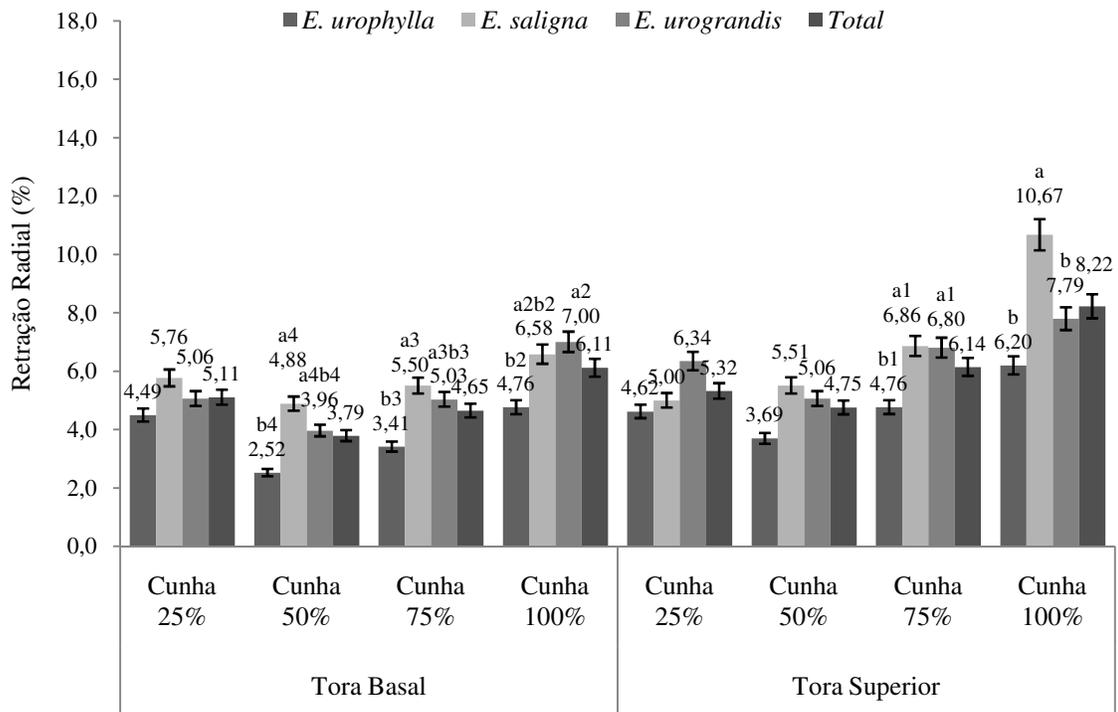


Figura 54 - Média das retrações radiais de espécies dentro de posições radiais medula-casca e dentro de toras calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

As retrações tangenciais no sentido da medula para a casca, também apresentaram diferenças estatísticas ao nível inferior a 5% de probabilidade para as duas posições longitudinais estudadas. De acordo com a Figura 55, na tora da base a 25 e 50% do raio, a retração tangencial foi significativamente maior para a espécie *E. saligna*. A 75 e 100% da tora da base não foram encontradas diferenças entre as espécies, sendo que as maiores retrações foram para a espécie *E. urograndis* e as menores para o *E. urophylla*. Em todas as posições radiais das toras superiores não houve diferença entre as espécies, sendo que o *E. urophylla* apresentou as menores retrações. A 25% do raio o *E. urograndis* retraiu mais e nas demais posições a maior retração foi da espécie *E. saligna*.

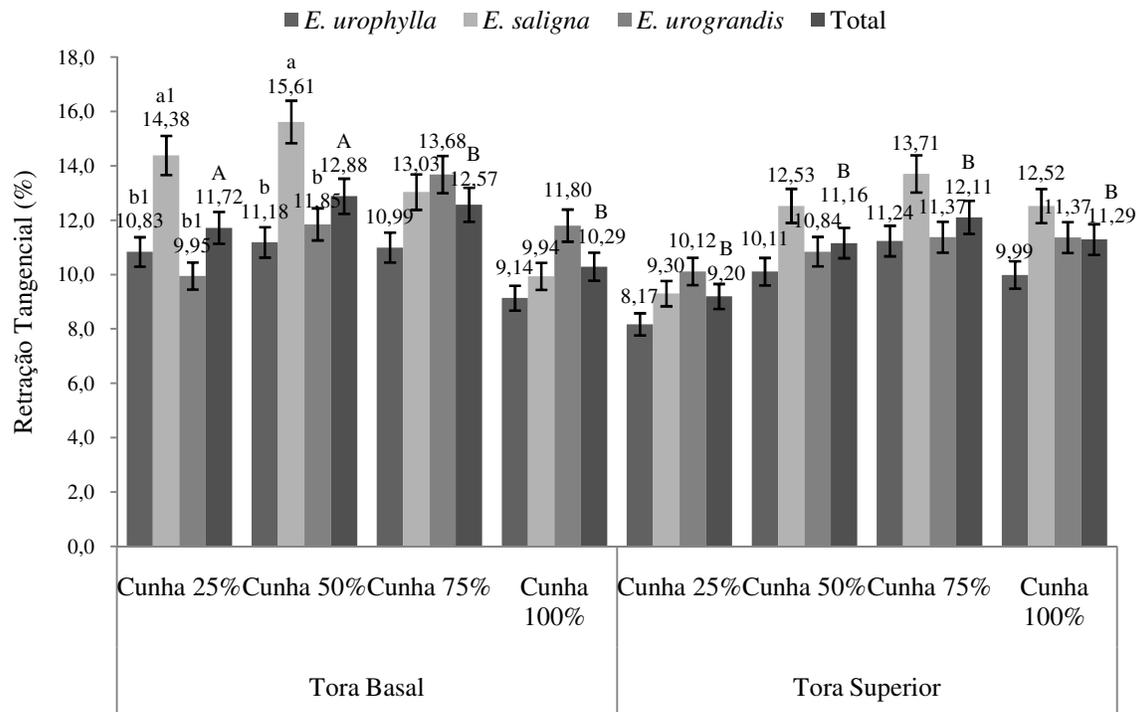


Figura 55 - Média das retrações tangenciais de espécies dentro de posições radiais medula-casca e dentro de toras calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método TPS-cunha

### 4.3 Método da NBR aplicado ao corpo-de-prova normatizado

No estudo das retrações radiais e tangenciais pelo método especificado na NBR7190/97, de acordo com a tabela de análise de variância apresentada na Tabela 2, não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre as espécies, o que pode ser confirmado pelos gráficos da Figura 56.

Tabela 2 - Tabela de análise de variância para as retrações radial ( $\epsilon_{r,2}$ ) e tangencial ( $\epsilon_{r,3}$ ) calculadas pelo método da NBR nos corpos-de-prova normatizados

Causa de variação	Graus de Liberdade	Prob>F	
		$\epsilon_{r,2}$	$\epsilon_{r,3}$
Espécie (E)	2	0.5636	0.7673
Posição Longitudinal (L)	1	0.1185	0.2894
E x L	2	0.2535	0.7745
Resíduo	24		
Total	29		

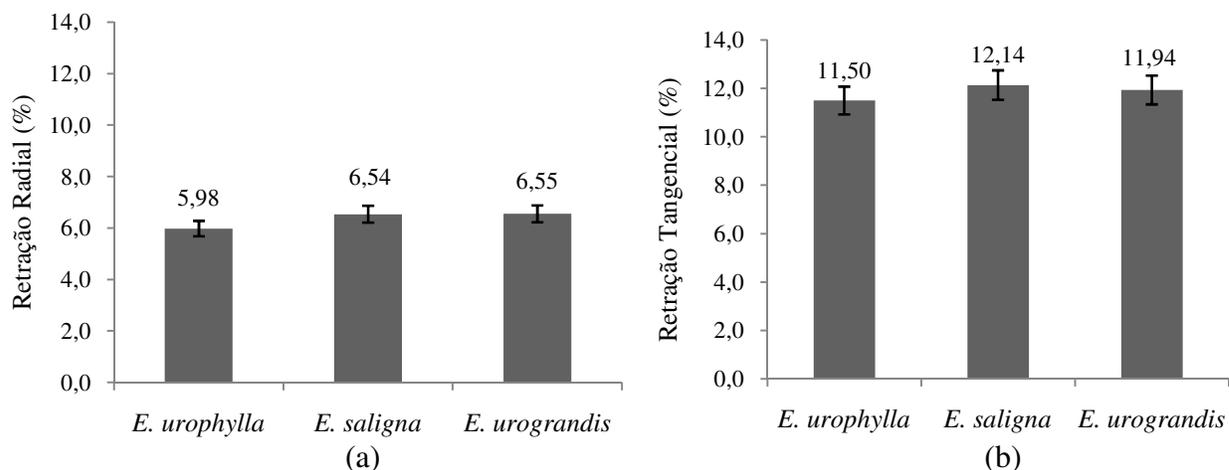


Figura 56 - Média das retrações radial (a) e tangencial (b) dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da NBR7190/97 no corpo-de-prova normatizado

A Figura 57 mostra que a posição longitudinal também não teve influência nas retrações radiais e tangenciais calculadas pelo método da NBR nos corpos-de-prova normatizados. Não houve diferenças entre os valores obtidos para a tora basal e adjacente superior, comportamento que se repetiu para todas as espécies, como pode ser verificado nos gráficos da Figura 58. Observa-se na Figura 58a, que para as espécies *E. saligna* e *E. urograndis*, as retrações radiais foram maiores nas toras superiores. Já para a retração tangencial as maiores retrações ocorreram nas toras basais como mostra a Figura 58b. Estatisticamente, porém, essas diferenças não foram significativas.

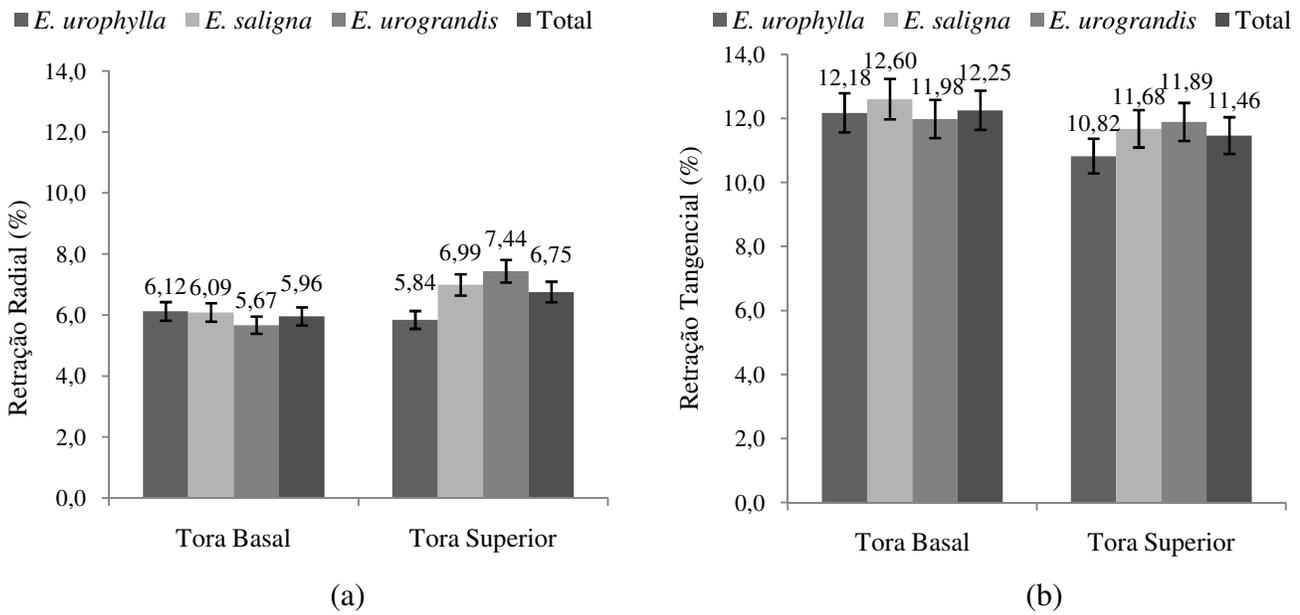


Figura 57 - Média das retrações radiais (a) e tangenciais (b) de espécies dentro de toras calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da NBR7190/97 no corpo-de-prova normalizado

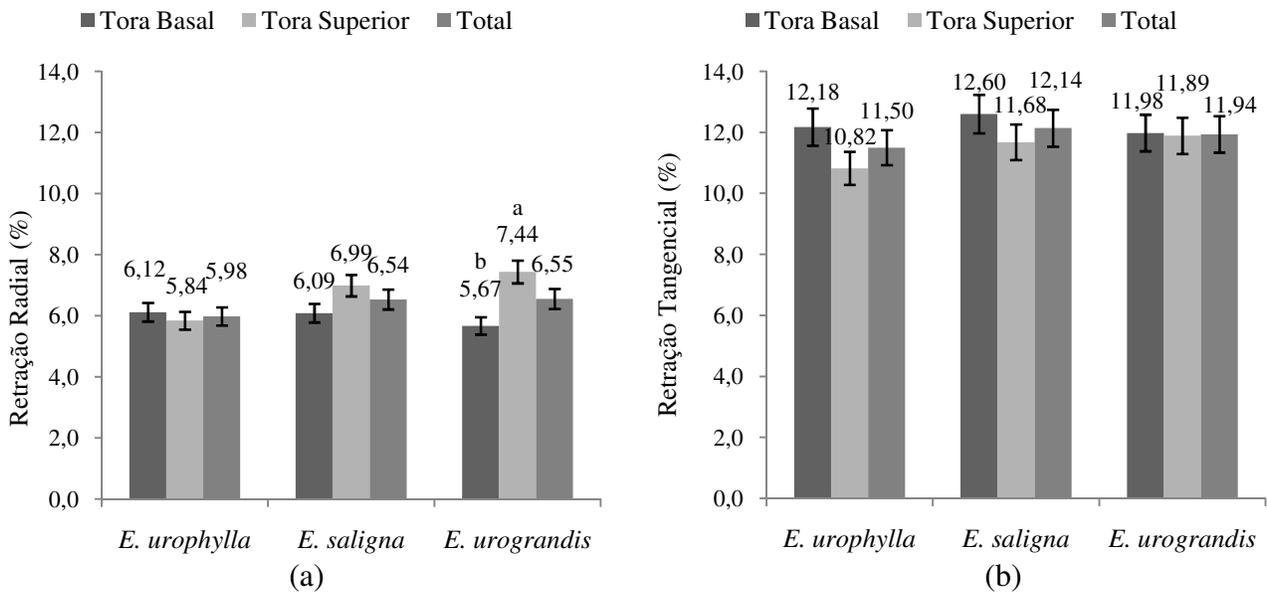


Figura 58 - Retrações radiais (a) e tangenciais (b) de toras dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da NBR7190/97 no corpo-de-prova normalizado

#### 4.4 Método da TPS aplicado ao corpo-de-prova normalizado pela NBR

A Tabela 3 mostra que as retrações radiais e tangenciais calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS no corpo-de-prova normalizado não apresentaram diferenças estatísticas significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as espécies e entre as posições longitudinais, o que pode ser confirmado graficamente nas Figura 59 e 60, respectivamente.

Tabela 3 - Tabela de análise de variância para as retrações radial ( $\varepsilon_{r,2}$ ) e tangencial ( $\varepsilon_{r,3}$ ) calculadas pelo método da TPS nos corpos-de-prova normalizados

Causa de variação	Graus de Liberdade	Prob>F	
		$\varepsilon_{r,2}$	$\varepsilon_{r,3}$
Espécie (E)	2	0.9192	0.6900
Posição Longitudinal (L)	1	0.1341	0.6564
E x L	2	0.5416	0.4834
Resíduo	24		
Total	29		

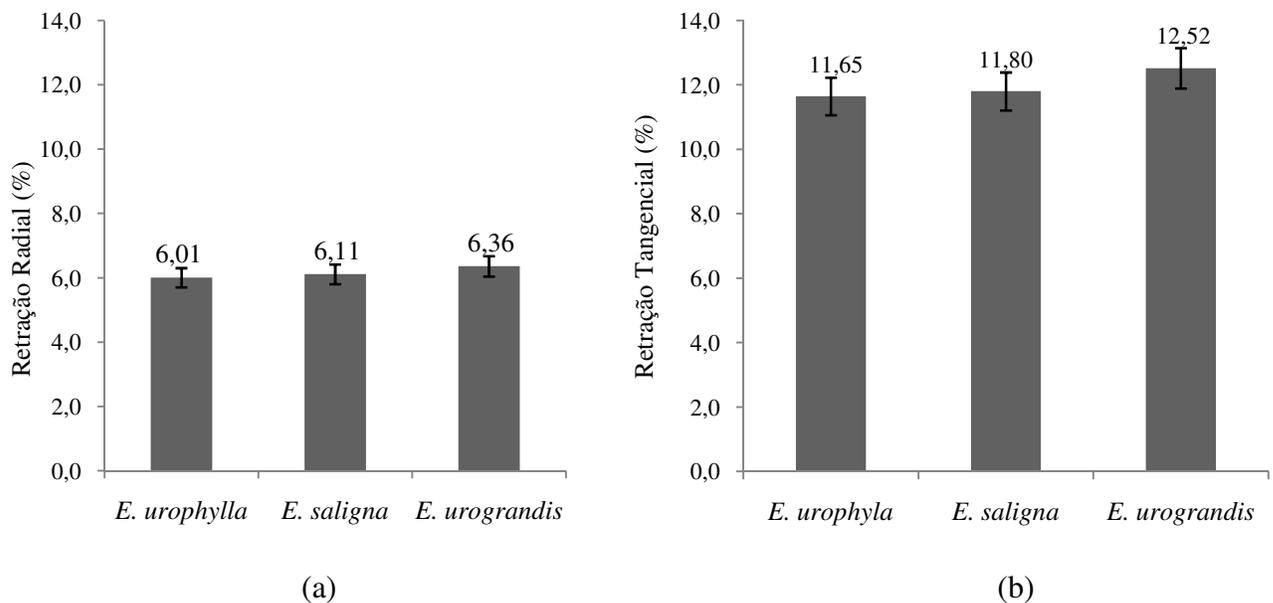


Figura 59 - Média das retrações radial (a) e tangencial (b) dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS no corpo-de-prova normalizado pela NBR

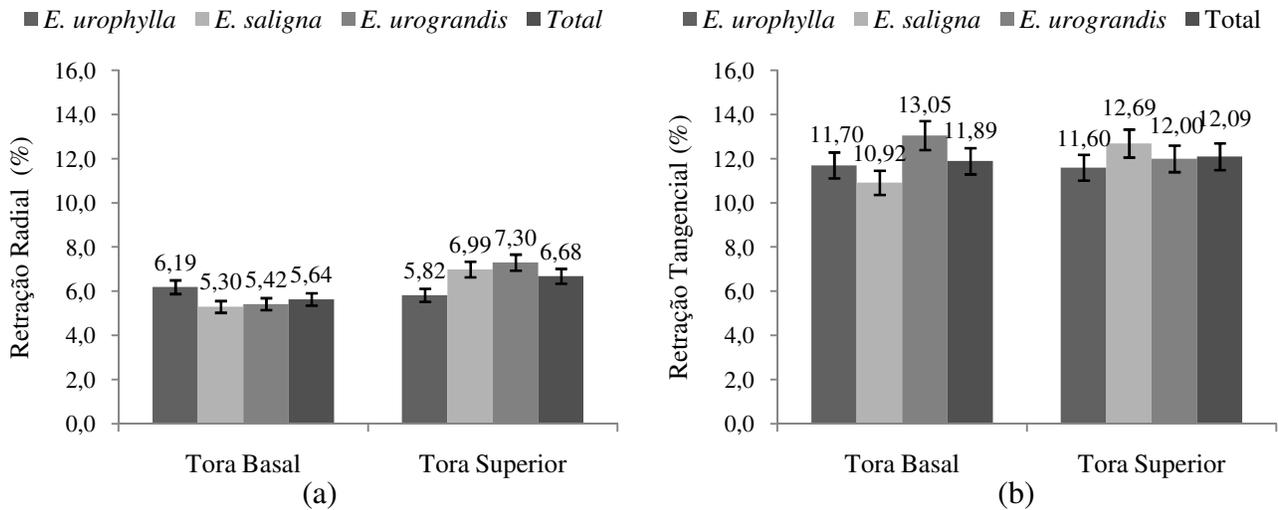


Figura 60 - Média das retrações radiais (a) e tangenciais (b) de espécies dentro de toras calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS no corpo-de-prova normatizado

A interação espécie-posição longitudinal também não foi significativa. Isso mostra que as retrações calculadas para as duas posições longitudinais estudadas apresentaram o mesmo comportamento em todas as espécies. A Figura 61 mostra que as retrações radiais e tangenciais na espécie *E. saligna* e a retração radial na espécie *E. urograndis* foram maiores na tora adjacente superior. A diferença, porém, não foi significativa.

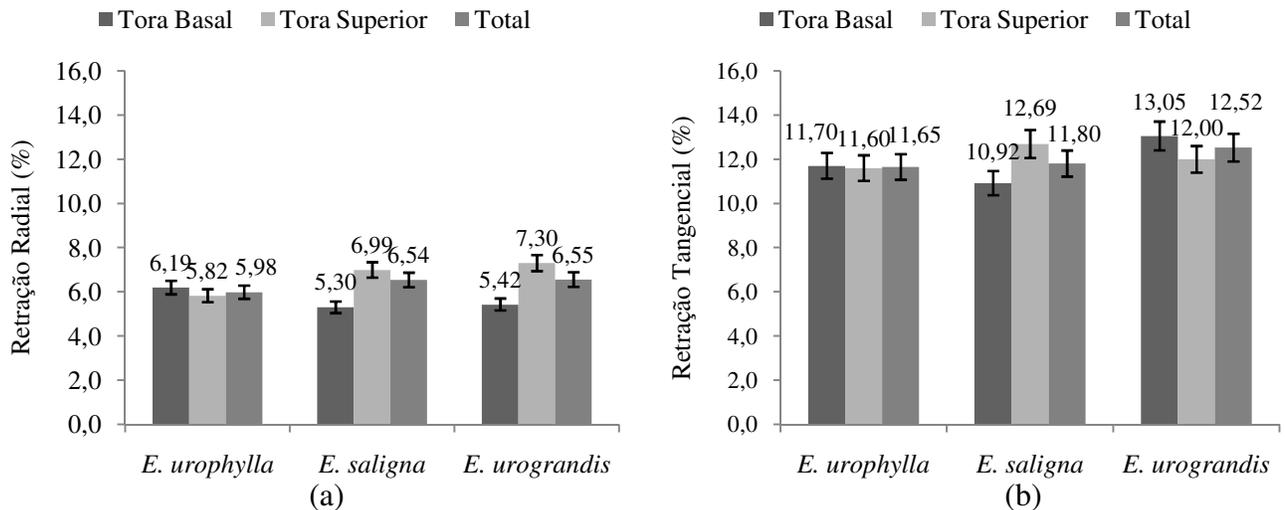


Figura 61 - Retrações radiais (a) e tangenciais (b) de tora dentro de espécies calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS no corpo-de-prova normatizado

#### 4.5 Análise comparativa entre os métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR

Este item apresenta os resultados da comparação entre os métodos de medição de deslocamentos para cálculo das deformações específicas de retração testados. Como os corpos-de-prova especificados pela NBR 7190/97 não possibilitam a análise em relação à posição radial, a análise estatística foi feita para cada uma das quatro posições radiais em que foi dividida a análise dos corpos-de-prova em forma de cunha e estão apresentados em conjunto.

As análises de variância apresentadas nas Tabela 4 e 5 mostram que foram encontradas diferenças estatísticas significativas ao nível mínimo de 5% de probabilidade entre as espécies para as retrações radiais nas posições a 50%, 75% e 100% do raio, entre as posições longitudinais e entre os métodos para as retrações radiais em todas as posições. Entre os métodos também foram encontradas diferenças para as retrações tangenciais a 25% do raio. As interações duplas e triplas para as retrações radiais e tangenciais não foram significativas, exceto para a retração radial na interação espécie-método a 100% do raio.

Tabela 4 - Tabela de análise de variância das retrações radiais ( $\varepsilon_{r,2}$ ) calculadas a partir dos dados de deslocamentos obtidos pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR, NBR nas diferentes posições radiais

Causa de variação	Graus de Liberdade	Prob>F			
		25%	50%	75%	100%
Espécie (E)	2	0.2412	0.0396	0.0296	0.0053
Posição Longitudinal (L)	1	0.0487	0.0035	0.0008	0.0001
Método (M)	2	0.0176	0.0000	0.0391	0.0301
E x L	2	0.1000	0.1824	0.1293	0.0501
E x M	4	0.9349	0.2998	0.2780	0.0280
L x M	2	0.5950	0.9450	0.6654	0.2166
E x L x M	4	0.7085	0.6194	0.8179	0.2208
Resíduo	72				
Total	89				

Tabela 5 - Tabela de análise de variância das retrações tangenciais ( $\varepsilon_{r,3}$ ) calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas diferentes posições radiais

Causa de variação	Graus de Liberdade	Prob>F			
		25%	50%	75%	100%
Espécie (E)	2	0.2642	0.1005	0.1922	0.1391
Posição Longitudinal (L)	1	0.0503	0.1489	0.4836	0.7676
Método (M)	2	0.0340	0.9646	0.7190	0.0780
E x L	2	0.6284	0.9946	0.3980	0.3071
E x M	4	0.5146	0.1616	0.6485	0.7334
L x M	2	0.1030	0.3335	0.7072	0.2986
E x L x M	4	0.1612	0.5462	0.6085	0.6513
Resíduo	72				
Total	89				

Efetuada-se o teste Tukey não foram identificadas diferenças significativas entre as espécies quando comparadas as médias das retrações radiais nas posições relativas a 25% (Figura 62a) e 75% do raio (Figura 62c). Nas posições a 50% (Figura 62b) e 100% do raio (Figura 62d), o *E. saligna* e *E. urograndis* podem ser agrupados como espécies de maior retração radial.

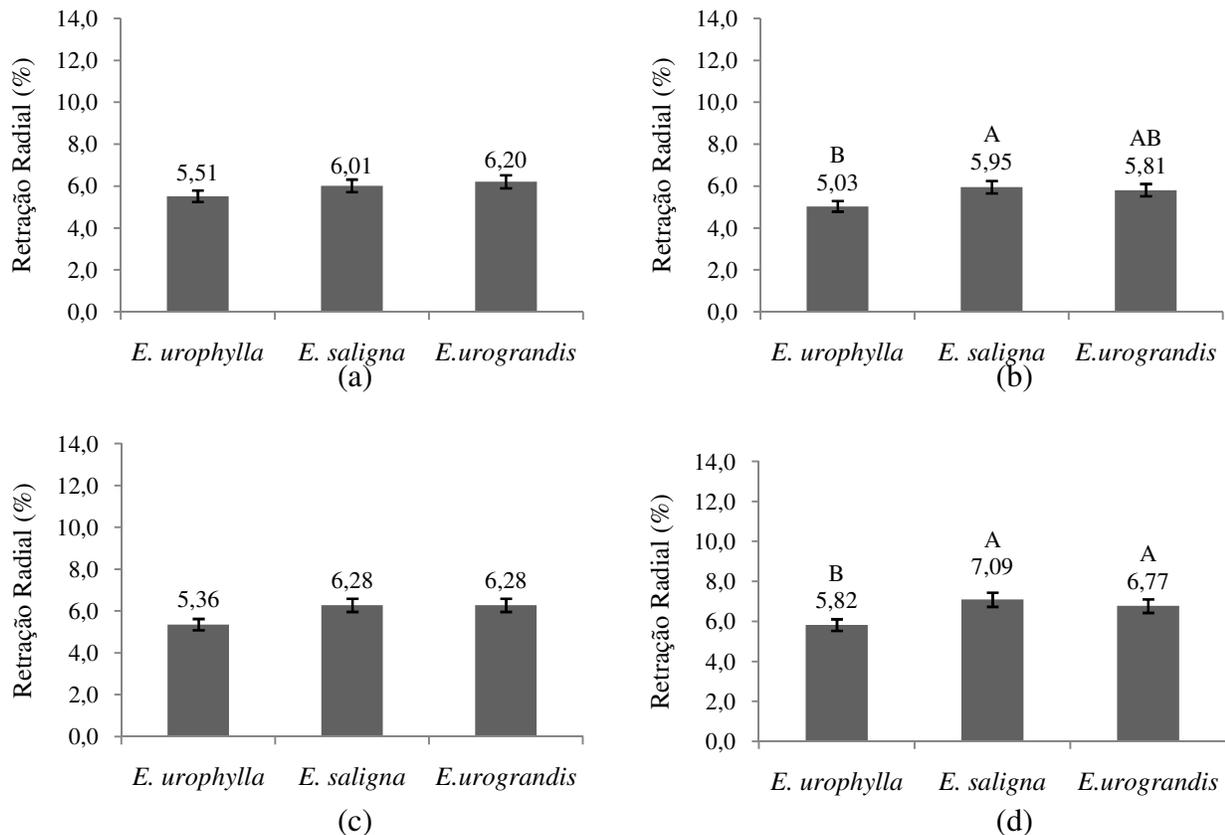


Figura 62 - Média das retrações radiais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

Para as retrações tangenciais, a comparação entre as médias não identificou diferenças entre as espécies, como mostra a Figura 63, mesmo assim, observa-se que o *E. urophylla* sempre apresentou os menores valores.

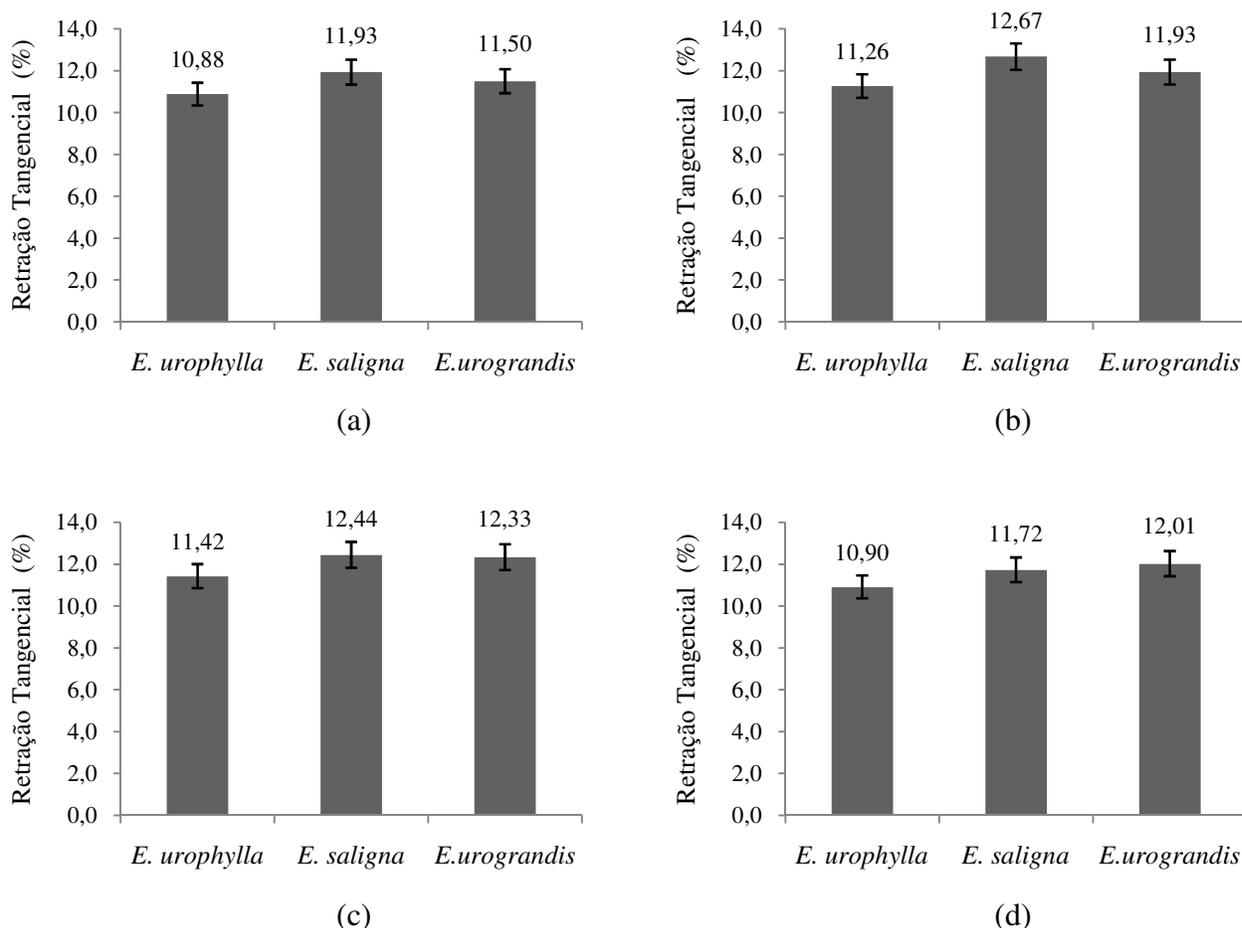


Figura 63 - Média das retrações tangenciais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% do raio (d)

Não foi possível identificar neste estudo, as possíveis causas das diferenças, ou ausência delas, entre as retrações radiais e tangenciais para as espécies estudadas. Sabe-se pela literatura que diversos fatores, como densidade, direção dos anéis de crescimento, presença de extrativos, dentre outros, interferem no mecanismo de troca de umidade estabelecido entre a madeira e o ambiente. Como colocado no capítulo inicial da tese, as deformações específicas de retração e inchamento são diretamente proporcionais à densidade da madeira, relação essa que não foi observada neste estudo. A Figura 64 mostra que a densidade básica das espécies estudadas, não

exerceu influência sobre as retrações radiais e tangenciais calculadas segundo os diferentes métodos. Na maioria dos casos a retração radial diminuiu com o aumento da densidade básica e a retração tangencial aumentou com ou aumento dessa variável.

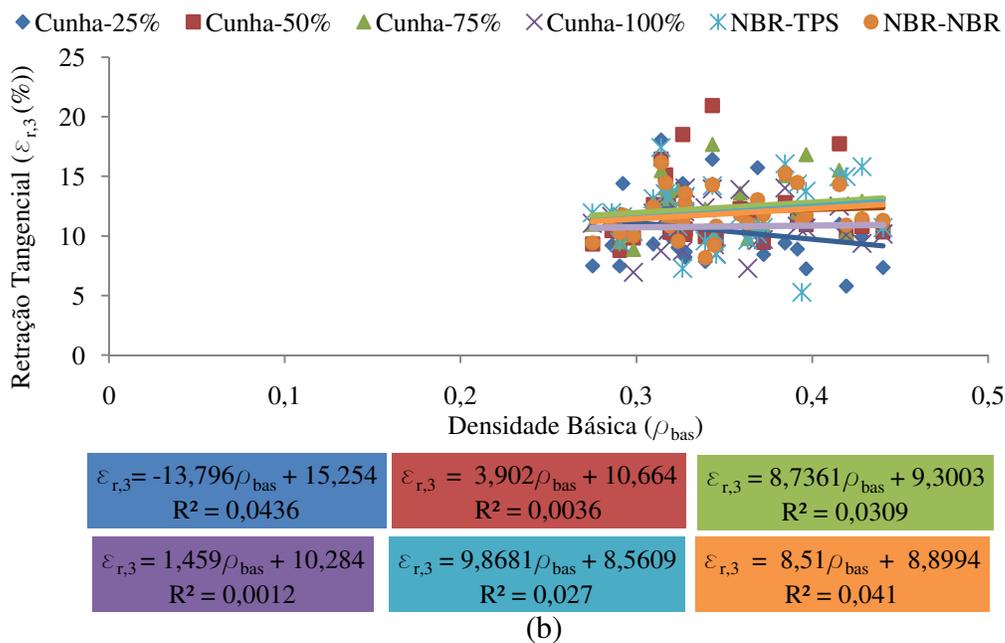
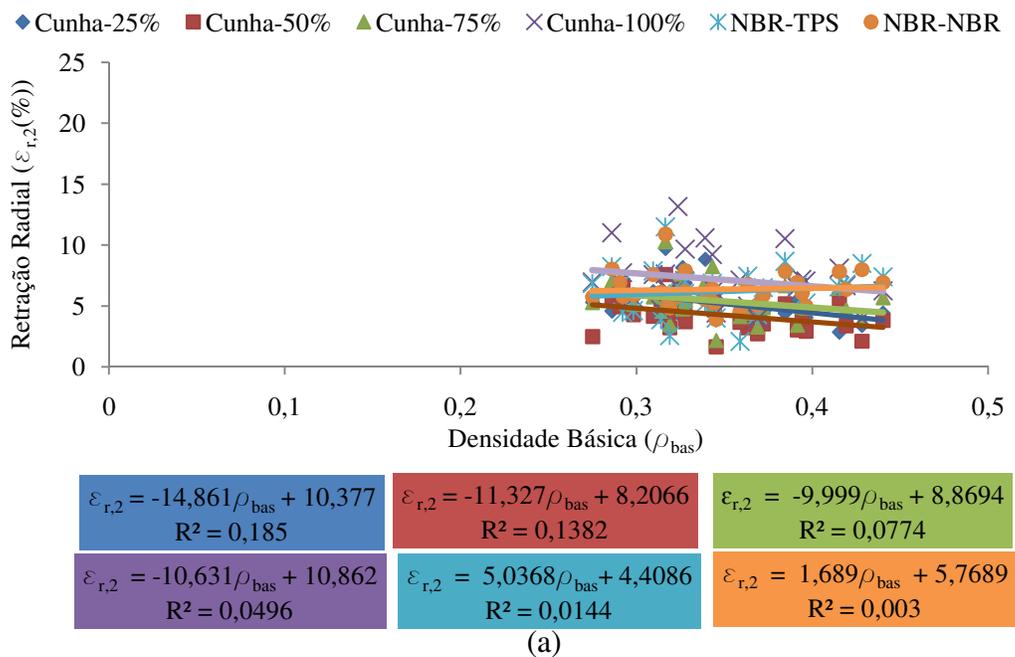


Figura 64 – Correlações das retrações radiais (a) e tangenciais (b) calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR com a densidade básica das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis*

A variação da umidade natural também não explicou as diferenças entre as retrações radiais e tangenciais para as espécies estudadas, como mostra a Figura 65. Observou-se, entretanto, que a retração radial tendeu a diminuir com o aumento da umidade natural e a retração tangencial tendeu a aumentar com essa variável.

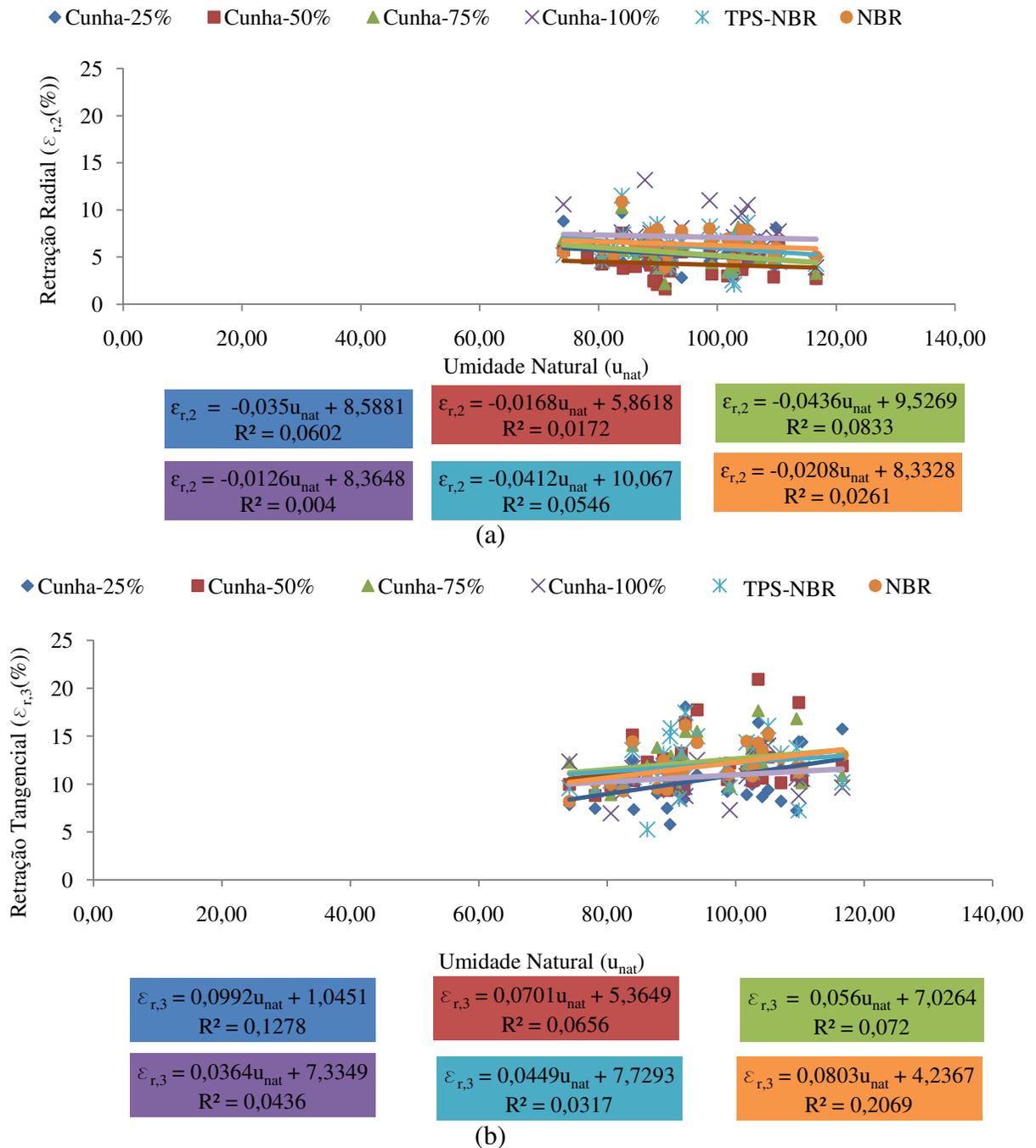


Figura 65 – Correlações das retrações radiais (a) e tangenciais (b) calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR com a umidade natural das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis*.

Em relação à posição longitudinal, o teste de médias apontou para diferenças entre as retrações radiais. Como se observa na Figura 66, em todas as posições radiais as toras basais retraíram significativamente menos do que as toras superiores. Entre as toras basais, não houve diferenças entre as espécies. Nas toras superiores, as retrações radiais das espécies *E. saligna* e *E. urograndis* foram significativamente maiores.

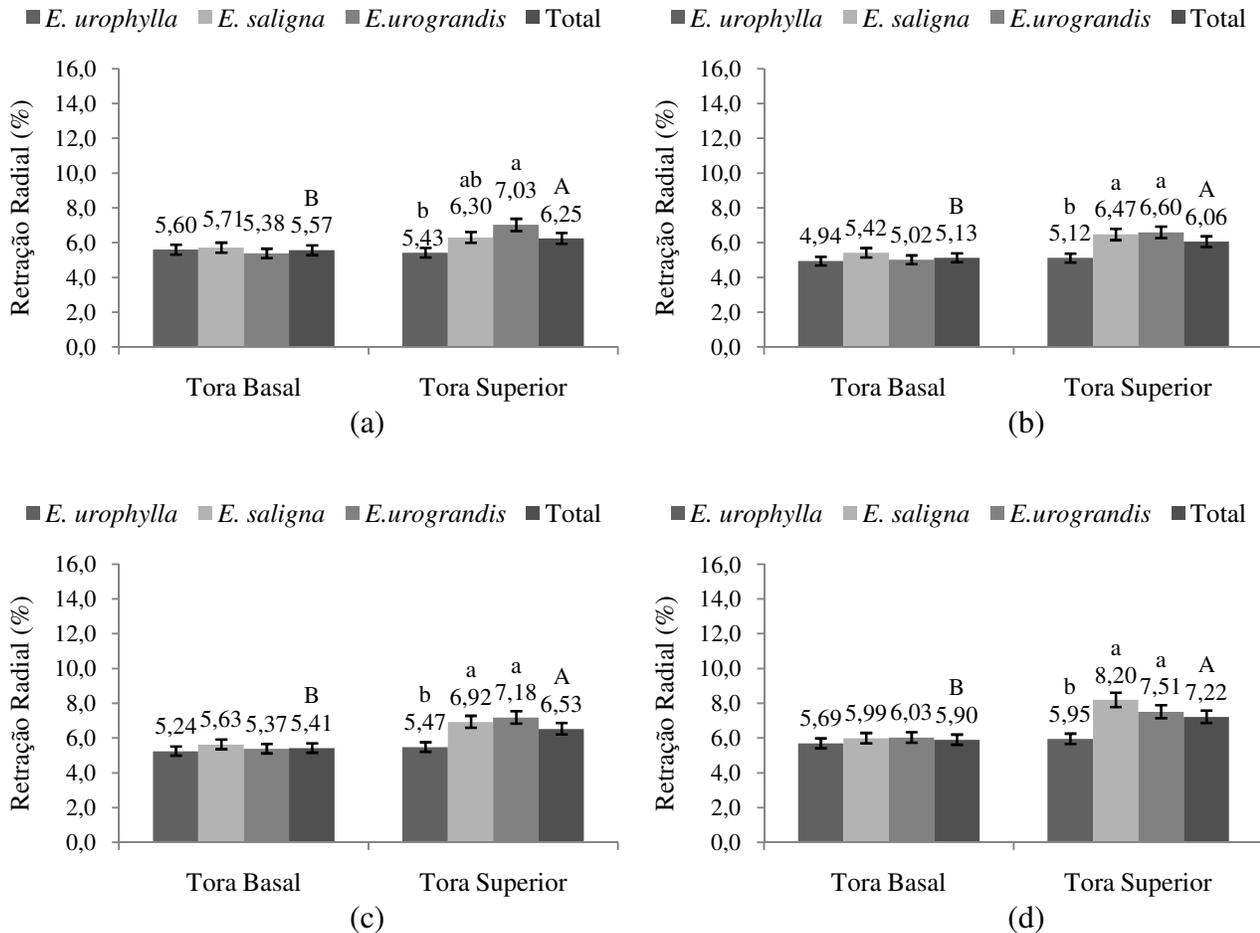


Figura 66 - Médias das retrações radiais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

A maior retração radial na tora superior foi um comportamento comum a todas as espécies, em todas as posições radiais como pode ser observado na Figura 67, sendo que para a espécie *E. urograndis* essa diferença sempre foi significativa e para a espécie *E. saligna* a diferença só foi significativa a 75% e 100% do raio.

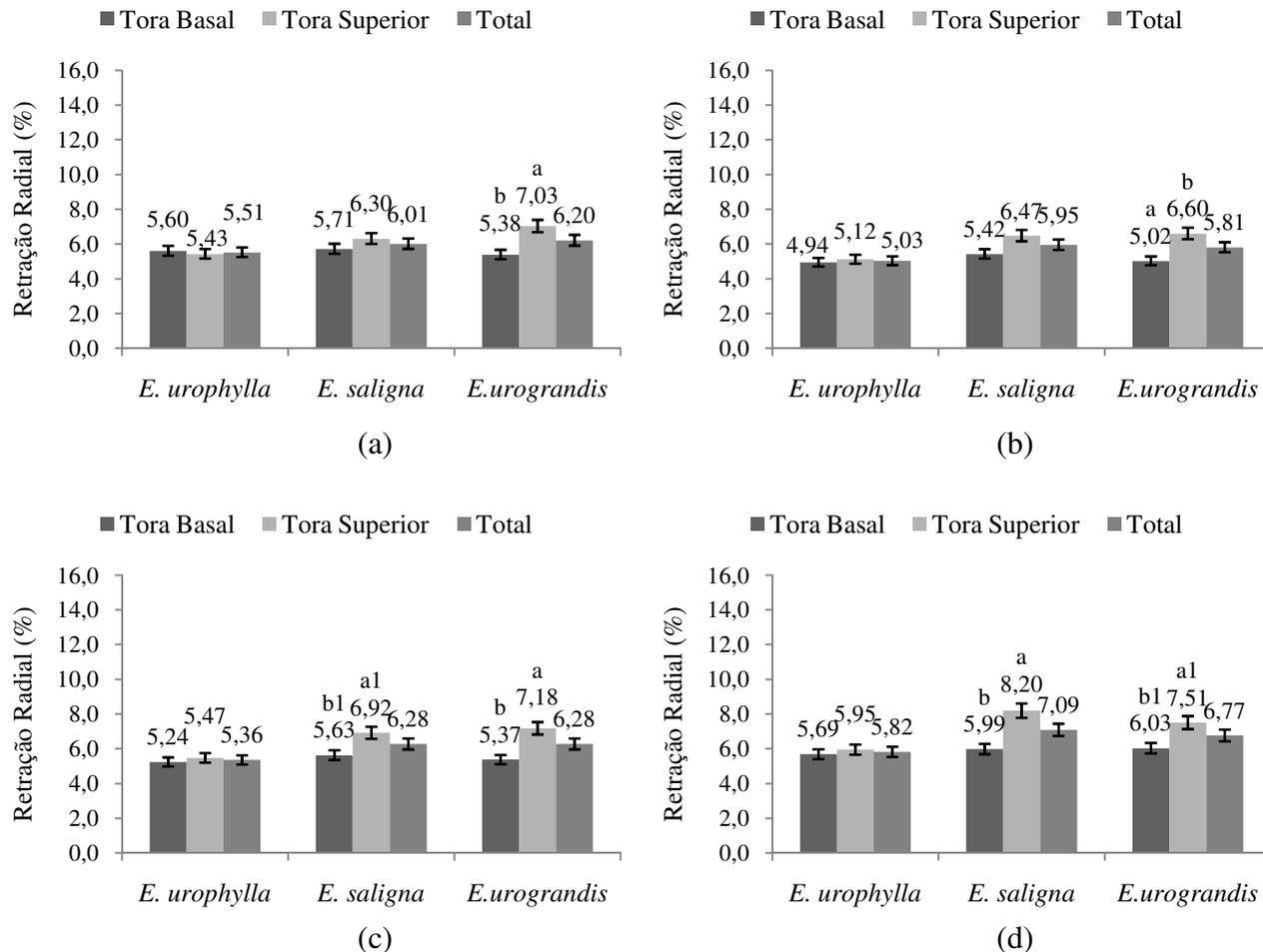


Figura 67 - Médias das retrações radiais das toras basal e superior calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

Para as retrações tangenciais as diferenças entre as toras basal e superior, em todas as posições radiais, não foram significativas, como pode ser observado na Figura 68, comportamento que se repetiu em todas as espécies (Figura 69). Também não houve diferenças entre as espécies em nenhuma das duas posições longitudinais

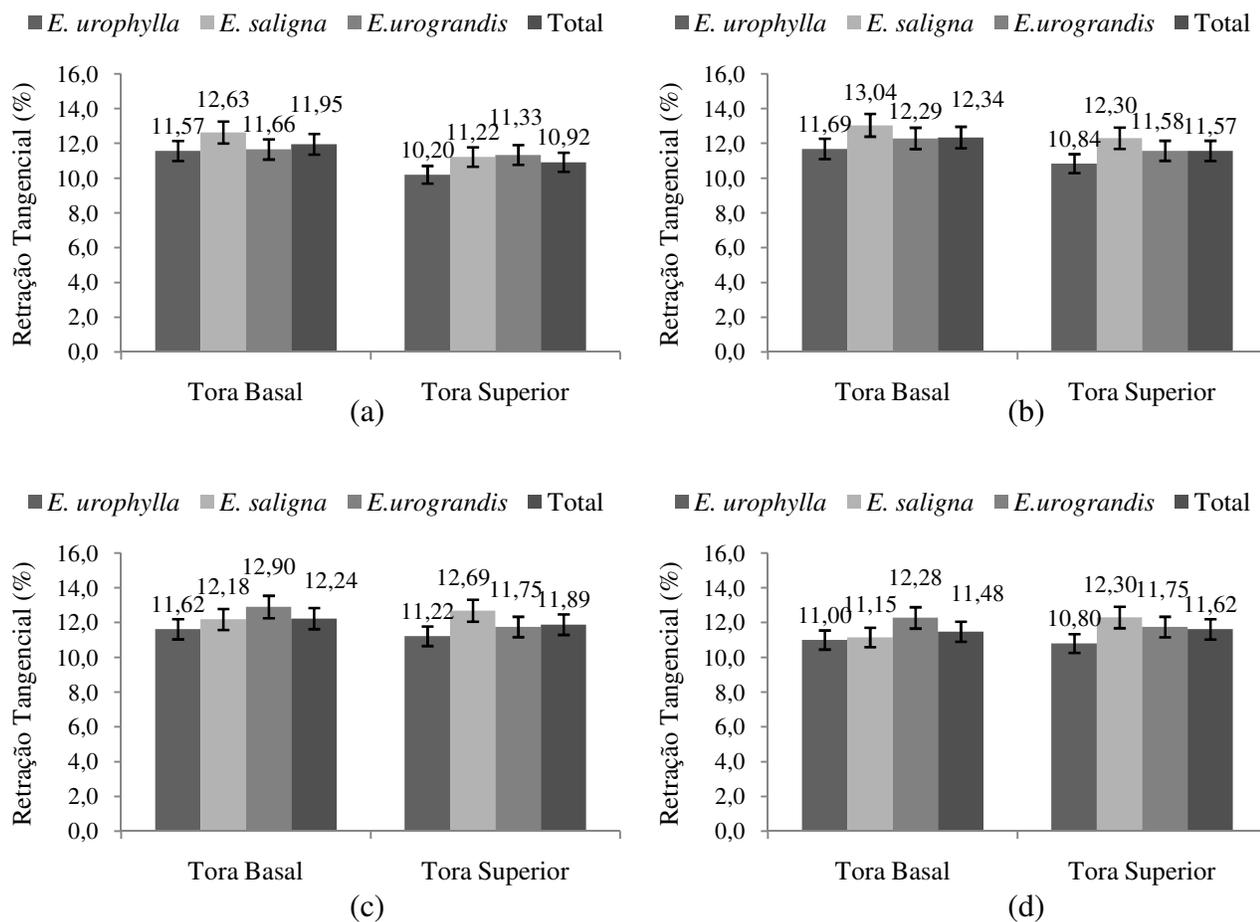


Figura 68 - Médias das retrações tangenciais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

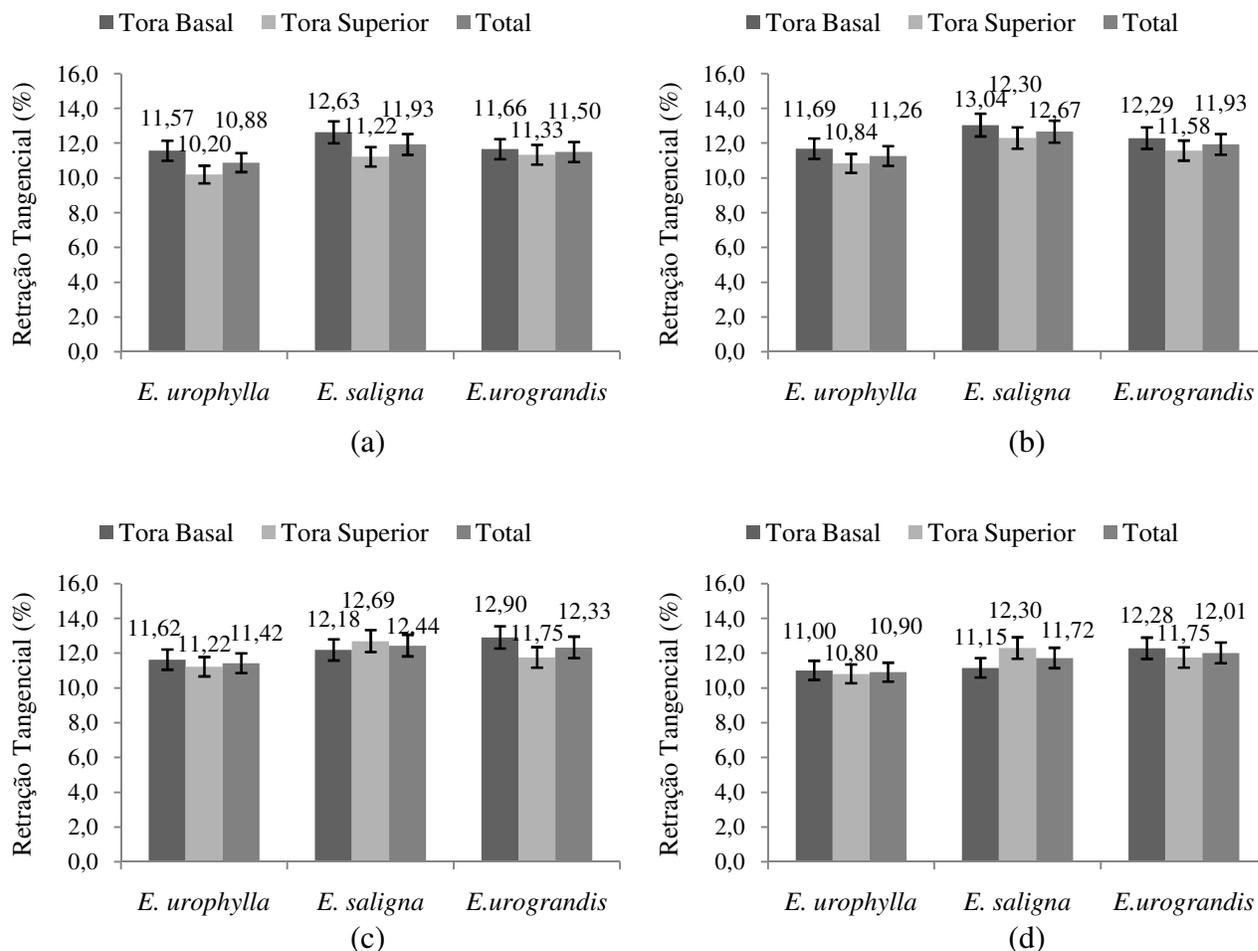


Figura 69 - Médias das retrações tangenciais das toras basal e superior calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

A Figura 70 mostra que as retrações radiais calculadas a partir dos dados de deslocamento obtidos pelo método da TPS nos corpos-de-prova em forma de cunha foram significativamente menores para as posições 25%, 50% e 75% do raio, quando comparadas com os métodos da NBR 7190/97 e da TPS, aplicados nos corpos-de-prova normalizados. Na posição a 100% do raio, as retrações calculadas pelo método da cunha foram maiores. Entre os métodos NBR e TPS-NBR não foram encontradas diferenças. Nas posições 50%, 75% e 100% do raio, as retrações medidas pelo método da cunha para as espécies *E. saligna* e *E. urograndis*, foram significativamente maiores do que as retrações do *E. urophylla*.

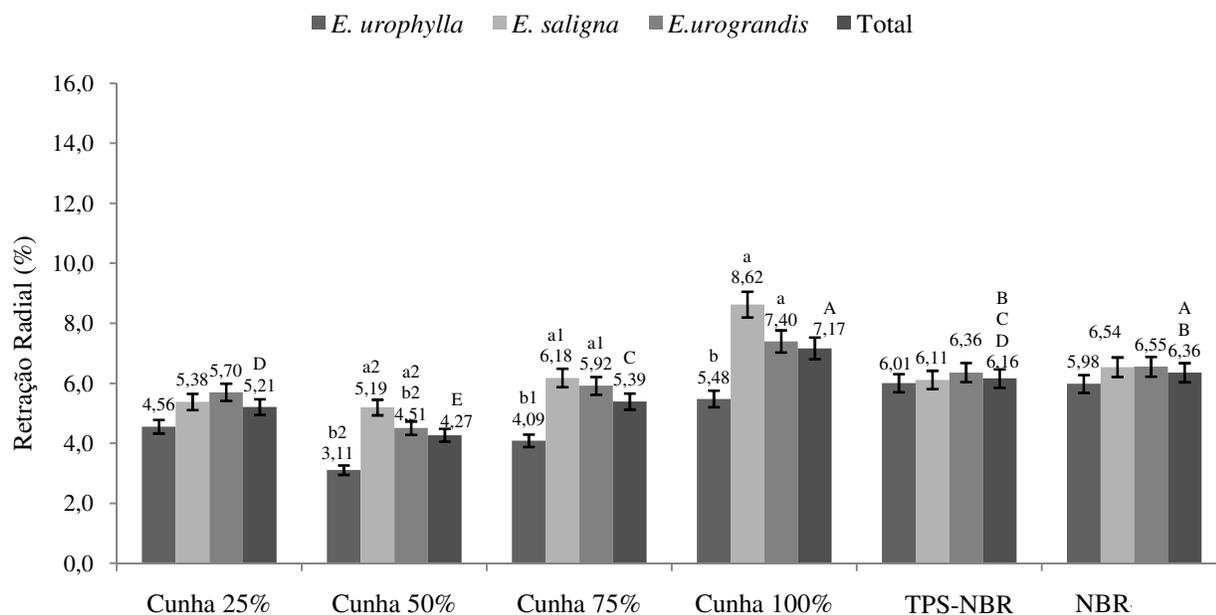


Figura 70 - Médias das retrações radiais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições radiais

Nas posições 25%, 50% e 75% do raio a Figura 71 mostra que as menores retrações radiais, em todas as espécies, foram obtidas pelo método da cunha. Somente na posição a 100% do raio, as retrações radiais calculadas para a espécie *E. saligna*, pelo método da cunha, foram significativamente maiores do que as retrações radiais obtidas pelos métodos NBR e TPS-NBR para a mesma espécie. Nessa mesma posição, não foram encontradas diferenças entre as retrações calculadas para as espécies *E. urophylla* e *E. urograndis*.

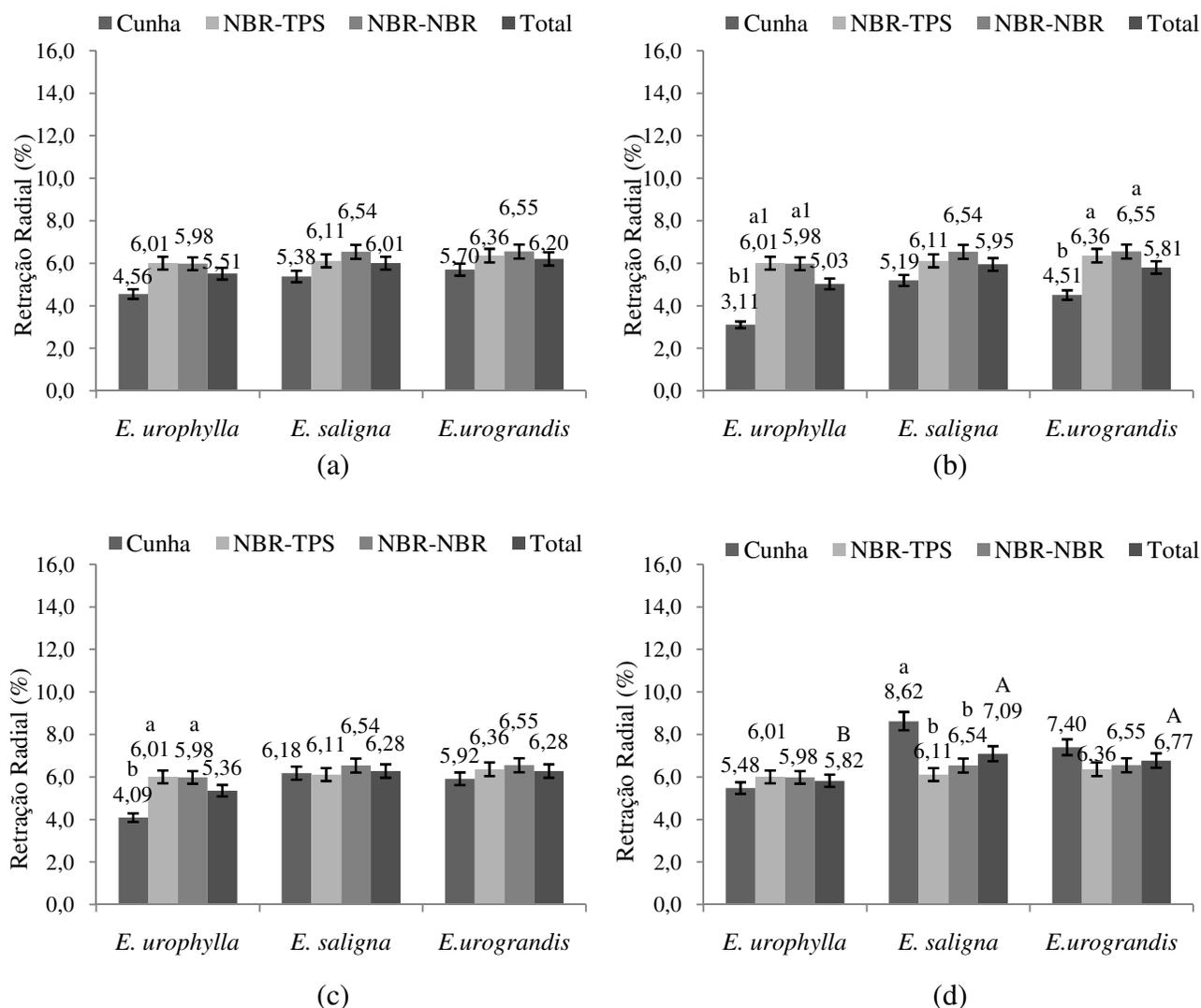


Figura 71 - Médias das retrações radiais calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

Na posição a 25% do raio, as retrações tangenciais calculadas pelo método da cunha foram menores do que as retrações calculadas pelos métodos NBR e TPS-NBR, entre os quais não houve diferenças (Figura 72). Nas demais posições, não houve influência do método no cálculo das retrações tangenciais. Para todos os métodos e em todas as posições radiais, a espécie *E. urophylla* apresentou as menores retrações tangenciais e na posição a 50% do raio, as retrações calculadas pelo método da cunha foram significativamente maiores para a espécie *E. saligna*.

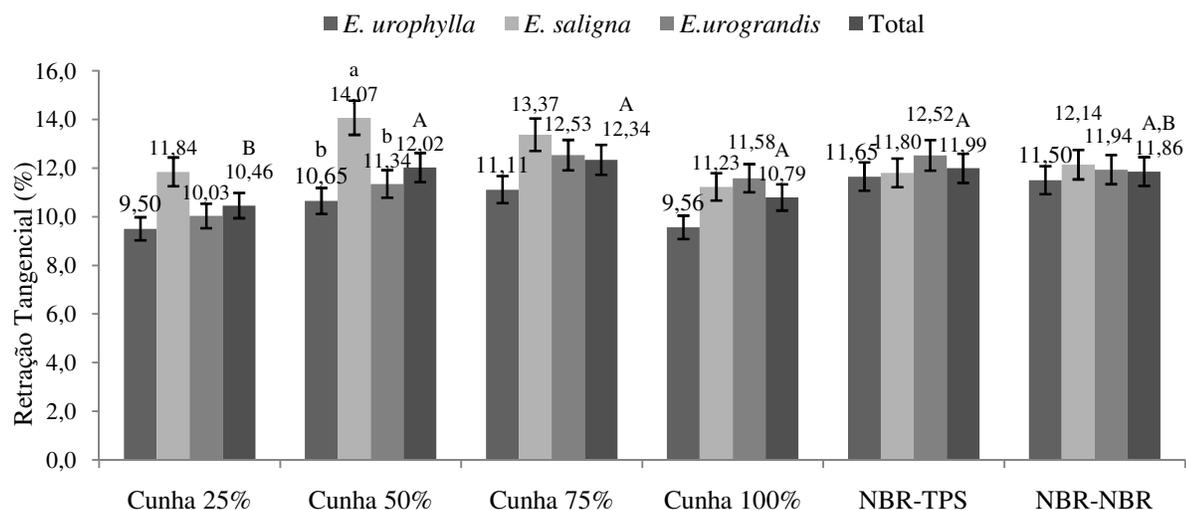


Figura 72 - Médias das retrações tangenciais das espécies *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis* calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições radiais

De um modo geral, entre as espécies, não houve diferenças significativas entre os métodos. Observa-se na Figura 73 que, somente nas posições a 50% e 75% do raio, para a espécie *E. saligna* o método da cunha apresentou as maiores retrações.

As interações altura-método e altura-espécie-método foram não significativas, o que significa que o método apresentou o mesmo comportamento nas duas alturas analisadas, para todas as espécies.

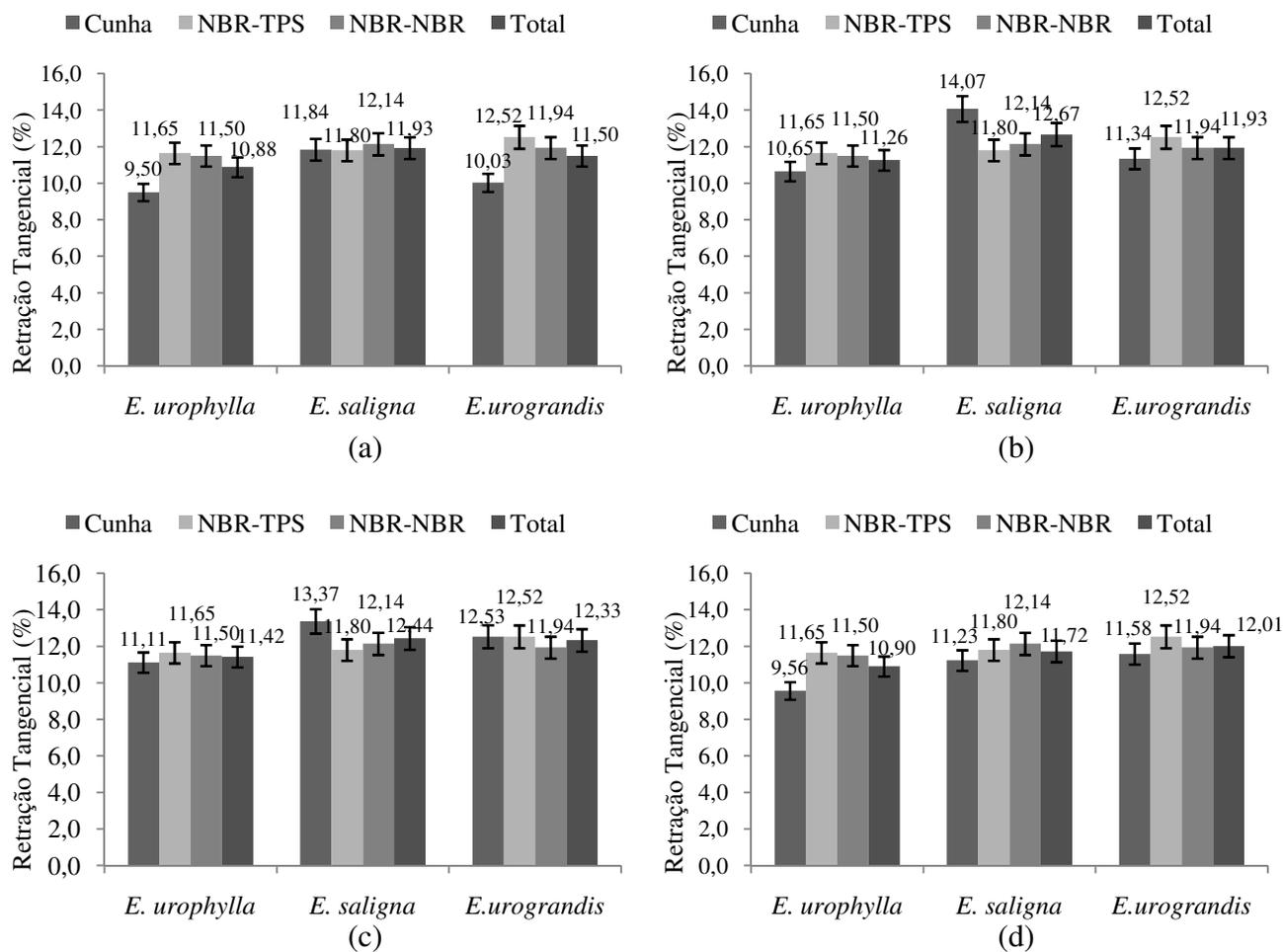


Figura 73 - Médias das retrações tangenciais calculadas pelos métodos TPS-cunha, TPS-NBR e NBR nas posições 25% (a), 50% (b), 75% (c) e 100% (d) do raio

Verificou-se nessa análise comparativa que houve uma baixa correlação entre os métodos, tanto para as retrações radiais (Figura 74) como para as retrações tangenciais (Figura 75).

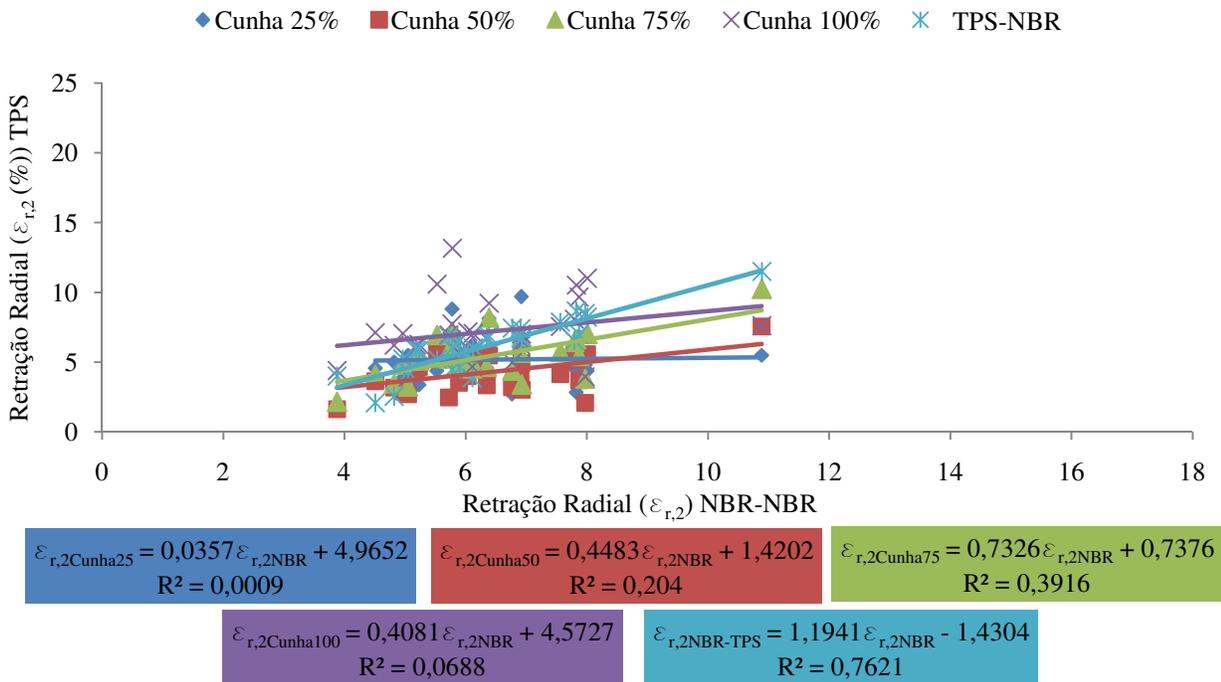


Figura 74 – Correlações entre a retração radial obtida pela TPS com aquela obtida pelo método NBR

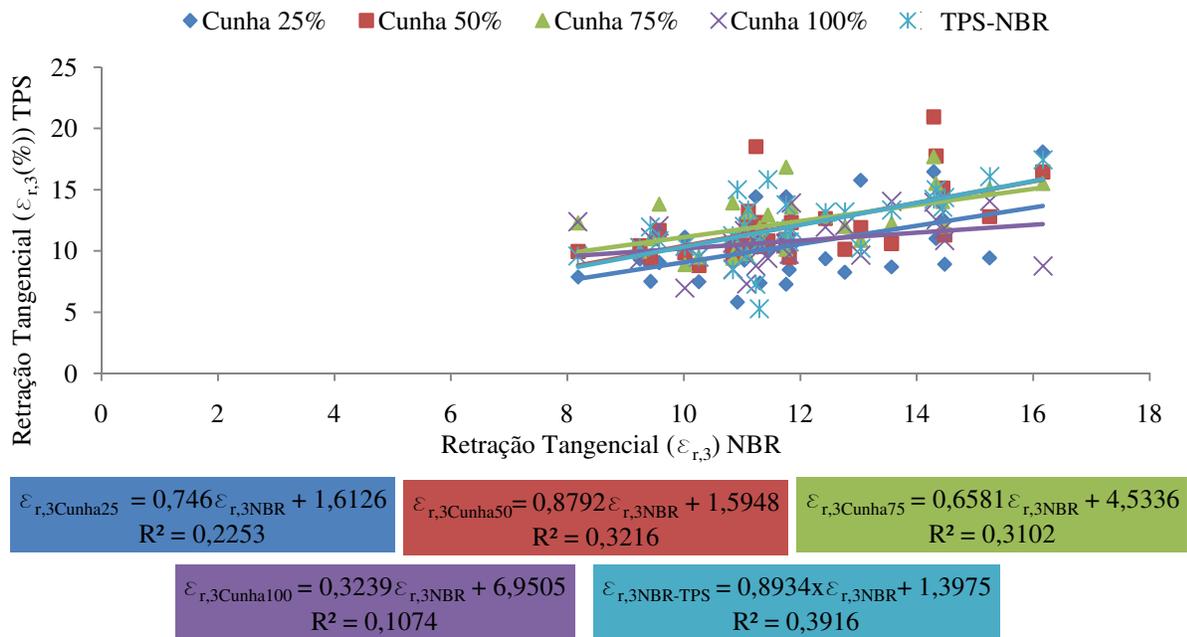


Figura 75 – Correlações entre a retração tangencial obtida pela TPS com aquela obtida pelo método NBR

Essas diferenças podem ser explicadas, principalmente pelo fato de que a medição por instrumentos de contato, preconizada pela NBR 7190/97 induz a erros devido à imprecisão relacionada à calibração e ao posicionamento do equipamento de medição no corpo-de-prova (princípio de Abbe), à deformação do corpo-de-prova, que dificulta a identificação do ponto de

medição nos diferentes instantes e, especialmente, à pressão exercida pelo operador, causando esmagamento da amostra no ponto de medição. Todos esses fatores podem resultar em medidas de deslocamento superiores às realmente ocorridas e, conseqüentemente, acusar valores de retração maiores do que os reais.

No caso das medições por análise digital de imagens, também podem ocorrer erros de localização dos pontos de controle, visto que, de um instante para outro, no caso da madeira saturada para a seca, as imagens perdem em intensidade de contraste, fazendo com que na binarização ocorram diferenças entre as imagens original e deformada, relacionadas à espessura da linha, “sujeiras” e, até mesmo, perda de pontos. Também ocorre o fato de que não há garantias de que os pontos sejam marcados precisamente na mesma posição, primeiro pelo próprio deslocamento do ponto e pelas características da imagem e, segundo, pelo operador, que embora tenha sido sempre o mesmo a realizar a marcação dos pontos nas imagens dos diferentes instantes e utilizado sempre os mesmos critérios, é passível de erros. No entanto essas diferenças de posicionamento dos pontos de controle, são da ordem de pixels, o que, neste caso, correspondem a 0,038mm, na escala real, inferiores às diferenças devidas à imprecisão dos métodos que utilizam instrumentos de contato. É provável que esse tenha sido o principal motivo pelo qual as retrações calculadas pelos métodos que utilizam o conceito da TPS tenham sido menores do que as retrações calculadas pelo método da NBR 7190/97.

No caso das diferenças encontradas nas retrações radiais calculadas pelo método da cunha em relação aos métodos NBR e TPS-NBR e não verificadas para as retrações tangenciais, essas podem estar relacionadas à geometria do corpo-de-prova. Na obtenção dos dados para análise das retrações radiais na cunha, foram tomados os pontos da coluna central, que passa pela medula e, portanto, corresponde à direção radial real. Nos corpos de prova normatizados, dada a sua geometria e o procedimento de medição que considera a média de três pontos, pelo menos em dois desses pontos, os deslocamentos medidos sofreram influência dos deslocamentos na direção tangencial. Em relação à retração tangencial, essa diferença não se verificou devido ao fato de que nos pontos considerados para análise por não acompanharem a curvatura dos anéis de crescimento, seu deslocamento não correspondeu à direção tangencial real e sim, a resultantes de deslocamentos nas duas direções, embora com predominância dos deslocamentos tangenciais.



## 5 CONCLUSÕES

O método da Thin-plate Spline é sensível às deformações específicas de retração das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis*. O retículo gerado reproduz fielmente as deformações sofridas pelos corpos-de-prova e possibilita o cálculo das retrações radiais e tangenciais entre quaisquer dois pontos da superfície de um corpo-de-prova, resultando numa envoltória de deformações da amostra;

As retrações calculadas pelo método da TPS nas amostras em forma de cunha nas direções radial e tangencial são inferiores às calculadas segundo a NBR 7190/97. As retrações radiais e tangenciais calculadas pelo método da TPS nas amostras normatizadas são estatisticamente iguais às calculadas segundo a NBR 7190/97;

A utilização de um corpo-de-prova em forma de cunha possibilita uma análise detalhada das retrações em diferentes posições radiais na seção transversal da tora, sem a necessidade de novas amostras;

As retrações radiais e tangenciais das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e do híbrido *urograndis* variam no sentido medula-casa, sendo sempre inferiores nas regiões próximas à medula e superiores nas regiões mais periféricas da tora;

A retração radial das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *urograndis* tende a decrescer com o aumento da densidade básica e do teor de umidade natural na árvore e a retração tangencial tende a crescer com o aumento dessas duas variáveis;

As retrações radiais das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *urograndis* variam de acordo com a posição longitudinal no fuste, sendo menores nas toras da base;

As retrações tangenciais das madeiras de *E. urophylla*, *E. saligna* e *urograndis* não variam ao longo do fuste.



## REFERENCIAS

ABRAHÃO, C.P; VARELLA, C.A.A.; PINTO, F.A.C.; KHOURY JUNIOR, J.K. Quantificação da falha na madeira em juntas coladas utilizando técnicas de visão artificial. In: **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.1, p.71-78, 2003

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D143: Standard test methods for small clear specimens of timber. West Konshohocken, PA: ASTM, 2000. 31p.

ANTUNES, E.J. **Processamento de Imagens**: uma abordagem interdisciplinar aplicada a correção de prognósticos meteorológicos. Pelotas, RS: Universidade Federal de Pelotas Instituto de Física e Matemática, 1999. 78p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7190/97**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.

CADRIN, S.X.; SILVA, V.M. Morphometric variation of yellowtail flounder. In: **ICES Journal of Marine Science**. n.62, p.683-694, 2005.

CALIL JR.; LAHR, F. A.R.; DIAS, A.A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152p.

CASTANHO, J.E.C.; TOZZI, C.L. Obtenção da transformação de corpo rígido em registro de imagens com deformação usando thin plate splines. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 9.,1996. Caxambú - SIBGRAPI. **Anais...** Caxambu-MG: UFMG, 1996. p.181-187.

CAVACO, M.A.M. **Metrologia**. Laboratório de Metrologia e Automatização Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 169p.

CHANG, H.P.; LIU, P.H.; CHANG, H.F.; CHANG, C.H. Thin-plate spline (TPS) graphical analysis of the mandible on cephalometric radiographics. **Dentomaxillofacial Radiology**, n.31, p.137-141, 2002.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT-462**: Maderas – método de determinación de la contracción. Lima: COPANT, 1972. 3p.

COSTA, R.M. **Proposta de um processo de captura e análise de imagens para determinação de forma e superfície de materiais biológicos pela técnica de moiré**. Lavras, MG, 2006. 26p.

COSTA, L.F.; CESAR JR, R M . **Shape analysis and classification: theory and practice**. Boca Raton: CRC Press, 2001. v. 1. 659 p.

DI MARE, R.A.; CORSEUIL, E. Morfometria de Papilioninae (*Lepidoptera, Papilionidae*) ocorrentes em quatro localidades do Rio Grande do Sul, Brasil. III. Análise da forma das asas através de marcos anatômicos. **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v.21, n.4, p.847-855, dez.2004.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463p.( Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113.)

FRANCHI, L.; BACCETTI, T.; STAHL, F.; McNAMARA JR, A. Thin-plate spline analysis of craniofacial growth in class I and class II subjects. **Angle Orthodontist**, v.77, n.4, p.595-601, 2007.

GALVÃO, A.P.M., JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GIORDANO, G. **Tecnologia del legno: la materia prima**. Torino: UTET, 1971. 1086p.

GOMES JR, J.L. **Variação na forma e tamanho corporal em *Poecilia vivípara* (Teleostei, poeciliidae) em lagoas da região norte fluminense**. 2006. 42p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2006.

HANSEN, A.T. **Effects of wood shrinkage in buildings**. National Research Council Canadá, 1987. Disponível em: <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd244e.html>>. Acesso em: 21 ago. 2005.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer Verlag, 1968, v.1. 592p.

LOGSDON, N.B. Estabilidade dimensional: sugestões para revisão da NBR 7190/97. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8.,2002. Uberlândia. **Anais...**São Carlos: IBRAMEM, 2002.a 1 CD-ROM.

LOGSDON, N.B. Otimização do ensaio de estabilidade dimensional. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002. Uberlândia. 2 **Anais...**São Carlos: IBRAMEM, 2002b. 1 CD-ROM.

LOPES, G.A. **Qualidade da Madeira de Eucalyptus saligna smith, de Itatinga, associada aos padrões de casca apresentados pela população.**2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura” Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

LOPES, G.A.; GARCIA, J.N. Densidade básica e umidade natural da madeira de Eucalyptus saligna Smith, de Itatinga, associadas aos padrões de casca apresentados pela população. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.62, p.13-23, dez. 2002.

MACEDO, A.; VAZ, C.M.P.; JORGE, L.A.C.; NAIME, J.M.; CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S.; MATTOS, P.P.; PEREIRA, J.C.D.; SCHAITZA, E.G. Técnicas radiográficas, tomográficas e de análise de imagens para estudo da madeira. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, Colombo, PR, n.26, p.1-6, jul., 1998.

MAZZETI FILHO, V. **Utilização da interferometria de moiré no estudo de tensões dinâmicas em discos flexíveis.** 2004. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MOIRÉ interferometry. Disponível em: <<http://deme.open.ac.uk/moire.html>> acesso em: 10 maio 2006.

PANSHIN, A.J.; ZEEUW, J.E. **Textbook of wood technology.** 3<sup>rd</sup> ed. New York: Mcgraw-hill, 1970. v.1.

PEÑA, S.V.; PERIS, F.J.J. **Tecnologia de la madera.** Madrid: Mundi-prensa, 2000. 653p.

RAMOS, L.P. **Análise digital de imagens aplicada à medição de deslocamentos impostos e autoequilibrados na qualificação física e mecânica da madeira.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Florestais, Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira, 2008. 41p.

REZENDE, M.A. Retratibilidade da madeira de *Pinus caribea var. hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.64, p.120-127, dez. 2003.

REZENDE, M.A.; ESCOBEDO, J.F.; FERRAZ, E.S.B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPEF**, Piracicaba, n.39, p.33-40, ago.1988.

REZENDE, M.A.; SAGLIETTI, J.R.C.; GUERRINI, I. A. Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade. **IPEF**, Piracicaba, n.48/49, p.133-141, jan./dez.1995.

ROBINSON, A.H.; MORRISON, J.L.; MUEHRCKE, P.C.; KIMERLING, A.J.; GUPTILL, S.C. **Elements of cartography**. 6.ed. New York: John Wiley, 1995. 688p.

ROHLF, F.J. **Thin-plate Spline**. Version 1.15. SUNY, Stony Brook, NY. 1997. Disponível em: <<http://life.bio.sunysb.edu/morph/>> acesso em: 29 outubro 2009.

ROHLF, F.J. **tpsDig. Version 1.20**. SUNY, Stony Brook, NY., 1998. Disponível em: <<http://life.bio.sunysb.edu/morph/>> acesso em: 29 outubro 2009.

ROSOT, M.A.D.; FIGUEIREGO FILHO, A.; DISPERATI, A.A.; EMERENCIANO, D.B. Análise de tronco digital: uma nova metodologia para a medição de anéis de crescimento. **Revista Floresta**, Curitiba, v.33, n.3, p.235-255 ago.2003.

SCHAITZA, E.G.; MATTOS, P.P.; PEREIRA, J.C.D. Metodologias simples e baratas para análise de imagens planas. In: **Comunicado Técnico. Embrapa Florestas**, Colombo, PR, n. 90, p.1-4, dez.2003, 2003.

SCHENK, T. **Digital photogrammetry**. Laurelville, Ohio: TerraScience, 1999. v.1 428p.

SILVA, D.A.; TRUGILHO, P.F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagens submetidas a diferentes temperaturas. **Cerne**, Lavras, v.9, n.1, p.56-65, 2003.

SILVA, M.C.; SOARES, V.P.; PINTO, F.A.C.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, C.A.A.S. Determinação do volume de madeira empilhada através de processamento de imagens digitais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n 69, p. 104-114, Dez 2005.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.

SOILLE, P.; MISSON, L. The ring area measurements using morphological image analysis. **Canadian Journal Forest Research**, Canada, v. 31, p1074-1073, NRC,2001.