



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**CATERINA CARVALHAL BURATTA**

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E DE SUPERFÍCIE DA MADEIRA DE  
MOGNO AFRICANO (*Khaya ivorensis*) SOB EFEITO DE TRATAMENTO TÉRMICO**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
JUNHO – 2016



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**CATERINA CARVALHAL BURATTA**

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E DE SUPERFÍCIE DA MADEIRA DE  
MOGNO AFRICANO (*Khaya ivorensis*) SOB EFEITO DE TRATAMENTO TÉRMICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
JUNHO – 2016

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E DE SUPERFÍCIE DA MADEIRA DE  
MOGNO AFRICANO (*Khaya ivorensis*) SOB EFEITO DE TRATAMENTO  
TÉRMICO**

**CATERINA CARVALHAL BURATTA**

Comissão Examinadora:

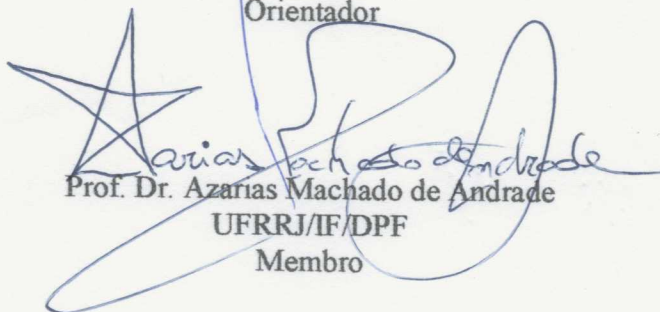
Monografia aprovada em 06 de junho de 2016.



Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento

UFRRJ/IF/DPF

Orientador



Prof. Dr. Azarias Machado de Andrade

UFRRJ/IF/DPF

Membro



Prof.ª Dr.ª Gilmara Pires de Moura Palermo

UFRRJ/IF/DPF

Membro



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Aurea e Mario, a minha irmã Giulia e a minha vó Eudirce, por nunca terem deixado me faltar nada, e terem tornado a caminhada até aqui muito mais fácil. Nada seria sem eles.



## **AGRADECIMENTOS**

A minha família e aos meus amigos por sempre me apoiarem e me confortarem nos momentos difíceis.

A minha querida turma 2009-II, que enfrentou momentos de alegria e tristeza ao meu lado, e a todos os amigos ruralinos que tornaram esses anos na Rural tão especiais.

As meninas e amigas do meu coração, Fernanda Martins, Karen Resende e Kauanna Cabral por me passarem tanta confiança, amizade e amor.

Aos amigos que moram comigo, Marcondes Coelho e Marcela Pitarello, por terem tornado o convívio dentro de casa tão agradável.

A Vanessa Gonçalves, Marcondes Coelho e Carolina Nogueira pelo trabalho em equipe e ajuda com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Miguel, orientador que sempre me prestou ajuda e me guiou em todos os momentos, me inspirando para que um dia eu possa ser uma profissional tão dedicada quanto ele.

Aos Professores Doutores Azarias Machado e Gilmara Pires por terem aceitado o convite para participar deste momento tão importante na minha formação.

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar algumas propriedades físico-mecânicas da madeira de *Khaya ivorensis* A. Chev, tais como: densidade aparente, teor de umidade, variação volumétrica, coloração, rugosidade e módulo de elasticidade de amostras cortadas nos plano transversal radial e transversal tangencial, sob efeito ou não, do tratamento térmico (termorretificação) nas temperaturas de 160, 180 e 200°C. Para isso, foram retiradas amostras de duas árvores com a idade de 33 anos localizadas em Seropédica, Rio de Janeiro, e climatizadas em ambiente com umidade relativa média de 65% e temperatura média de 20°C. Para determinação da densidade aparente utilizou-se a relação massa e volume das amostras com 13% de umidade de equilíbrio. O teor de umidade foi obtido através de medidor de umidade de contato e as coordenadas cromáticas ( $a^*$  e  $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) e saturação da cor (C) foram obtidas com o espectrofotômetro portátil Konica Minolta CM 2600d. Para determinação da rugosidade utilizou-se o rugosímetro portátil TR200 da DIGIMESS, sendo avaliadas somente as variáveis  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$  através dos parâmetros comprimento de amostragem (*cutoff*) igual a 2,5 mm, *range* igual a +/-80  $\mu\text{m}$  e filtro GAUSS. O módulo de elasticidade foi obtido por meio de ensaio de flexão estática, no regime elástico, pela máquina universal de ensaios mecânicos da CONTENCO, e seus valores calculados pelo software Pavitest Madeira. Para o processo de termorretificação, usou-se uma mufla da Linn Elektro Therm, com dimensões de 60 x 60 x 70 cm. As análises estatísticas foram feitas pelo software Statistica 7. As amostras apresentaram valores de densidade e umidade reduzidos após termorretificação, sendo que a umidade de equilíbrio reduz gradativamente com o aumento da temperatura de tratamento. A variação volumétrica foi maior no plano de corte tangencial, mas não variou significativamente em relação ao tratamento térmico. As variáveis cromáticas ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  e C) resultaram em valores menores após a termorretificação. O módulo de elasticidade relativo foi maior nas amostras não tratadas e cortadas tangencialmente. Após tratamento térmico observou-se aumento do valor do módulo das amostras tratadas à 200°C. . A rugosidade média ( $R_a$ ) apresentou diferença estatística após tratamento térmico, mostrando redução da rugosidade das amostras tratadas.

**Palavras-chave:** Termorretificação, propriedades físico-mecânicas, rugosidade, colorimetria



## ABSTRACT

This study aimed to evaluate some physical and mechanical properties of *Khaya ivorensis* A. Chev. wood, such as apparent density, moisture content, volume variation, color, roughness and modulus of elasticity in radial transverse plane and transverse tangential cut samples, in effect or not of heat treatment (termorretificação) at temperatures of 160, 180 and 200°C. For this, samples were taken from two trees at the age of 33 years located in Seropédica, Rio de Janeiro, and stored in a climatized environment with average relative humidity of 65% and an average temperature of 20°C. It was used the ratio mass and volume to determine the apparent density of the samples at 13% moisture balance. The moisture content was obtained by contacting moisture meter and the chromaticity coordinates ( $a^*$  and  $b^*$ ), lightness ( $L^*$ ) and color saturation (C) were obtained with the portable spectrophotometer Konica Minolta CM 2600d. For determination of surface roughness was used in portable profilometer TR200 DIGIMESS and evaluated only the variables  $R_a$ ,  $R_z$  and  $R_t$  through the sampling length parameter (cutoff frequency) equal to 2.5 mm range equal to  $\pm 80$  m and filter GAUSS. The modulus of elasticity was obtained by means of bending test, in the elastic range, the universal testing machine of CONTENCO, and values calculated by Pavitest Madeira software. For the process of heat treatment, it was used a muffle Linn Elektro Therm, with dimensions of 60 x 60 x 70 cm. Statistical analyzes were performed by the Statistica software 7. The samples exhibited values of density and moisture reduced after heat treatment, wherein the equilibrium moisture content gradually decreases with increasing treatment temperature. The volume change was greatest in the tangential cut, but did not significantly change in relation to the thermal treatment. The chromaticity variables ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  and C) resulted in lower values after heat treatment. The modulus of elasticity was higher on the untreated samples and tangential samples. After heat treatment there was an increase in the value of the modulus of the samples treated at 200°C. The average roughness ( $R_a$ ) showed statistical significance after heat treatment, showing reduced roughness of treated samples.

**Keywords:** Heat treatment, physical-mecanical properties, roughness, colorimetry



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Teor médio de umidade de equilíbrio da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> antes e após tratamento térmico.....	13
<b>Tabela 2.</b>	Análise estatística de significância pela ANOVA do efeito do corte, tratamento e corte*tratamento na variação de densidade da <i>Khaya ivorensis</i> .....	14
<b>Tabela 3.</b>	Valores médios da densidade aparente da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> , antes e após tratamento térmico.....	14
<b>Tabela 4.</b>	Valores médios da variação volumétrica (%) das amostras tratadas e não tratadas de <i>Khaya ivorensis</i> .....	16
<b>Tabela 5.</b>	Análise de variância da variável cromática a*, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e corte*tratamento.....	19
<b>Tabela 6.</b>	Valores médios da variável cromática a* antes e após tratamento térmico.....	19
<b>Tabela 7.</b>	Análise de variância da variável cromática b*, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e corte*tratamento.....	20
<b>Tabela 8.</b>	Valores médios das variáveis L* e C antes de tratamento térmico da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	20
<b>Tabela 9.</b>	Análise de variância da variável cromática L*, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e corte*tratamento.....	23
<b>Tabela 10.</b>	Análise de variância da variável cromática L*, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e corte*tratamento.....	23
<b>Tabela 11.</b>	Valores de Ra, Rz e Rt em $\mu\text{m}$ , referentes ao acabamento e plano de corte da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> antes de tratamento térmico.....	24
<b>Tabela 12.</b>	Análise de variância de Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de corte e de acabamento de <i>Khaya ivorensis</i> antes de tratamento térmico.....	24
<b>Tabela 13.</b>	Análise de variância de Rz ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de corte e de acabamento de <i>Khaya ivorensis</i> antes de tratamento térmico.....	24
<b>Tabela 14.</b>	Valores médios das variáveis Ra, Rz e Rt antes e após tratamento térmico, em função dos tratamentos e planos de corte.....	25
<b>Tabela 15.</b>	Análise de variância de Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de tratamento, corte e tratamento*corte de <i>Khaya ivorensis</i> antes de tratamento térmico.....	25

<b>Tabela 16.</b>	Análise de variância de Rz ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de tratamento, corte e interação tratamento*corte de <i>Khaya ivorensis</i> antes de tratamento térmico.....	27
<b>Tabela 17.</b>	Resultados dos módulos de elasticidade ( $E_b$ e $E_b/\rho$ ) em Mpa, organizados em função do tipo de tratamento e corte de <i>Khaya ivorensis</i> .....	27
<b>Tabela 18.</b>	Análise estatística de significância do efeito do corte, tratamento e corte*tratamento do módulo de elasticidade relativo ( $E_b/\rho$ ) antes e após a termorretificação.....	28



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	(A) Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L*a*b*. L*: Luminosidade (do preto ao branco). a* e b*: variáveis cromáticas (-60 a +60, verde ao vermelho e azul ao amarelo, respectivamente). (B) Diagrama de cromaticidade (Fonte: Lopes, 2012).....	3
<b>Figura 2:</b>	Retração e distorção características de peças circulares, quadradas e retangulares de acordo com a direção dos anéis de crescimento (Fonte: Wood Handbook, 2010).....	5
<b>Figura 3:</b>	Representação das superfícies geométrica, real e efetiva.....	5
<b>Figura 4:</b>	Procedimento para obtenção das variáveis de cor através do espectrofotômetro portátil Konica Minolta CM 2600d.....	9
<b>Figura 5:</b>	Representação das faces aplainadas e lixadas em uma amostra de <i>Khaya ivorensis</i> .....	10
<b>Figura 6:</b>	Representação gráfica das variáveis relacionadas ao parâmetro de amplitude da rugosidade, Ra, Rz e Rt.....	11
<b>Figura 7:</b>	Variação do teor de umidade (%) em função do tipo de tratamento da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	13
<b>Figura 8:</b>	Representação gráfica da variação da densidade (%) de <i>Khaya ivorensis</i> de acordo com os diferentes tratamentos e planos de corte.....	15
<b>Figura 9:</b>	Imagens dos planos anatômicos da seção transversal (A), longitudinal tangencial (B) e longitudinal radial (C) da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> ....	16
<b>Figura 10:</b>	Efeito dos diferentes tratamentos e planos de corte nas variáveis a*(A) e b* (B) das amostras de <i>Khaya ivorensis</i> .....	18
<b>Figura 11:</b>	Efeito dos diferentes tratamentos e planos de corte nas variáveis L* (C) e C (D) das amostras de <i>Khaya ivorensis</i> .....	22
<b>Figura 12:</b>	Efeito do tipo de tratamento e plano de corte nas variáveis Ra, Rt e Rz em $\mu\text{m}$ , da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	26
<b>Figura 13:</b>	Módulo de elasticidade, Eb e Eb/ $\rho$ , em MPa, em função dos tratamentos e planos de corte.....	29



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>2</b>
2.1. A espécie <i>Khaya ivorensis</i> .....	2
2.2. Colorimetria.....	2
2.3. Propriedade Mecânica: Módulo de elasticidade (MOE).....	3
2.4. Propriedades físicas da madeira .....	3
2.4.1. Densidade.....	3
2.4.2. Teor de umidade.....	4
2.4.3. Variação volumétrica.....	4
2.4.4. Rugosidade.....	5
2.5. Termorreificação.....	6
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>8</b>
3.1. Preparação do material, determinação da umidade e volume.....	8
3.2. Determinação da densidade aparente.....	8
3.3. Determinação do módulo de elasticidade (MOE).....	8
3.4. Determinação da luminosidade e das variáveis cromáticas.....	9
3.5. Determinação da rugosidade da madeira.....	10
3.6. Termorreificação.....	11
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>13</b>
4.1. Propriedades físicas.....	13
4.1.1. Teor de umidade.....	13
4.1.2. Densidade aparente.....	14
4.1.3. Variação volumétrica.....	16

4.1.4. Coloração.....	17
4.1.5. Rugosidade.....	23
4.2. Propriedades mecânicas.....	27
4.2.1. Módulo de Elasticidade (Eb) e Módulo de Elasticidade Relativo (Eb/ρ).....	27
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>32</b>



## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (2010), o Brasil possui um grande potencial produtivo, e vem aumentando sua participação no mercado internacional. Porém, há ainda uma grande resistência à aceitação de muitos produtos madeireiros e não madeireiros no comércio mundial, principalmente de produtos originários da região Amazônica, a qual possui uma exploração em sua maioria ilegal e desordenada.

Como forma de suprir a demanda por matéria-prima de qualidade e regularizada, a tendência é cada vez maior do uso de florestas plantadas, que em sua grande maioria é de pinus e eucalipto, espécies estas que estão em alto grau de domesticação e são alvos de muitas pesquisas e produção de conhecimento tecnológico. Segundo o IBGE (2015), a extração anual de madeira para uso industrial até o ano de 2014, para a produção de celulose, serrados, laminados, chapas e outros usos advindo de florestas plantadas, era de 132.724 mil metros cúbicos de madeira.

Muitas espécies, nativas e exóticas, de grande potencial madeireiro existentes atualmente no país, carecem de conhecimento científico e tecnológico acarretando em uma série de desvantagens como o desuso, desempenho insatisfatório ou uma incorreta utilização das mesmas como afirma Zenid (1997). A introdução de espécies exóticas no Brasil de forma intencional era mais comum para uso no paisagismo, arborização urbana, agropecuária, assim como para subsistência e produção, mesmo que isso levasse a problemas de competição com as espécies endêmicas por falta de conhecimento (LEÃO et al., 2011). Neste contexto, é importante ressaltar a busca de conhecimento para a caracterização de espécies introduzidas, que vêm sendo utilizadas em média e larga escala para produção de bens.

Segundo Carvalho et al. (2010), o mogno africano (*Khaya ivorensis* A.Chev.), espécie originária da África pertencente à família Meliaceae, foi trazido ao Brasil com o objetivo de substituir o mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*), pois o primeiro possui uma maior resistência à praga do mogno nativo, a *Hypsiphyla grandella*, um inseto da ordem Lepidoptera que destrói o broto terminal das árvores jovens (LUNZ et al., 2009). A sua madeira é de boa qualidade, possuiu características tecnológicas satisfatórias, além de possuir alto valor comercial e boa aceitação no mercado, principalmente o europeu, sendo muito utilizado em movelaria, acabamentos, embarcações e painéis como cita França et al. (2015). Plantios desta espécie estão distribuídos nas regiões sul, sudeste, centro-oeste e nordeste. Adicionalmente, sua coloração é um grande atrativo quando utilizado para fins decorativos.

Alguns estudos já realizados com a madeira de *Khaya ivorensis*, indicam que em alguns parâmetros avaliados, esta ainda pode melhorar, quando comparada a *Khaya senegalensis*, que possui melhores resultados avaliados do que a primeira no que diz respeito às propriedades mecânicas da madeira, segundo França et al. (2015). A otimização da madeira de *K. ivorensis* seria de grande importância pois esta espécie possuiu o crescimento mais acelerado que a *K. senegalensis* como afirma Silva et al. (2016).

Já se sabe que a termorreificação pode acarretar na melhoria de algumas propriedades mecânicas, redução da higroscopicidade e melhoria da estabilidade dimensional das peças.

Sendo assim, a utilização de tratamento térmico já muito utilizado em outros países, já demonstrou, em alguns casos, ser eficaz na melhoria de algumas das propriedades físicas e



mecânicas da madeira, permitindo a ampliação do uso de tais espécies em diversos outros produtos.

Assim o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades naturais da superfície da madeira cortadas radialmente e tangencialmente, tais como: rugosidade, coloração e o efeito da termorretrificação sobre estas propriedades; e também sobre: a densidade aparente, teor de umidade de equilíbrio higroscópico e sua rigidez.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. A espécie *Khaya ivorensis*

Conhecido como mogno africano, o gênero *Khaya* pertence à família Meliaceae, e tem sua origem na África. Uma de suas espécies muito utilizada é a *Khaya ivorensis*, a qual foi introduzida no Brasil com objetivo de substituir o mogno brasileiro. Além de ter a sua exploração e comercialização proibida por lei, a espécie brasileira é susceptível ao ataque da *Hypsipyla grandella*, inseto da ordem Lepidoptera, e principal praga do mogno no Brasil (SILVA et al., 2014)

De acordo com Opuni-Frimpong et al. (2008), o mogno africano de uma forma geral, possui características muito desejáveis, pois sua cor varia do rosado a um marrom-escuro, possui características físicas que garantem boa trabalhabilidade. Desta forma é muito utilizado em móveis, acabamentos na construção, pisos, fabricação naval, além de sua casca ser utilizada para extração de corantes e ter fins medicinais, agindo contra gripes e resfriados.

A espécie *Khaya ivorensis* é arbórea, de grande porte e possui madeira de boa qualidade, fazendo parte de plantios para fins comerciais nos Estados do Espírito Santo, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Bahia e Paraná (FRANÇA et al., 2015). Esta espécie pode atingir uma altura de até 60 metros, um diâmetro acima de 2 metros, possui crescimento rápido e é fenotipicamente muito similar ao mogno brasileiro (SOUZA, 2015).

De acordo com Carvalho et al. (2010), a espécie pode ocorrer entre 0 a 450 metros de altitude, sendo comumente observada em locais mais úmidos, suportando inundações, porém mais susceptíveis à época de estiagem. Segundo os mesmos autores, a madeira desta espécie por possuir uma menor massa específica básica, é indicada para fins em que esta não seja submetida a altas tensões, como móveis, compensados e acabamentos na construção civil. Os produtos derivados desta madeira são destinados principalmente ao mercado europeu.

### 2.2. Colorimetria

O termo empregado para a medição de cor é conhecido como colorimetria, e é considerado um ramo da ciência, criado para auxiliar na definição das cores de objetos, através de variáveis numéricas, que resulta da interação entre diversas superfícies e a luz refletida nelas (GOUVEIA, 2008). Segundo o mesmo autor, existem dois métodos utilizados para avaliação da cor; o método comparativo, o qual tem como base um Atlas de cor, sendo o sistema Munsell o mais conhecido; e o método quantitativo, o qual emprega diversos aparelhos para obtenção de resultados colorimétricos de qualidade, de forma que se tenha uma avaliação que fuja da subjetividade de quem avalia.

A cor aplicada à madeira pode ser considerada um parâmetro que garante um maior valor no mercado, pois esta característica, juntamente com o desenho da grã, são atributos muito valorizados nas madeiras tropicais, reconhecidamente apreciadas no mercado internacional, atribuindo qualidade e auxiliando na classificação, como afirma Moura e Brito (2011).



De acordo com Silva et al. (2014), o sistema CIE-L\*a\*b\* é um dos mais utilizados para medição de cor, o qual utiliza a norma CIE (Comissão Internacional de Iluminantes – 1976) e trabalha com as variáveis cromáticas a\* (verde-vermelho) e b\* (azul-amarelo) variando de -60 a +60 e a variável de luminosidade L\*, que vai de zero a 100 (preto-branco). Os mesmos autores afirmam que há diversos fatores que podem influenciar na cor da madeira, por exemplo: composição química, anatomia, idade, altura e fatores genéticos. Além disso, a própria oxidação da madeira causada principalmente pela luz, a qual reage com componentes químicos, é capaz de mudar sua coloração.

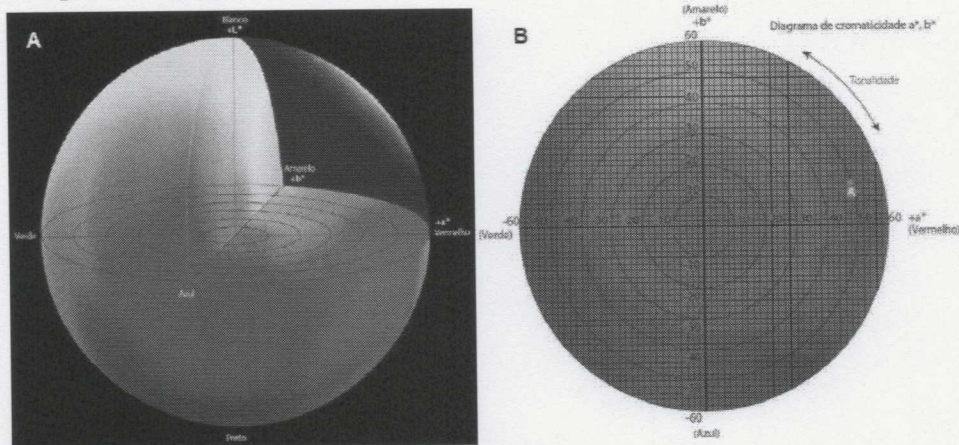


Figura 1. (A) Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L\*a\*b\*. L\*: Luminosidade (do preto ao branco). a\* e b\*: variáveis cromáticas (-60 a +60, verde ao vermelho e azul ao amarelo, respectivamente). (B) Diagrama de cromaticidade (Fonte: Lopes, 2012).

Na indústria madeireira, a cor é um importante fator e está associado principalmente à finalidade e uso do produto, assim como à tendência da moda, atribuindo valores a móveis, instrumentos musicais e lâminas para fabricação de painéis ou acabamento decorativo (SILVA et al., 2015).

### 2.3. Propriedade Mecânica: Módulo de elasticidade (MOE)

Segundo o Forest Products Laboratory - USDA (2010), no livro *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, elasticidade é a capacidade que um material possui quando após a retirada de uma certa carga aplicada, o material volta a sua forma original mesmo que tenha sofrido alguma deformação. Quando esta carga é muito alta, ocorre a ruptura ou deformação plástica, que seria a incapacidade do material voltar à sua forma original após a deformação.

O módulo de elasticidade ou MOE, também representado pelas letras Eb, usualmente é fornecido em Mega Pascoal (MPa) ou quilogramas-força por centímetro quadrado (kgf/cm<sup>2</sup>) e pode ser obtido através do método destrutivo, ensaios de compressão paralela, tração paralela e flexão realizados por máquinas de ensaios mecânicos, e não destrutivo, que pode ser por ultra-som, raio-x, entre outros (STANGERLIN et al., 2008). De acordo com Teixeira (2008), tal parâmetro juntamente com alguns outros, como massa específica, retratibilidade e módulo de ruptura, são muito utilizados para avaliação das propriedades físico-mecânicas das madeiras e de extrema importância para a caracterização da madeira sólida, fornecendo de certa forma uma boa noção da resistência mecânica da mesma. Os mesmos autores afirmam que há uma alta correlação entre a massa específica e as propriedades de resistência à flexão estática, como módulo de ruptura e elasticidade.



## **2.4. Propriedades físicas da madeira**

### **2.4.1. Densidade**

A densidade de uma árvore pode variar dentro do mesmo indivíduo e até mesmo entre indivíduos da mesma espécie (MENDES et al., 2004), e aumenta conforme há um crescimento em espessura da parede celular das fibras, o que pode ser relacionado com o crescimento da árvore (TEIXEIRA, 2008), ou um aumento na proporção das fibras com relação aos vasos, por exemplo, como afirma Silva et al. (2014). Ainda de acordo com o mesmo autor, a densidade varia de acordo com a umidade, pois madeiras mais porosa possuem uma maior capacidade de absorver e perder água para o meio.

As densidades usualmente calculadas e determinadas em madeiras são a densidade básica e a aparente. A primeira refere-se ao peso absolutamente seco pelo volume total saturado como afirma Foelkel et al. (1971). Já a densidade aparente é a relação massa e volume, ambos determinados na mesma condição de umidade de acordo com Rezende et al. (1988).

De acordo com Dias; Lahr (2004), a densidade da madeira também está relacionada à diversas propriedades de resistência e rigidez, afirmando que a partir do estudo destas relações é possível conhecer uma através da outra, sendo possível se ter uma noção do comportamento da madeira sob determinadas situações de estresse mecânico, se avaliando somente a densidade. Segundo o mesmo autor, diversos estudos mundiais apontam uma relação em sua maioria linear, entre o módulo de elasticidade e a densidade da madeira.

### **2.4.2. Teor de umidade**

O teor de umidade está relacionado com a presença de água no interior da madeira, que por ser um material altamente higroscópico, sofre influência da umidade do meio em que se encontra.

Segundo Silva et al. (2014), sua determinação é de extrema importância dependendo do uso e função do produto. Além disso, teores de umidade elevados, abaixo do ponto de saturação das fibras, tendem a ocasionar defeitos durante a secagem como empenamentos e rachaduras.

De acordo com Anjos (2014), outro problema causado pela variação de umidade na madeira seria a variação dimensional das peças, gerando um material instável, pois há retratibilidade e inchamento volumétrico, além de perda de massa. Rezende et al. (1988) afirmam que a madeira só começa a apresentar sinais de variação no seu volume ao atingir valores inferiores a 28% de umidade, pois este é considerado um valor crítico denominado Ponto de Saturação das Fibras (PSF), o qual representa o momento em que não resta mais água livre na madeira, somente a água presente na parede celular, como afirma Martins (1988).

### **2.4.3. Variação Volumétrica**

A madeira ao absorver e perder água contida em sua estrutura tende a variar dimensionalmente devido ao inchamento e contração da peça. De acordo com Rezende et al. (1988), o termo retratibilidade volumétrica total refere-se à contração da peça saturada até completamente seca em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , devido à perda total de água, de forma que essa variabilidade ocorre consideravelmente após atingir o PSF. Já a variação volumétrica normal é mensurada levando-se em consideração sua variação dimensional até determinada umidade.

A contração também é diferente nas direções radiais, longitudinais e tangenciais pelo fato da madeira ser considerado um material anisotrópico, sendo que sua maior retratibilidade



se dá na direção tangencial, podendo ser duas vezes maior do que na radial, enquanto que na direção longitudinal quase não há contração (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Em virtude da madeira contrair de acordo com o seu plano de corte, diferentes tipos de deformações podem surgir dependendo da peça, como representado na Figura 2.

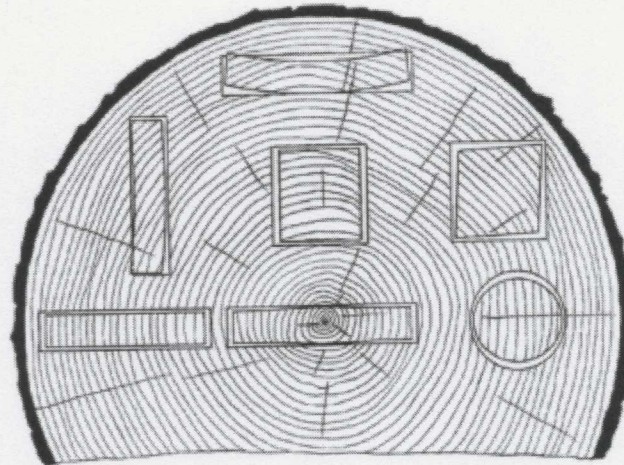


Figura 2. Contração e distorção características de peças circulares, quadradas e retangulares de acordo com a direção dos anéis de crescimento (Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010)

#### 2.4.4. Rugosidade

De acordo com Coelho et al. (2005), a rugosidade da madeira é um parâmetro ainda pouco avaliado no processo de caracterização tecnológica pois ainda não foram estabelecidos critérios universais para tal procedimento, nem equipamentos específicos que forneçam resultados completamente confiáveis. Segundo os mesmos autores, esta varia de acordo com a estrutura da madeira e tipo de processamento, e possui grande importância pois influencia em processos de usinagem, colagem e acabamento de superfícies. Tais irregularidades da superfície da madeira devem ser conhecidas e minimizadas de forma que se evite o surgimento de defeitos nos produtos finais.

A rugosidade é definida por Filho (2011) como sendo uma superfície que possui desvios microgeométricos, caracterizada por saliências e reentrâncias, estas quais que conceituam uma superfície geométrica e que pode ser representada por uma superfície ideal, isenta de erros de forma e textura, uma superfície real, resultante do processo de fabricação e que limita o corpo e o separa do meio que o envolve e uma superfície efetiva, a qual é avaliada pela técnica de medição. Ver Figura 3.

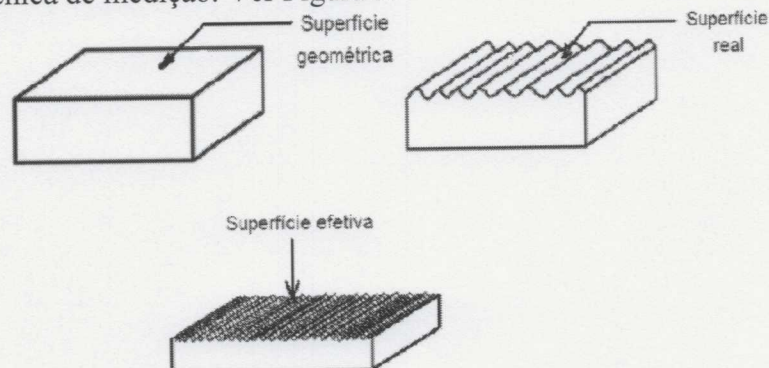




Figura 3. Representação das superfícies geométrica, real e efetiva.

Para a determinação da rugosidade da madeira, são utilizados equipamentos chamados rugosímetros, que foram desenvolvidos para caracterizar a rugosidade de outros materiais, mensurando a rugosidade de diversas formas, sendo estas divididas por contato (apalpação, pneumáticos, emissão acústica) e não contato (óticos).

Ao se determinar a rugosidade, é gerado um perfil efetivo da rugosidade da superfície que possui picos e vales, como representado na Figura 6. As variáveis mensuradas avaliam e interpretam de diferentes formas o perfil, podendo ser elas: Ra (rugosidade aritmética ou média), Rt (rugosidade máxima) e Rz (rugosidade total) pois são as mais utilizadas para efeito de caracterização da usinagem da madeira, Rp (altura máxima do pico do perfil), Rv (profundidade máxima do vale do perfil), Rq (rugosidade quadrática média), Rsk (fator de assimetria) e Rsm (valor médio de espaçamento entre os picos do perfil e a linha média, medido dentro do comprimento de amostragem), segundo Filho (2011). A variável mais comumente utilizada para avaliar o acabamento da superfície é Ra (Unsal e Ayrilmis, 2005), porém outras variáveis como Rt e Rz são usadas de forma complementar a primeira supracitada.

## 2.5. Termorreificação

A termorreificação pode ser definida como um tratamento térmico ao qual a madeira é submetida, variando em função da temperatura final do processo, tempo de permanência, taxa de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira (VARGAS et al., 2015) com objetivo de melhorar a estabilidade dimensional e durabilidade natural com afirma Lopes et al. (2014). Em alguns casos, até mesmo mudar sua cor de forma intencional para agregar maior valor econômico.

A madeira tratada termicamente já é utilizada há muitos anos, principalmente em áreas externas, pois se sabia que ao queimar sua superfície, aumentava-se então sua durabilidade. O estudo da madeira tratada com o calor iniciou-se na Alemanha, por volta de 1930, por Stamm e Hansen e posteriormente, nos Estados Unidos por White, na década de quarenta (THERMOWOOD, 2003). Desde então, diferentes estudos vêm sendo realizados em diversos países como França, Finlândia e Holanda, a fim de se saber mais sobre os benefícios deste processo.

O aquecimento controlado da madeira, através de temperatura e tempo pré-estabelecido, gera transformações nas propriedades químicas e físicas da mesma, agindo na degradação de certos componentes químicos e estruturais, de forma que algumas características desejáveis já começam a surgir em torno de 150°C. Os tratamentos térmicos variam muito de acordo com a anatomia da espécie e sua composição química, teor de umidade da madeira, o tamanho da amostra e as características desejáveis ao produto final. Porém, normalmente, nesse tipo de tratamento, as temperaturas atingem no máximo 280°C, e variam entre 15 minutos a 24 horas (POUBEL et al., 2013).

No processo de termorreificação, um dos componentes químicos mais degradados é a hemicelulose, devido a sua alta sensibilidade ao calor. Sabe-se ainda, que as microfibrilas de celulose são envoltas por este componente, e juntamente com a lignina formam uma matriz hidroreativa, presente na parede celular. Tal matriz possui boa higroscopicidade, influenciando no processo de expansão dimensional da madeira quando esta absorve umidade. Por isso, durante o processo de tratamento térmico, há uma redução da higroscopicidade da



madeira à medida que a hemicelulose é degradada, sendo esta uma das vantagens da termorretificação, pois assim se cria certa estabilidade dimensional da peça (GOUVEIA, 2008). O mesmo autor afirma que conforme há o aquecimento da madeira, grupos de hidroxilas hidrofílicos diminuem enquanto são substituídos por grupos hidrofóbicos gerando ligações cruzadas entre as fibras da madeira, o que diminui consideravelmente a capacidade da água de penetrar na mesma, proporcionando também certa estabilidade dimensional.

De acordo com Weiland e Guyonnet (2003), um outro benefício deste tratamento seria sua ação fungicida, pois ao degradar algumas moléculas da madeira, outras surgem, como o furfural. Este composto é capaz de reticular na cadeia de lignina presente na madeira, impedindo que enzimas de alguns fungos xilófagos responsáveis pela degradação de lignina, reconheçam o substrato, impedindo a decomposição da madeira. Em países do hemisfério norte, os quais iniciaram o processo de termorretificação, o principal objetivo além da modificação na estrutura da madeira de forma a garantir uma melhor estabilidade, era também fazer com que a madeira utilizada por eles parecesse com as madeiras tropicais de maior valor de mercado, pois em alguns casos, o tratamento térmico pode gerar alterações na cor da madeira, além de ser um processo pouco poluente (ZANUNCIO et al., 2014)

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Preparação do material, determinação da umidade e volume

Para realização dos testes foram utilizadas amostras de duas árvores de mogno africano (*Khaya ivorensis*), com aproximadamente 33 anos de idade, oriundas do campus da EMBRAPA Agrobiologia, Seropédica, RJ. Destes exemplares foram retirados pranchões, os quais foram levados para o Laboratório de Propriedades Físico-mecânicas da Madeira do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ, para serem climatizados em ambiente com umidade relativa média de 65% e temperatura média de 20°C. Depois de climatizado, o material foi levado para ser desdobrado em corpos menores, até se obter 48 amostras de mogno africano com 400 mm x 65 mm x 29 mm, no comprimento, largura e espessura, respectivamente, sendo 24 cortadas no plano radial e 24 no plano tangencial.

Após o desdobro, o material permaneceu em ambiente climatizado, nas mesmas condições anteriores, onde foi devidamente identificado. Após a estabilização do peso, o material foi pesado em uma balança analítica de precisão e teve as suas umidades determinadas por aparelho medidor de umidade, por contato. Para determinação do volume das amostras foi utilizado paquímetro de precisão digital (medições da largura e espessura) e régua de aço de precisão (medição do comprimento), sendo que a variação volumétrica foi obtida pela diferença entre o volume antes e após a termorretrificação (em ambiente climatizado).

Todas as amostras foram separadas em grupos que seriam destinados à diferentes tratamentos, identificadas como nt (não tratadas), 160, 180 e 200°C.

Os procedimentos que se seguem foram determinados antes e após o tratamento térmico da madeira de mogno africano, de modo a se verificar o efeito das diferentes temperaturas nestas propriedades: teor de umidade, densidade aparente, módulo de elasticidade na flexão, coloração da madeira e rugosidade.

#### 3.2. Determinação da densidade aparente

O valor da densidade aparente foi determinado após a estabilização da umidade das amostras, após estas atingirem teor de umidade médio em torno de 13%, e foi feito pela simples divisão do peso de cada amostra pelo seu respectivo volume, como mostra a Equação 1. Para determinação do peso foi usado balança com precisão em duas casas decimais.

$$\rho_{ap} = m/v \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  = peso da amostra a 13% de umidade (g);

$v$  = volume da amostra a 13% de umidade ( $\text{cm}^3$ ).

#### 3.3. Determinação do módulo de elasticidade (MOE)

Depois de climatizada, as 48 amostras de mogno africano com 400 mm x 65 mm x 29 mm, no comprimento, largura e espessura, respectivamente foram ensaiadas na flexão para determinação do seu módulo de elasticidade, sendo 24 amostras testadas no plano radial e 24 no plano tangencial. Este procedimento ocorreu antes e após a termorretrificação, sendo que



após a termorretrificação as amostras tiveram reduzida sua espessura, para retirar os empenamentos, quando ocorreram.

Os ensaios de flexão estática foram realizados na máquina universal de ensaios mecânicos marca CONTENCO com capacidade de 30 toneladas. A relação entre o vão de teste e a espessura/altura das amostras foi de 12,6 vezes. Quanto ao carregamento, a carga foi interrompida quando ocorreu deslocamento da linha neutra igual ao vão de ensaio dividido por 200 (L/200).

O modulo de elasticidade foi determinada pela equação a seguir:

$$MOE = \frac{\Delta PL^3}{\Delta \delta b^3 h.4}$$

Onde:

$\Delta P$  = variação da carga (kgf);

$\Delta \delta$  = variação do deslocamento (cm);

L = vão do ensaio (cm);

b = espessura da amostra (cm);

h = largura da amostras (cm)

### 3.4. Determinação da luminosidade e das variáveis cromáticas

Com o intuito de se obter uma superfície livre de oxidação, todas as amostras passaram por lixamento e aplainamento, uma vez em cada face tangencial e radial, para posterior determinação da cor e rugosidade. Para determinação da cor, foi utilizado o espectrofotômetro portátil Konica Minolta CM 2600d, apresentado na Figura 4, que utiliza o sistema de medição internacional CIE 1976. Foram realizadas duas medições por contato direto entre a superfície da amostra em três áreas pré-determinadas ao longo do comprimento (duas nas extremidades e uma central) em cada face, e a área de visão do aparelho, somando seis medições para cada lado (faces 1, 2, 3 e 4 como mostra a Figura 5). Assim duas faces, uma larga e outra estreita, foram lixadas e as demais aplainadas. No total foram 12 medições para o plano lixado e 12 para o plano aplainado, tanto nas amostras com orientação radial quanto tangencial, totalizando 576 medições para cada tipo de tratamento.

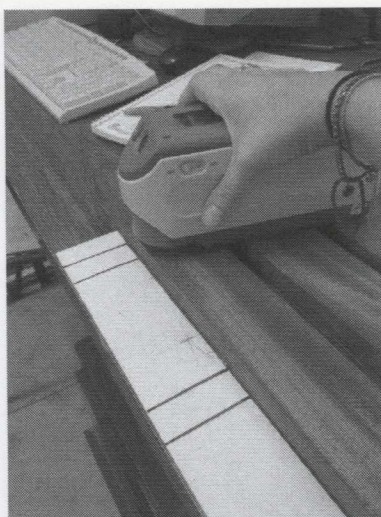




Figura 4. Procedimento para obtenção das variáveis de cor através do espectrofotômetro portátil Konica Minolta CM 2600d.

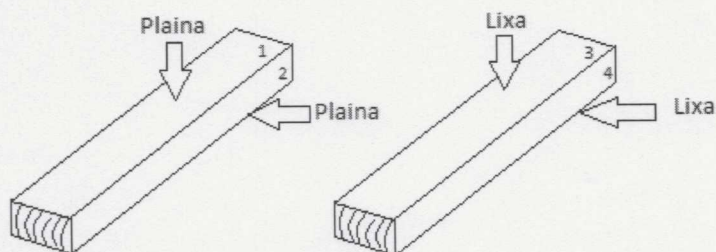


Figura 5. Representação das faces aplainadas e lixadas em uma amostra de *Khaya ivorensis*.

As variáveis cromáticas são representadas pelas letras:  $a^*$  (verde-vermelho) e  $b^*$  (azul-amarelo) que variam de -60 à +60, sendo que o sinal negativo na variável  $a^*$  e  $b^*$  representam respectivamente aumento na cor verde e azul, enquanto que o sinal positivo indica um aumento respectivamente na cor vermelha e amarela. Já a luminosidade, variável  $L^*$ , varia de zero (preto) à cem (branco) e representa somente a luminosidade. Foi analisada também a variável  $C$ , referente à saturação da cor. A variável  $C$  é calculada como sendo a soma dos quadrados de  $a^*$  e  $b^*$  e após a soma é calculado a raiz quadrada.

Durante todo o procedimento, utilizou-se diâmetro de 3 mm (SAV), o iluminante padrão D65 e observador padrão suplementar  $10^\circ$ . De posse dos dados, estes foram transferidos para o software SpectraMagic NX™ (Konica Minolta) e então exportados para o software Microsoft Office EXCEL e o software Statistica 7 para análise dos dados.

### 3.5. Determinação da rugosidade da madeira

Para a determinação da rugosidade, foi utilizado o rugosímetro portátil TR200 da marca DIGIMESS. A medição ocorreu no sentido paralelo à orientação das fibras. O comprimento de amostragem (*cutoff*) igual a 2,5 mm realizado quatro vezes, totalizando um comprimento de medição igual 1,0 cm. Utilizou-se o *Range* igual a  $\pm 80 \mu\text{m}$  que representa o quanto que oscila a leitura da agulha na vertical, sendo necessário utilizar a maior amplitude possível devido à anatomia e desvio de grã característico da madeira de mogno africano.

Utilizou-se o filtro matemático Gauss por ser o mais usado na área de tecnologia da madeira. Foi realizada uma medição no meio do comprimento das amostras de cada face lixada e aplainada. O parâmetro utilizado nesse processo foi somente o de amplitude, sendo este representado apenas pelas variáveis:  $R_a$  (rugosidade aritmética ou média),  $R_t$  (rugosidade máxima) e  $R_z$  (rugosidade total), pois são as mais utilizadas para efeito de caracterização da usinagem da madeira. As representações gráficas destas variáveis estão representadas na Figura 6.



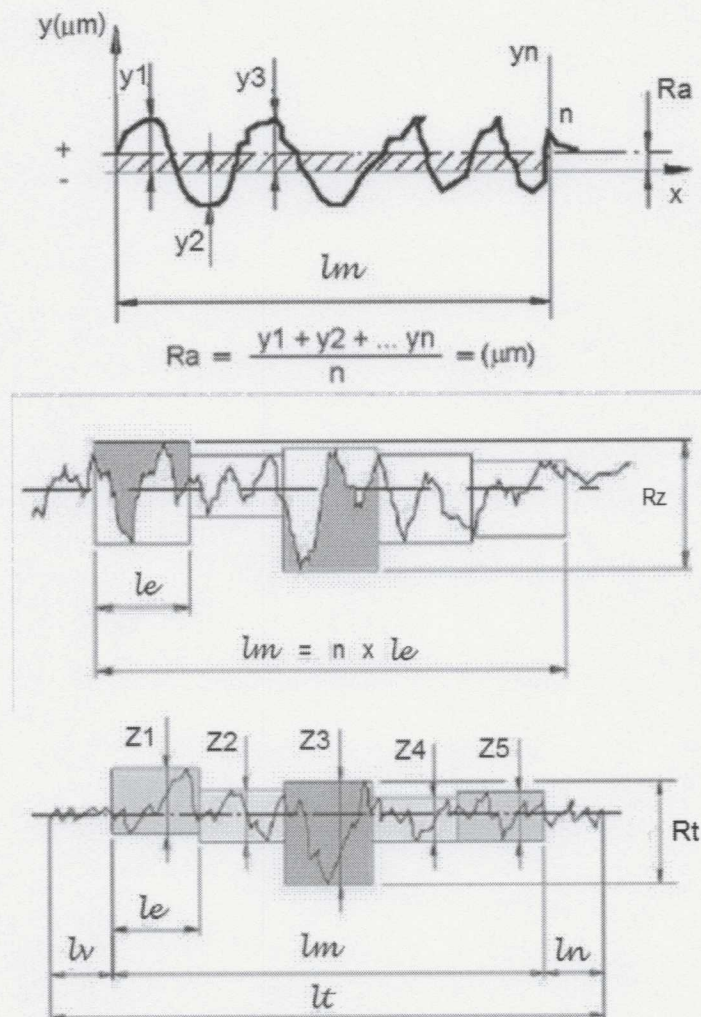


Figura 6. Representação gráfica das variáveis relacionadas ao parâmetro de amplitude da rugosidade,  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$ .

Os resultados obtidos através do rugosímetro foram transferidos para o Microsoft Office EXCEL e o software Statistica 7 para análise dos dados.

### 3.6. Termorretificação

A termorretificação ocorreu às temperaturas de  $160^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$ , totalizando 12 amostras por temperatura, sendo que um lote não recebeu nenhum tipo de tratamento (testemunha).

Para este procedimento, foi utilizado um forno mufla elétrico da marca Linn Elektro Therm, com dimensões de  $60 \times 60 \times 70$  cm, do Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Produtos Florestais.

Os tratamentos de termorretificação foram realizados em quatro etapas para cada temperatura, sendo estas: (1) as amostras foram aquecidas até a temperatura de  $100^\circ\text{C}$  em um período de 120 minutos; (2) a temperatura foi de  $100^\circ\text{C}$  até a temperatura estabelecida para a termorretificação em cada tratamento, sendo assim:  $160^\circ\text{C}$  em 30 minutos,  $180^\circ\text{C}$  em 40 minutos e  $200^\circ\text{C}$  em 50 minutos; (3) as amostras permaneceram na temperatura de termorretificação por 90 minutos e (4) as amostras permaneceram por 120 minutos dentro da mufla até o resfriamento do material.

Após o tratamento térmico, as amostras foram novamente levadas para climatização até peso constante. Após equilíbrio, as amostras foram novamente processadas (largura, espessura e comprimento) para corrigir as distorções nos planos devido aos pequenos empenamentos, quando ocorrido.

Após esta etapa, os procedimentos anteriores feitos para a madeira sem tratamento térmico foram repetidos, e determinados: teor de umidade, densidade aparente, coloração da madeira, módulo de elasticidade e rugosidade.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Propriedades Físicas

#### 4.1.1. Teor de Umidade

Os resultados obtidos do teor de umidade de equilíbrio antes e após a termorreificação estão apresentados através da média, na Tabela 1, assim como seu desvio padrão. O teor de umidade de equilíbrio das amostras antes do tratamento apresentou uma média de 13,22 %, enquanto que após a termorreificação, esta apresentou valor menor igual a 9,87 %. Observa-se que a medida que se aumenta a temperatura de tratamento, há uma diminuição do teor de umidade de equilíbrio. Tal resultado corrobora com o que afirma Gouveia (2008), de que após o tratamento térmico, a madeira tende a diminuir sua higroscopicidade devido à degradação da matriz hidroreativa composta por lignina e hemicelulose presente na parede celular, e a substituição de grupos de hidroxilas hidrofílicos por grupos hidrofóbicos.

Tabela 1. Teor médio de umidade de equilíbrio da madeira de *Khaya ivorensis* antes e após tratamento térmico

Tratamento (°C)	Antes do tratamento		Após tratamento	
	média (%)	desvio padrão	média (%)	desvio padrão
nt	12,90	1,79	12,90	1,79
160	13,22	2,79	10,01	1,65
180	13,26	1,77	9,39	0,96
200	13,52	1,50	7,17	0,82
Média	13,22	1,96	9,87	1,30

Onde: nt são as amostras não tratadas termicamente

Ainda com relação a umidade, a Figura 7 representa graficamente a variação da mesma em função dos tratamentos.

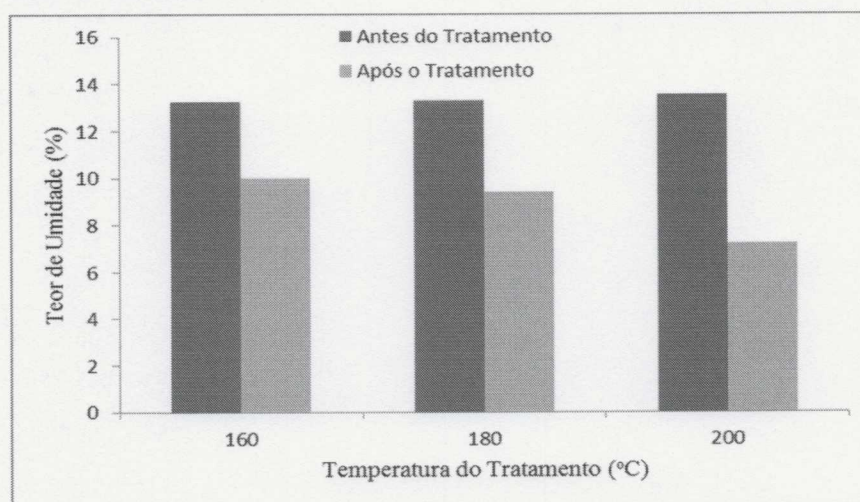


Figura 7. Variação do teor de umidade (%) em função do tipo de tratamento da madeira de *Khaya ivorensis*.



#### 4.1.2. Densidade aparente

Para garantir o não efeito da densidade nos resultados do experimento, as amostras foram selecionadas de modo que a densidade média de cada grupo (planos de corte e temperatura de tratamento térmico) não mostrasse diferenças estatísticas. Assim, após a seleção das amostras destinadas a cada temperatura de tratamento, foi feita análise de variância para verificar se as diferenças entre as médias eram estatisticamente significativas. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise de variância para densidade da madeira de *Khaya ivorensis*, antes do tratamento térmico, para efeito do corte, tratamento e interação corte\*tratamento

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Corte	0,16592	1	0,16592	17,977	0,000128
Tratamento	0,01094	3	0,00365	0,395	0,757198
Corte*Tratamento	0,00352	3	0,00117	0,127	0,943544
Resíduo	0,36919	40	0,00923		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Observa-se na Tabela 2 que houve valor de probabilidade (p) menor que 0,05 para o plano de corte, indicando assim que há diferença significativa entre as densidades em função dos diferentes planos de corte. Quanto aos lotes selecionados para serem termorretificados em diferentes temperaturas, assim como a testemunha, não houve diferença significativa. O mesmo pode se dizer quando combinado os diferentes planos de corte com os tratamentos térmicos a serem aplicados, assim como das combinações entre tratamentos e planos de corte. Os resultados destas densidades estão na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios da densidade aparente da madeira de *Khaya ivorensis*, antes e após tratamento térmico

Plano de Corte	Tratamento (°C)	Antes do tratamento		Após tratamento	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Radial	nt	0,648	0,141	0,648	0,141
	160	0,660	0,148	0,635	0,133
	180	0,659	0,106	0,638	0,099
	200	0,668	0,096	0,639	0,094
	média	0,660	--	0,640	--
Tangencial	nt	0,501	0,031	0,501	0,030
	160	0,552	0,061	0,547	0,049
	180	0,553	0,063	0,548	0,051
	200	0,559	0,049	0,545	0,042
	média	0,541	--	0,535	--

Onde: nt são as amostras não tratadas termicamente.



A densidade antes da termorretificação apresentou uma média de  $0,600 \text{ g/cm}^3$ , Carvalho et al. (2010) obtiveram resultados semelhantes para a madeira de mogno africano. Após os tratamentos térmicos, a densidade média foi de  $0,588 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, houve uma redução da densidade aparente, independente do plano de corte, após tratamento térmico, corroborando com os resultados obtidos por Poubel et al. (2013).

Em relação ao plano de corte, observam-se uma densidade média maior no plano radial, no valor de  $0,659 \text{ g/cm}^3$ , quando comparada ao tangencial, o qual apresentou um valor de  $0,541 \text{ g/cm}^3$ , ambos referentes às amostras não tratadas, sendo que esta diferença entre os planos de corte se manteve mesmo após o tratamento térmico (Figura 8). Este resultado ocorreu em função da amostragem, que apesar do cuidado com a escolha e confecção dos corpos de prova, algumas peças radiais devido à diferença de lenho eram mais densas, elevando a média da densidade aparente em tais amostras, justificando os valores mais elevados da densidade no plano radial.

Todas as análises estatísticas foram realizadas ao nível de 5% de significância.

A variação da densidade em porcentagem não apresentou diferenças significativas através de análise estatística tanto com relação ao corte quanto ao tratamento, pois  $p < 0,05$ .

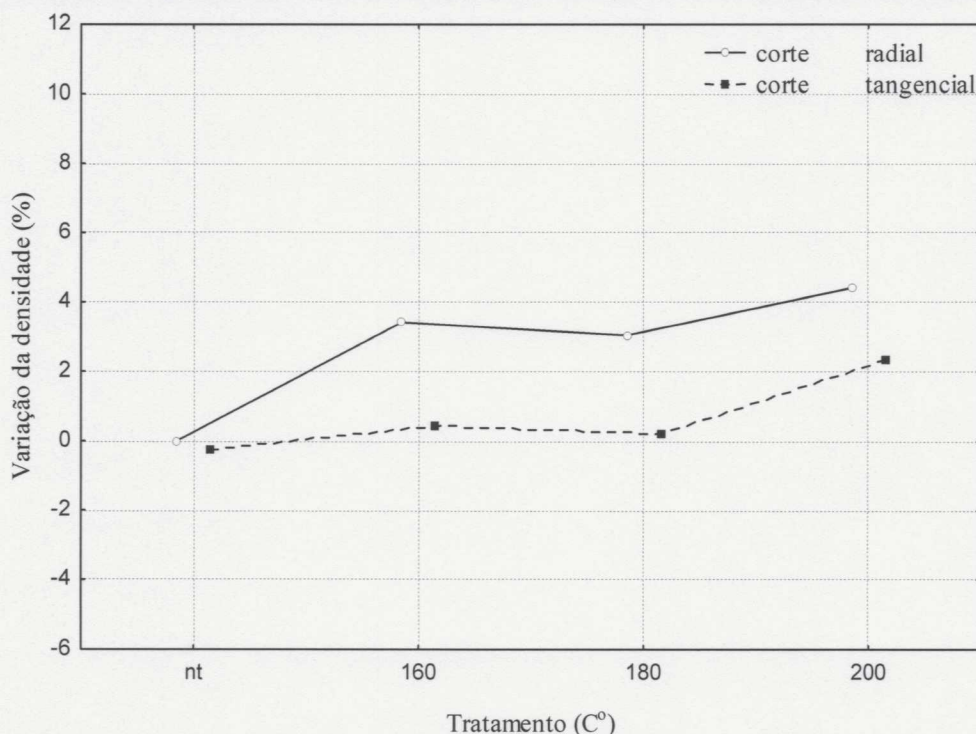


Figura 8. Representação gráfica da variação da densidade (%) de *Khaya ivorensis* de acordo com os diferentes tratamentos e planos de corte.

Observa-se que a variação da densidade no plano de corte radial foi visualmente maior do que no tangencial, relacionando as amostras tratadas com as não tratadas, variando quase 4% a mais em alguns tratamentos. No plano de corte tangencial os valores de variação da densidade quase não se alteram desde as amostras não tratadas até o tratamento de  $180^\circ\text{C}$ , onde a partir deste se observa um acréscimo até o tratamento de  $200^\circ\text{C}$ .



### 4.1.3. Variação Volumétrica

Os resultados da variação volumétrica em porcentagem estão representados pelas suas médias e organizados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios da variação volumétrica (%) das amostras tratadas e não tratadas de *Khaya ivorensis*

Plano de corte	Tratamento (°C)	Média	Desvio padrão
Radial	160	7,03	3,03
	180	10,39	3,04
	200	9,86	1,37
	média	9,09 a	--
Tangencial	160	12,28	8,37
	180	10,77	7,19
	200	11,01	6,97
Média		11,35 a	--

Médias seguidas por mesma letra revelam diferença não significativa pelo Teste de Dunn, ao nível de 5 % de significância.

Pela análise de Kruscall Wallis, excluindo da análise as amostras não tratadas, observou-se que não há diferença entre as médias pelo teste de Dunn, ao nível de 5% de significância.

A variação do volume das amostras se dá pela diferença entre as amostras selecionadas para o tratamento antes e após a termorreificação. Nota-se que a diferença na variação volumétrica entre os tratamentos e entre os cortes não é muito representativa. França et al. (2015) afirmam que a madeira de *Khaya ivorensis* possui média estabilidade dimensional, o que corrobora com os resultados encontrados.

Contudo, a variação média do plano tangencial (11,35%) foi um pouco maior do que a do plano radial (9,09%), corroborando com a teoria de que na direção tangencial a contração é maior do que na radial. Ver Figura 9.

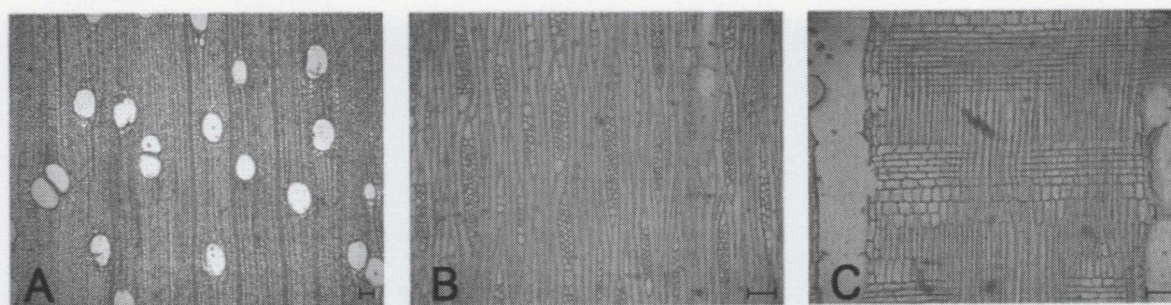


Figura 9. Imagens dos planos anatômicos da seção transversal (A), longitudinal tangencial (B) e longitudinal radial (C) da madeira de *Khaya ivorensis*. (Fonte: França et al., 2015)



#### 4.1.4. Coloração

As variáveis analisadas foram  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  e  $C$ , sendo as duas primeiras variáveis cromáticas ( $a^*$  e  $b^*$ ), as quais obtiveram valores médios antes do tratamento de 14,12 e 21,32 e após o tratamento térmico 13,56 e 19,01, respectivamente. Já as variáveis  $L^*$  e  $C$  resultaram em uma média de 56,90 e 25,63 antes da termorretificação e 52,29 e 23,56 após a termorretificação, respectivamente. Houve uma redução de pigmentação vermelha e amarela ( $a^*$  e  $b^*$ ), uma diminuição de luminosidade ( $L^*$ ) e saturação ( $C$ ).

Com relação ao  $L^*$ , houve um menor efeito da luminosidade após o tratamento térmico, ou seja, a madeira refletiu menos a luz projetada pelo espectrofotômetro. A variável  $C$  que representa a saturação da cor, também se apresentou menor após tratamento. Esta análise representa os resultados de forma geral, não sendo considerado o efeito do tratamento, nem do corte, que serão discutidos a seguir.

Os resultados de cor das variáveis  $a^*$  e  $b^*$  e seus efeitos com relação ao tratamento e tipo de corte estão representados na Figura 10, assim como a diferença entre as médias.

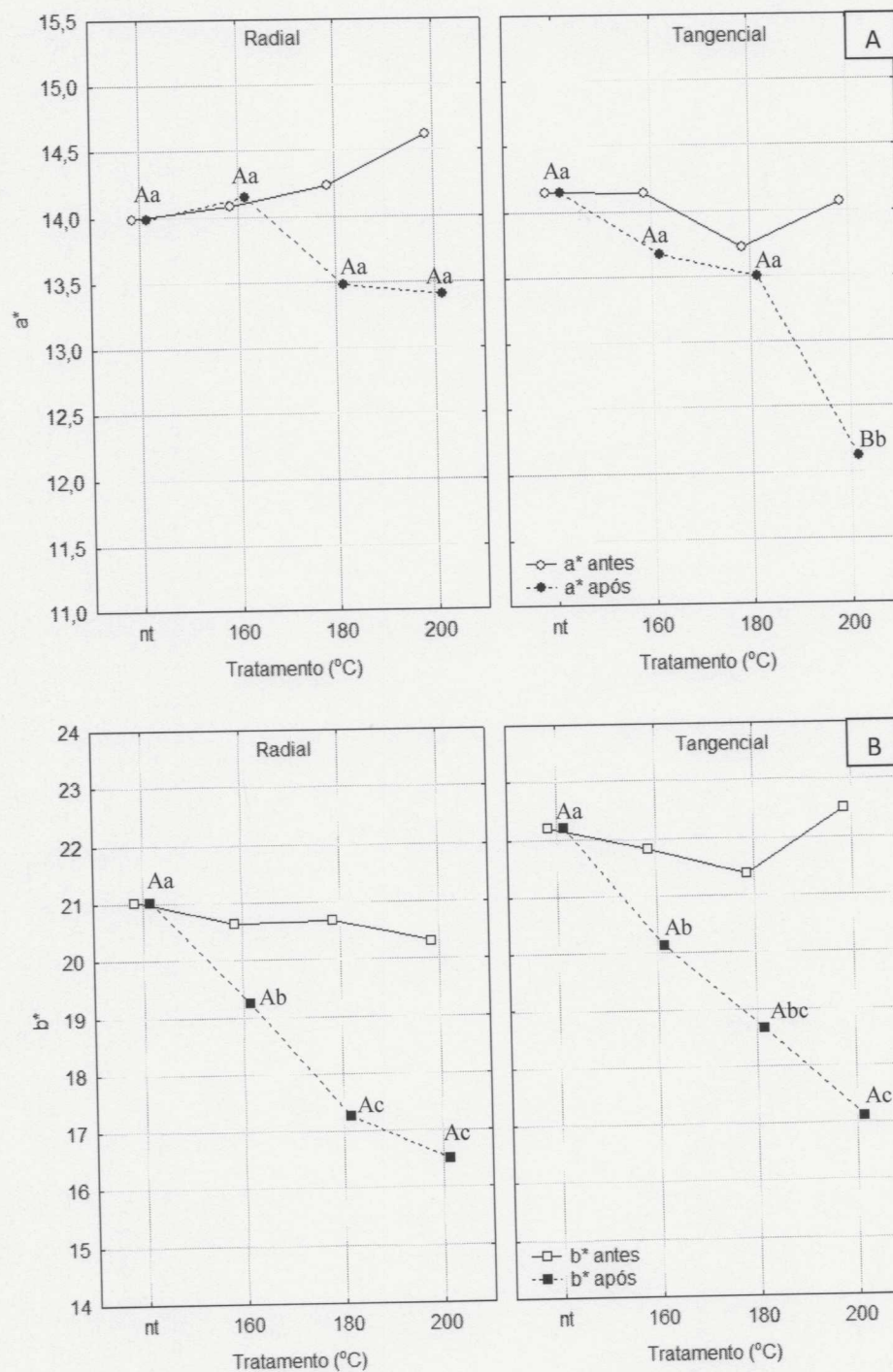


Figura 10. Efeito dos diferentes tratamentos e planos de corte nas variáveis  $a^*$  (A) e  $b^*$  (B) das amostras de *Khaya ivorensis*. As letras maiúsculas comparam as médias entre os planos de corte enquanto que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos térmicos e testemunha.

Os valores de  $a^*$  antes da termorretificação variam entre os lotes separados para os diferentes tratamentos, sendo que nos planos radiais estes aumentam progressivamente, enquanto que no tangencial, onde não há esta progressão, o valor do lote de 180°C se destaca



dos demais, observando-se uma queda perceptível em relação aos outros valores que se mantiveram quantitativamente próximos.

Após tratamento térmico, observa-se que os valores de  $a^*$  nos dois planos de corte sofreram decréscimos, sendo estes mais aparentes no plano de corte tangencial, principalmente no tratamento de 200°C, o qual variou aproximadamente de 14,00 para 12,00 enquanto que no plano radial esta diferença foi aproximadamente de 14,50 para 13,50. Em ambos os cortes, o decréscimo é observado quando comparadas as amostras tratadas com as não tratadas, assim como ele é progressivo, diminuindo conforme se aumenta a temperatura de tratamento, indicando uma coloração menos avermelhada. Interessante ressaltar que no tratamento de 160 °C no plano radial quase não houve variação com relação às amostras não tratadas.

Estatisticamente, a variável  $a^*$  foi significativa para tratamento, plano de corte e interação corte\*tratamento, com valores de  $p < 0,05$ , indicando que há diferença destes efeitos na variação de  $a^*$  após tratamento térmico. Antes do tratamento, estes efeitos se mostraram não significativos. Ver Tabela 5.

Tabela 5. Análise de variância da variável cromática  $a^*$ , após termorreificação, sob efeito do corte, tratamento e interação corte\*tratamento

Efeito	SQ	GL	QM	F	P
Corte	11,15	1	11,15	7,64	0,006103
Tratamento	73,73	3	24,58	16,82	0,000000
Corte*Tratamento	23,09	3	7,70	5,27	0,001505
Resíduo	409,07	280	1,46		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Através do teste de médias Tukey foi possível confirmar estatisticamente a diferença do tratamento de 200°C no plano de corte tangencial com relação aos outros tratamentos e plano de corte radial como indica a Tabela 6 descritiva da variável  $a^*$ .

Tabela 6. Valores médios da variável cromática  $a^*$  em função do tratamento térmico

Plano de Corte	Tratamento (°C)	Antes do Tratamento		Após o Tratamento	
		$a^*$ média	$a^*$ desvio	$a^*$ média	$a^*$ desvio
Radial	nt	13,99	1,32	13,99	1,32
	160	14,08	1,31	14,15	0,94
	180	14,23	1,62	13,48	1,13
	200	14,61	0,64	13,41	1,26
Tangencial	nt	14,15	1,19	14,15	1,19
	160	14,14	0,96	13,68	0,98
	180	13,73	1,55	13,50	1,07
	200	14,06	1,12	12,12	1,64

Onde: nt são as amostras não tratadas termicamente.



Antes da termorretificação, os valores de  $b^*$  apresentaram-se maiores no plano tangencial do que no radial, sendo que no lote de 180°C, assim como na variável  $a^*$ , o valor é menor do que os demais. Ver Figura 10.

Os valores de  $b^*$  resultaram em um decréscimo quase linear de aproximadamente 5 unidades após o tratamento térmico, também diminuindo conforme o aumento de temperatura, nos dois planos de corte e atingindo seus menores valores nos tratamentos de 200°C, indicando uma tonalidade menos amarelada, sendo que esta quanto mais próxima de -60, mais azulada será. Os resultados após o tratamento foram mais homogêneos entre os planos de corte radial e tangencial, diferentemente da variável  $a^*$  que não mostrou um padrão de decréscimo.

Tais valores se apresentaram significativos estatisticamente para os efeitos tratamento e corte após tratamento térmico, pois  $p < 0,05$  como indica a Tabela 7.

Tabela 7. Análise de variância da variável cromática  $b^*$ , após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e interação corte\*tratamento

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Corte	74,7	1	74,7	13,67	0,000262
Tratamento	954,9	3	318,3	58,29	0,000000
Corte*Tratamento	6,2	3	2,1	0,38	0,767075
Resíduo	1528,8	280	5,5		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Observa-se na Figura 11, que os valores naturais de luminosidade ( $L^*$ ) da madeira de mogno africano, ou seja, a luminosidade das amostras não tratadas, estão na faixa de 53-57 para o plano radial, e 58-60 para o plano tangencial, revelando uma maior luminosidade para este último plano. Por comparação de médias pelo teste Tukey, é possível observar que essa diferença se deu estatisticamente nos tratamentos de 180 e 200°C.

Tabela 8. Valores médios das variáveis luminosidade ( $L^*$ ) e saturação © antes de tratamento térmico da madeira de *Khaya ivorensis*

Plano de Corte	Tratamento (°C)	L		C	
		média	desvio	média	desvio
Radial	nt	56,56	8,27	25,33	1,23
	160	55,26	9,19	25,08	1,95
	180	53,38	6,33	25,16	1,53
	200	53,74	7,48	25,07	1,75
Tangencial	nt	59,67	4,52	26,38	2,34
	160	58,26	3,39	26,04	2,21
	180	58,81	4,43	25,45	1,59
	200	59,54	3,31	26,56	1,27
Média		56,90	5,86	25,63	1,74

Onde: nt são as amostras não tratadas termicamente. As letras maiúsculas comparam médias entre os planos de corte enquanto que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos e testemunha.



Os resultados de  $L^*$  após a termorretificação □statistic conforme o aumento da temperatura dos tratamentos, ou seja, houve um aumento do preto, o que já era esperado. Após a termorretificação há uma tendência de escurecimento da madeira como comprovado por Zanuncio et al. (2014) e como afirma Moura e Brito (2011), que após a termorretificação, há uma redução da claridade da madeira que pode ser associada à diminuição do teor de holocelulose. O escurecimento se deu nos dois planos, porém é possível observar que no plano tangencial, os valores de  $L^*$  são mais elevados (Tabela 8) indicando que este plano reflete naturalmente mais a luz incidida sobre as amostras, mesmo após a termorretificação.

A diferença entre os planos de corte antes e após a termorretificação se manteve somente na temperatura de 180°C. Já na temperatura de 200°C essa diferença deixou de existir, indicando que houve uma uniformização da luminosidade. Ver Figura 11.

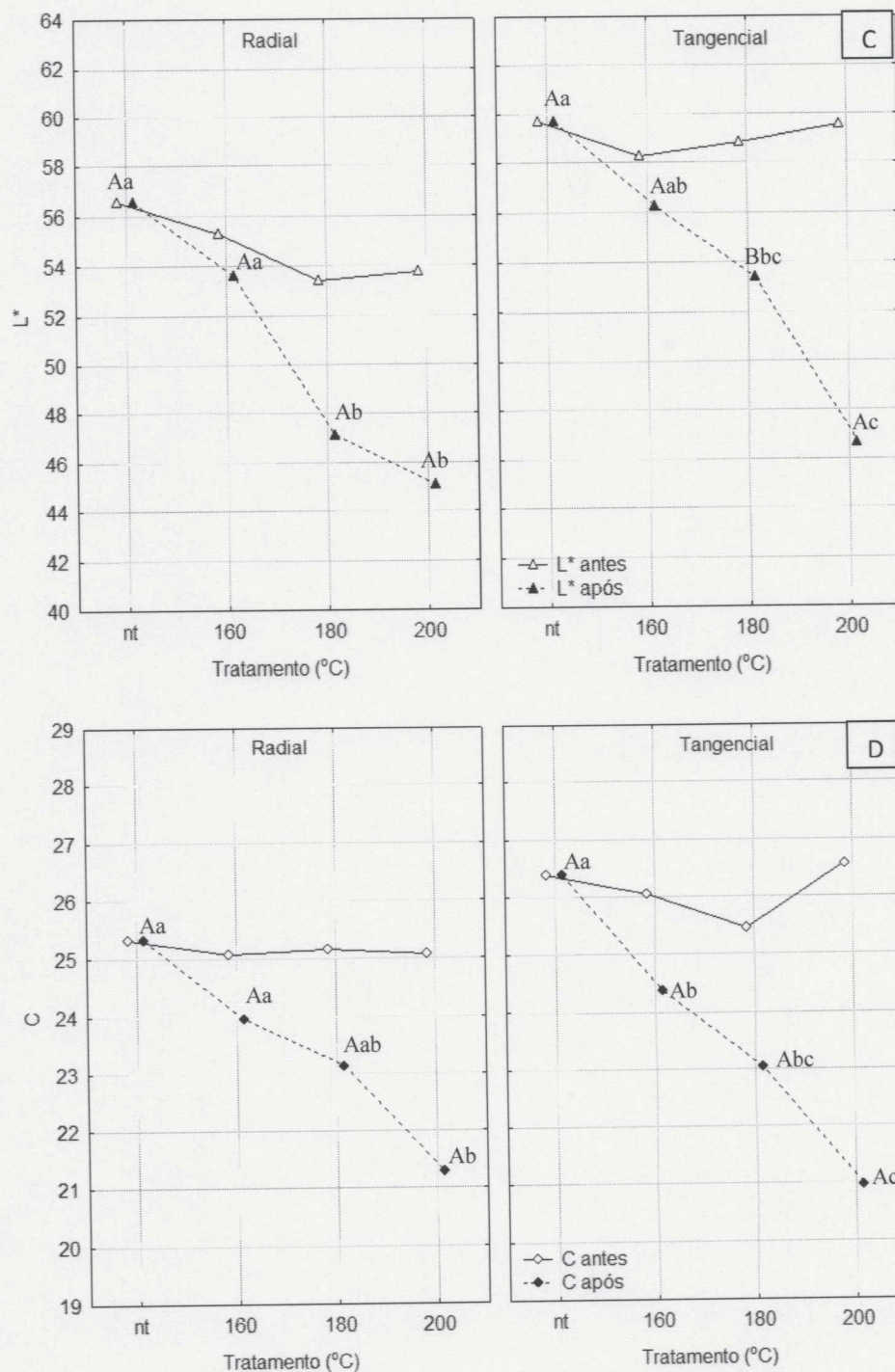


Figura 11. Efeito dos diferentes tratamentos e planos de corte nas variáveis luminosidade L\* e saturação C (D) das amostras de *Khaya ivorensis*. As letras maiúsculas comparam médias entre os planos de corte enquanto que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos e testemunha.

Foi provado através de análise de variância que há diferença significativa no efeito do plano de corte na luminosidade, enquanto que após a termorretificação a diferença é significativa não só no efeito corte, como também no tratamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.



Tabela 9. Análise de variância da variável cromática L\*, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e interação corte\*tratamento

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Corte	826,4	1	826,4	21,58	0,000005
Tratamento	6204,5	3	2068,2	54,00	0,000000
Corte*Tratamento	221,0	3	73,7	1,92	0,126021
Resíduo	10723,8	280	38,3		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

A saturação da cor C apresentou diferença estatística entre os planos de corte nas amostras separadas para o tratamento térmico de 200°C, antes da termorretificação. A partir da análise da representação gráfica na Figura 11, percebe-se que a cor da madeira é mais saturada nas amostras tangenciais.

Assim como as outras variáveis, a saturação também apresentou decréscimo conforme se aumentou a temperatura do tratamento.

Quando analisada estatisticamente, a variável C após termorretificação, apresentou significância estatística somente para o efeito tratamento, pois o valor de p foi menor do que 0,05 de probabilidade como indicado na Tabela 10.

Tabela 10. Análise de variância da saturação da cor C, após termorretificação, sob efeito do corte, tratamento e corte\*tratamento

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Corte	5,2	1	5,2	0,51	0,474145
Tratamento	845,5	3	281,8	27,84	0,000000
Corte*Tratamento	19,8	3	6,6	0,65	0,582086
Resíduo	2834,5	280	10,1		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

#### 4.1.5. Rugosidade

Os resultados da rugosidade antes da termorretificação em função do tipo de acabamento e plano de corte estão apresentados na Tabela 11.

Os valores de Ra, Rt e Rz na plaina foram maiores do que na lixa independente do plano de corte, o que sugere uma melhoria da qualidade da superfície após o lixamento, indicando uma superfície menos rugosa. Observa-se também que a superfície radial sempre apresentou valores numericamente inferiores à superfície tangencial, independentemente do tipo de acabamento, apesar da diferença não ser significativa.

Através de análise de variância foi possível verificar estatisticamente que os valores de Ra e Rz foram significativos para o tipo de acabamento, ou seja, o acabamento gera algum efeito nas variáveis mencionadas. Nenhuma das variáveis apresentou significância estatística para os diferentes planos de corte. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 12 e 13.



Tabela 11. Valores de Ra, Rt e Rz em  $\mu\text{m}$ , referentes ao acabamento e plano de corte da madeira de *Khaya ivorensis* antes do tratamento térmico

Acabamento	Plano de Corte	Ra		Rt		Rz	
		media	desvio	média	desvio	média	desvio
Lixa	Radial	4,95	1,68	49,56	17,49	31,92	10,57
	Tangencial	5,31	2,25	50,58	21,21	32,89	13,78
Plaina	Radial	5,93	2,17	51,88	19,17	35,08	11,66
	Tangencial	6,21	1,73	53,56	16,79	36,83	10,19

Tabela 12. Análise de variância de Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de corte e de acabamento de *Khaya ivorensis* antes de tratamento térmico

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Acabamento	59,411	1	59,411	15,474	0,000104
Corte	7,079	1	7,079	1,844	0,175523
Acabamento*Corte	0,106	1	0,106	0,028	0,867986
Resíduo	1151,824	300	3,839		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Tabela 13. Análise de variância de Rz ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de corte e de acabamento de *Khaya ivorensis* antes de tratamento térmico

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Acabamento	845,5	1	845,5	6,466	0,011498
Corte	124,2	1	124,2	0,949	0,330643
Acabamento*Corte	10,5	1	10,5	0,081	0,776616
Resíduo	39228,5	300	130,8		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Após o tratamento térmico, os valores das variáveis de rugosidade foram comparados somente com o acabamento na plaina. Os resultados deste processo podem ser vistos na Tabela 14.



Tabela 14. Valores médios das variáveis Ra, Rz e Rt antes e após tratamento térmico, em função dos tratamentos e planos de corte

Plano de corte	Tratamento (°C)	Ra		Rz		Rt	
		antes	pós	antes	pós	antes	pós
Radial	nt	5,70	5,70	31,89	31,89	47,54	47,54
	160	6,00	4,29	37,66	30,19	51,78	46,62
	180	5,82	4,58	36,71	28,15	55,35	40,09
	200	7,45	4,71	42,50	28,45	58,62	35,78
	<b>média</b>	<b>6,24</b>	<b>4,68</b>	<b>37,19</b>	<b>29,36</b>	<b>53,32</b>	<b>42,73</b>
Tangencial	nt	6,15	6,15	38,35	38,25	54,71	54,71
	160	4,79	3,72	30,85	25,62	46,13	39,46
	180	6,22	2,68	37,42	18,75	56,35	30,14
	200	4,93	3,85	28,30	23,34	43,05	43,73
	<b>média</b>	<b>5,52</b>	<b>3,46</b>	<b>33,73</b>	<b>22,96</b>	<b>50,06</b>	<b>38,99</b>

Os valores referentes à rugosidade se mostraram menores após a termorretificação em todas as variáveis apresentadas, independentemente da temperatura de tratamento, indicando uma melhoria da rugosidade da superfície após este procedimento. Com relação ao corte, o tangencial apresentou menor rugosidade quando comparado com o plano de corte radial.

Apesar de aparentemente os valores de Ra não variarem entre tratamentos, a análise estatística provou que o tratamento possui diferença significativa em Ra após a termorretificação como indica a Tabela 15.

Tabela 15. Análise de variância de Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de tratamento, corte e tratamento\*corte de *Khaya ivorensis* após tratamento térmico

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Tratamento	36,7007	3	12,2336	3,6488	0,020410
Corte	6,2244	1	6,2244	1,8565	0,180653
Tratamento*Corte	8,4289	3	2,8096	0,8380	0,481071
Resíduo	134,1111	40	3,3528		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

Os valores de Rz diminuíram no plano radial e tangencial após o tratamento térmico, porém no tangencial, os valores referentes ao tratamento de 180°C foram os que apresentaram a maior diferença numérica. Ver Figura 12.

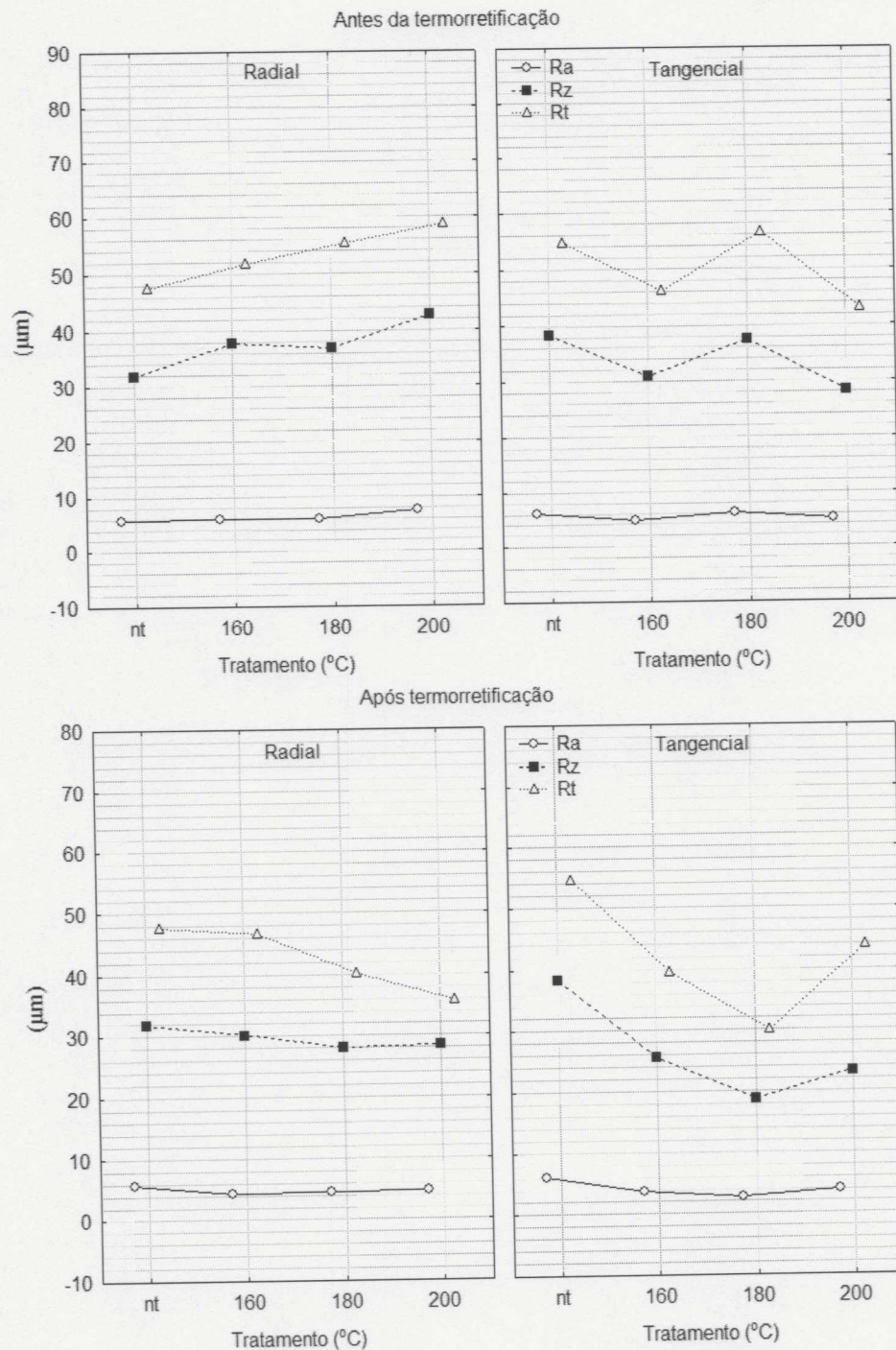


Figura 12. Efeito do tipo de tratamento e plano de corte nas variáveis Ra, Rt e Rz em  $\mu\text{m}$ , da madeira de *Khaya ivorensis*.

O Rt apresentou uma maior variabilidade no plano tangencial antes da termorreificação com relação ao radial. Já após a termorreificação, há uma diminuição em tais valores, esta a qual é mais notável no plano radial no tratamento de 180°C. Porém não há diferença estatística entre os tratamentos assim como entre os planos de corte como observado na Tabela 16.



Tabela 16. Análise de variância de Rt ( $\mu\text{m}$ ) em função do tipo de tratamento, corte e interação tratamento\*corte de *Khaya ivorensis* após tratamento térmico

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Tratamento	1638,03	3	546,01	1,5499	0,216566
Corte	2,95	1	2,95	0,0084	0,927544
Tratamento*Corte	791,09	3	263,70	0,7485	0,529658
Resíduo	14091,92	40	352,30		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e p é probabilidade de significância.

## 4.2. Propriedades Mecânicas

### 4.2.1. Módulo de Elasticidade (Eb) e Módulo de Elasticidade Relativo (Eb/ $\rho$ )

Os resultados do módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Resultados dos módulos de elasticidade (Eb e Eb/ $\rho$ ) em MPa, organizados em função do tipo de tratamento e corte de *Khaya ivorensis*

Plano de Corte	Tratamento ( $^{\circ}\text{C}$ )	Antes		Após	
		Eb	Eb/ $\delta$	Eb	Eb/ $\delta$
Radial	nt	9.126 <sup>(909)</sup>	14.517 <sup>(2.556)</sup>	9.126 <sup>(909)</sup>	14.517 <sup>(2.556)</sup>
	160	9.423 <sup>(1.245)</sup>	14.679 <sup>(2.565)</sup>	9.419 <sup>(1.132)</sup>	15.205 <sup>(2.586)</sup>
	180	9.421 <sup>(642)</sup>	14.553 <sup>(2.141)</sup>	9.355 <sup>(527)</sup>	14.898 <sup>(2.065)</sup>
	200	9.149 <sup>(1.251)</sup>	14.192 <sup>(3.637)</sup>	9.896 <sup>(638)</sup>	15.978 <sup>(2.855)</sup>
	<b>média</b>	<b>9.280</b>	<b>14.485</b>	<b>9.449</b>	<b>15.150</b>
Tangencial	nt	8.924 <sup>(1.288)</sup>	17.829 <sup>(2.497)</sup>	8.925 <sup>(1.288)</sup>	17.791 <sup>(2.536)</sup>
	160	9.195 <sup>(1.241)</sup>	16.789 <sup>(2.576)</sup>	9.304 <sup>(622)</sup>	17.057 <sup>(1.265)</sup>
	180	9.745 <sup>(1.136)</sup>	17.751 <sup>(2.438)</sup>	9.684 <sup>(814)</sup>	17.684 <sup>(857)</sup>
	200	8.767 <sup>(1.090)</sup>	15.787 <sup>(2.483)</sup>	9.596 <sup>(1.149)</sup>	17.614 <sup>(1.563)</sup>
	<b>média</b>	<b>9.158</b>	<b>17.039</b>	<b>9.377</b>	<b>17.537</b>

Onde: nt são as amostras não tratadas termicamente. Os valores entre parênteses representam os desvios padrão das médias de cada tratamento.

O módulo de elasticidade foi calculado pelo software Pavitest Madeira a partir da carga máxima aplicada até o deslocamento máximo do *encoder* estabelecido para o ensaio de flexão estática. A média do módulo de elasticidade para a madeira de *Khaya ivorensis* não tratada foi de 9.219 MPa, valores parecidos foram encontrados por França et al. (2015), sendo classificado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, como módulo de elasticidade médio, como afirma França et al. (2015).

Nota-se que tanto entre os planos radiais e tangenciais quanto entre os tratamentos, não houve muita diferença no módulo de elasticidade. Já quando se compara entre os módulos antes e após a termorretificação, é necessário ressaltar o aumento do módulo de elasticidade antes e após o tratamento térmico de 200 $^{\circ}\text{C}$ , o qual obteve a maior variação.

Foi utilizado a ANOVA para analisar estatisticamente os módulos antes e após a termorretificação em função dos planos de corte, tratamentos e a interação corte\*tratamento. Sendo assim, é possível afirmar que em nenhum dos casos houve diferença significativa do módulo de elasticidade nos efeitos tratamento, planos de corte e a interação entre os dois,



como demonstra a Tabela 18, pois em nenhum dos efeitos o valor p foi menor do que 0,05 de probabilidade.

Tabela 18. Análise estatística de significância do efeito do corte, tratamento e corte\*tratamento do módulo de elasticidade relativo ( $E_b/\rho$ ) antes e após a termorretificação

	<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Antes	Corte	6,957443E+09	1	6,957443E+09	10,733	0,002291
	Tratamento	8,415513E+08	3	2,805171E+08	0,433	0,730803
	Corte*Tratamento	5,318332E+08	3	1,772777E+08	0,273	0,844127
	Resíduo	2,398460E+10	37	6,482325E+08		
Após	Corte	6,078766E+09	1	6,078766E+09	14,079	0,000600
	Tratamento	2,569145E+08	3	8,563818E+07	0,198	0,896853
	Corte*Tratamento	4,776156E+08	3	1,592052E+08	0,369	0,775992
	Resíduo	1,597567E+10	37	4,317749E+08		

Onde: SQ é soma de quadrado, GL é grau de liberdade, QM é quadrado médio, F é o valor estatístico e P é probabilidade de significância.

Através da análise gráfica da Figura 13, observa-se principalmente o aumento do módulo de elasticidade após o tratamento de 200°C tanto no corte radial, quanto tangencial, enquanto que para os outros tratamentos o módulo se mantém basicamente o mesmo das amostras não tratadas.

De acordo com Lopes (2012), uma causa para o aumento da rigidez da madeira termorretificada seria que devido à altas temperaturas, há um aumento na espessura da região cristalina da celulose o que confere uma maior rigidez às forças de flexão. Porém, ainda há algumas contradições na literatura.

Importante ressaltar que os valores de MOE resultantes são inferiores aos valores reais normalmente encontrados para essa espécie, pois a relação entre vão e espessura foi de 12,6 vezes, valor inferior ao estabelecido na NBR 7190:1997, que é de 21 vezes.



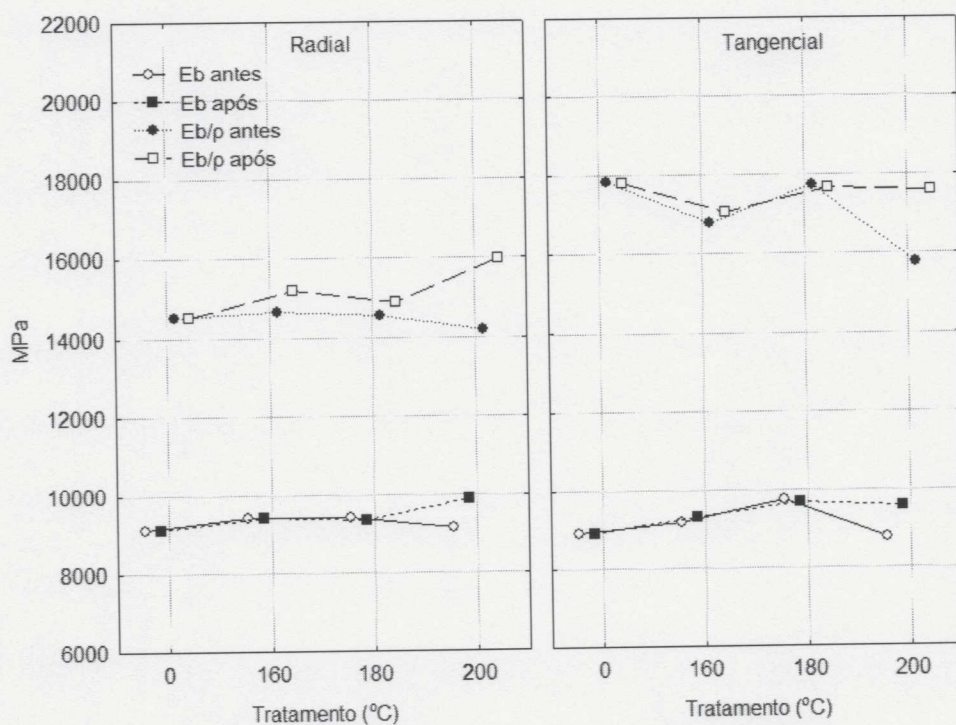


Figura 13. Módulo de elasticidade,  $E_b$  e  $E_b/\rho$ , em MPa, em função dos tratamentos e planos de corte.

O MOE relativo à densidade aparente da madeira, representado por  $E_b/\rho$  ( $E_b$  em MPa e  $\rho$  em  $\text{g/cm}^3$ ), apresentou valores maiores no plano de corte tangencial do que no radial como mostra o gráfico da Figura 13. Este resultado já era esperado pois os valores de densidade aparente no plano radial eram maiores, diminuindo assim o módulo de elasticidade pois a relação entre estas duas variáveis é inversamente proporcional. Através de análise de variância foi possível confirmar esta diferença estatística que a orientação das amostras gera na relação  $E_b/\rho$  como observado na Tabela 18.

Resultados como estes indicam como a densidade influencia no módulo de elasticidade como afirma Dias; Lahr (2004), conferindo maior ou menor resistência à flexão estática dependendo da orientação da peça de madeira. Segundo o mesmo autor em seu estudo, o coeficiente de determinação resultante da relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na flexão estática, é  $r^2=0,79$  e baixo erro padrão, indicando uma boa correlação linear entre estes fatores.

Cabe ressaltar que outras variáveis como espécie, teor de umidade, diferença de lenho e idade da árvore conseqüentemente geram alguma influência sobre o MOE, já que influenciam também na densidade da madeira.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados pode-se concluir que:

- O teor de umidade diminui consideravelmente após a termorretrificação, de forma que quanto maior for a temperatura de tratamento, menor será o teor de umidade de equilíbrio.
- A densidade aparente da madeira de mogno africano diminui após a termorretrificação tanto para amostras cortadas no plano radial quanto no tangencial.
- Após termorretrificação houve redução volumétrica da madeira mas este não foi significativo para os diferentes tratamentos e planos de corte.
- As amostras tratadas termicamente e cortadas no plano tangencial apresentaram maior valor numérico de alteração volumétrica.
- Os valores das variáveis de cor  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  e  $C$  diminuíram após a termorretrificação.
- A madeira natural, cortada no plano tangencial, reflete mais a claridade do que no plano radial.
- Há aumento numérico do módulo de elasticidade relativo após o tratamento de  $200^{\circ}\text{C}$  nos dois planos de corte.
- A rugosidade da superfície da madeira de mogno africano é menor após o lixamento quando comparada com o aplainamento.
- A termorretrificação apresentou diferença significativa somente para a variável  $R_a$ .
- Após a termorretrificação há uma redução da rugosidade na madeira independentemente do plano de corte.
- A madeira no plano tangencial apresentou menor rugosidade do que no plano radial independentemente do tratamento térmico.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANJOS, F. P. DOS. Efeitos da termorretificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia. , p. 1–66, 2014.
- CARVALHO, A. M. DE; SILVA, B. T. B. DA; LATORRACA, J. V. DE F. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano. **Cerne**, v. 16, n. suplemento, p. 106–114, 2010.
- COELHO, C.; CARVALHO, L.; MARTINS, J.; COSTA, C.; MASSON, D. Estudo dos efeitos dos parâmetros de maquinação nas características objectivas e percepção subjectiva de um acabamento. **5º Congresso Florestal Nacional “a Floresta e as Gentes**, p. 16–19, 2005.
- DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, , n. 65, p. 102–113, 2004.
- FILHO, A. P. Rugosidade Superficial. **3º Seminário de Metrologia**, p. 1 – 41, 2011.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Ipef**, v. 2/3, p. 65–74, 1971.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY - USDA. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. 2010.
- FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; et al. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 633–640, 2015.
- GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**, 2008. Universidade de Brasília.
- LEÃO, T. C. C.; ALMEIDA, W. R.; DECHOUM, M. .; ZILLER, S. . **Espécies exóticas invasoras no Nordeste do Brasil: contextualização, manejo e políticas públicas**. 2011.
- LOPES, J. DE O. **Uniformidade e Estabilidade da Cor da Madeira Termorretificada de *Tectona grandis* L. f.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- LOPES, J. DE O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M. DO; LATORRACA, J. V. DE F. Propriedades físicas da madeira de Teca termorretificada. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 569–577, 2014.
- LUNZ, A. M.; THOMAZINI, M. J.; MORAES, M. C. B.; et al. *Hypsipyla grandella* em Mogno (*Swietenia macrophylla*): Situação Atual e Perspectivas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, , n. 59, p. 45–55, 2009.
- MARTINS, V. A. **Secagem de Madeira Serrada**. 1988.



MOURA, L. F. DE; BRITO, J. O. Efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 89, p. 69–76, 2011.

OPUNI-FRIMPONG, E.; KARNOSKY, D. F.; STORER, A. J.; COBBINAH, J. R. Key roles of leaves, stockplant age, and auxin concentration in vegetative propagation of two African mahoganies: *Khaya anthotheca* Welw. and *Khaya ivorensis* A. Chev. **New Forests**, v. 36, n. 2, p. 115–123, 2008.

POUBEL, D. DA S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A. DOS; OLIVEIRA, G. DE L.; ABREU, H. DOS S. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 391–398, 2013.

REZENDE, M. A. DE; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **Ipef**, v. 39, n. 1976, p. 33–40, 1988.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Sistema Nacional de Informações Florestais. Produção Florestal. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>> Acesso em 15 de junho de 2016.

SILVA, E. S.; STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L.; PARIZ, E. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, n. 1, p. 31–37, 2015.

SILVA, J. G. M. DA; VIDAURRE, G. B.; ARANTES, M. D. C.; et al. Qualidade da madeira de mogno africano para a produção de serrados. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 44, n. 109, p. 1–10, 2016.

SILVA, L. V. M. S. DA; NASCIMENTO, A. M. DO; GARCIA, R. A. Variação radial da densidade, umidade e coloração da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.). , 2014.

SOUZA, C. DE O. **Resíduos de mogno africano e eucalipto para briquetagem**, 2015. Universidade Federal do Espírito Santo.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; et al. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não- destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 2, p. 145–150, 2008.

TEIXEIRA, B. M. DOS R. **Variabilidade radial e longitudinal de propriedades da madeira de angico-vermelho ( *Anadenanthera peregrina* ( L .) Speg .)**, 2008. Universidade Federal de Viçosa.

THERMOWOOD. **ThermoWood Handbook**. 2003.

UNSAI, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum ( *Eucalyptus camaldulensis* ) wood. **Journal of Wood**



**Science**, v. 51, n. 4, p. 405–409, 2005.

VARGAS, K. DA C.; GOUVÊA, A. DE F. G.; COUTO, A. M. Rendimento da madeira termorretificada de diferentes espécies madeireiras. . p.1, 2015. Mato Grosso do Sul: III SIMPÓSIO BRASILEIRO FLORESTAL.

WEILAND, J.-J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 61, p. 216–220, 2003.

ZANUNCIO, A. J. V.; FARIAS, E. D. S.; SILVEIRA, T. A. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 85–90, 2014.

ZENID, G. J. **Espécies nativas com potencial madeireiro e moveleiro**. São Paulo, 1997.