



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

**FABRIZIA DIAS GUEDES MOURA**

**COLORIMETRIA, MOLHABILIDADE, RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE  
*Khaya ivorensis* A. Chev. TRATADA TERMICAMENTE**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
Novembro – 2014



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

**FABRIZIA DIAS GUEDES MOURA**

**COLORIMETRIA, MOLHABILIDADE, RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE  
*Khaya ivorensis* A. Chev. TRATADA TERMICAMENTE**

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

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
Novembro – 2014

**COLORIMETRIA, MOLHABILIDADE, RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE  
*Khaya ivorensis* A. Chev. TRATADA TERMICAMENTE**

**FABRIZIA DIAS GUEDES MOURA**

Monografia aprovada em 14 de Novembro de 2014.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento  
UFRRJ / IF / DPF  
Orientador

Prof. Dra. Rosilei Garcia Aparecida  
UFRRJ / IF / DPF  
Membro

Prof. Dr. Roberto Carlos Costa Lelis  
UFRRJ / IF / DPF  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus pela benção da vida e por estar sempre guiando meus caminhos.

Aos meus pais que sempre se dedicaram a mim e me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

À minha família que sempre me ajudou nos momentos que eu mais precisei.

Aos meus amigos, pelo carinho e apoio durante momentos felizes e tristes.

Ao meu orientador Alexandre Miguel, pelo tempo dedicado para que este trabalho fosse concluído e pela ajuda, paciência, dedicação de trabalhar comigo durante grande parte da graduação.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pelos grandes momentos proporcionados durante 5 anos e me ajudado a me a crescer como pessoa e profissional.

Aos professores Roberto Carlos Costa Lelis e Rosilei Aparecida Garcia por participarem da minha banca.

## RESUMO

O tratamento térmico tem sido usado como forma de alterar química e física e mecanicamente a madeira e seus derivados, resultando, muitas vezes, em propriedades mais adequadas para determinados fins. O objetivo deste estudo visa avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira sólida tratada e não tratada termicamente de *Khaya ivorensis* (mogno africano). De árvores com aproximadamente 30 anos de idade, foram retirados 144 amostras com orientação radial, com dimensões de 5 mm x 25mm x 180 mm em espessura, largura e comprimento, respectivamente, que foram climatizados em ambiente com temperatura controlada de 20°C e umidade relativa do ar com 65%. Foram realizados dois métodos de tratamento térmico. O primeiro em ambiente úmido, onde amostras foram submetidas a banho de vapor sendo um grupo em autoclave a 120° C numa pressão de 1,5 kgf.cm<sup>-2</sup> e outro a 160°C numa pressão de 6 kgf.cm<sup>-2</sup>. O segundo foi em ambiente seco de mufla nas temperaturas de 130°C, 160°C e 190 °C. A cor da madeira foi avaliada com auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d da Konica Minolta. O ensaio de molhabilidade foi feito pelo método de gota séssil e também foram feitos ensaios mecânico de resistência à flexão de algumas amostras. Os pigmentos cromáticos a\* e b\* estão relacionados diretamente com as propriedades mecânicas da madeira de resistência à flexão e rigidez e a molhabilidade da madeira. O tratamento térmico provocou mudanças significativas sendo a principal delas no ângulo de contato. Nas avaliações observou-se que o tratamento térmico a vapor pouco influenciou as propriedades da madeira, ao contrário do tratamento a seco.

**Palavras chave:** mogno africano, tratamento térmico, propriedades mecânicas, cor da madeira, ângulo de contato.

## ABSTRACT

The heat treatment has been used as a way to alter the chemical, physical and mechanical wood and its derivatives, resulting often more suitable properties for certain purposes. The objective of this study was to evaluate the physical and mechanical properties of the treated solid wood and not thermally treated *ivorensis* Khaya (African mahogany). Trees of approximately 30 years of age, 144 samples were taken in the radial direction, with dimensions of 5 mm x 25 mm x 180 mm in thickness, width and length, respectively, which were conditioned in an environment with controlled temperature and humidity 20 ° C of the air 65%. Two methods of heat treatment were performed. The first in a humid environment where samples were subjected to a steam bath is a group by autoclaving at 120 ° C in 1.5 kgf.cm<sup>-2</sup> and another pressure at 160 ° C at a pressure of 6 kgf.cm<sup>-2</sup>. The second was in a dry oven at temperatures of 130 ° C, 160 ° C and 190 ° C. The color of the wood was evaluated with the aid of portable spectrophotometer CM 2600d of Konica Minolta. The wettability test was made by the sessile drop method and mechanical tests were also made flexural strength of some samples. Chromatic pigments \* and b \* are directly related to the mechanical properties of wood and flexural rigidity and the wettability of the wood. The heat treatment caused significant changes being the main one on the contact angle. In the evaluations it was observed that the thermal steam treatment little influence on properties of wood, in contrast to the dry treatment.

**Keywords:** African mahogany, heat treatment, mechanical properties, color of wood, angle of contact.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	viii
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	x
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	1
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	1
2.1. Objetivo geral.....	1
2.2. Objetivos específicos.....	2
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	2
3.1. Descrição da espécie estudada.....	2
3.2. Termorretificação.....	3
3.3. Medição de cor.....	3
3.4. Ângulo de contato.....	4
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	6
4.1. Caracterização do material.....	6
4.2. Tratamento térmico.....	7
4.3. Análise colorimétrica.....	8
4.4. Ensaio de molhabilidade.....	9
4.5. Determinação da resistência à flexão, da resistência no limite proporcionalidade e módulo de elasticidade.....	9
4.6. Ângulo de inclinação das fibras.....	10
4.7. Análises estatísticas.....	10
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	10
5.1. Propriedades da gota em função dos tratamentos térmicos.....	10
5.2. Propriedades da gota em função do tempo de medição.....	12
5.3. Propriedades da gota relacionadas com propriedades de cor e propriedades mecânicas.....	14
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	22
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	23

## LISTA DE TABELAS

		<b>Páginas</b>
<b>Tabela 1.</b>	Desenho experimental e o número de tratamentos resultantes.....	8
<b>Tabela 2.</b>	Correlação entre os valores médios das propriedades da gota em contato com a superfície da madeira.....	11
<b>Tabela 3.</b>	Análise de Kruskall-Wallis para o efeito da temperatura em ambiente seco para as variáveis de volume, ângulo de contato, área de contato e BD com a superfície da madeira.....	11
<b>Tabela 4.</b>	Correlação entre as propriedades da gota na primeira e ultima mediações (tempo zero e 120 segundos).....	13
<b>Tabela 5.</b>	Correlação entre as propriedades da gota na primeira medição (tempo de 0 segundo) e na última medição (tempo de 120 segundos) e as propriedades de cor L* (luminosidade), a* (pigmento cromático vermelho), b* (pigmento cromático amarelo).....	15
<b>Tabela 6.</b>	Correlação entre as propriedades de cor L* (luminosidade), a* (pigmento cromático vermelho), b* (pigmento cromático amarelo) com propriedades mecânicas e ângulo de inclinação de grã.....	16
<b>Tabela 7.</b>	Valores médios das propriedades mecânicas resistência na flexão, limite de proporcionalidade e modulo de elasticidade e ângulo das fibras na largura das amostras em todos os tratamentos.....	17
<b>Tabela 8.</b>	Teste de Tukey para o efeito do tratamento a seco na relação entre resistência à flexão e limite de proporcionalidade (fb/lp).....	18
<b>Tabela 9.</b>	Teste de Tukey para o efeito do tratamento a seco e a vapor no pigmento cromático b* (amarelo).....	18
<b>Tabela 10.</b>	Teste de Kruskall-Wallis para o efeito da temperatura em ambiente seco para as variáveis de ângulo de contato inicial, área de contato inicial e volume inicial com a superfície da madeira.....	19
<b>Tabela 11.</b>	Teste de Tukey para o efeito do tratamento térmico a seco para as variáveis, ângulo final, BD final e Delta BD.....	20
<b>Tabela 12.</b>	Análise de variância a 5% de significância para o pigmento cromático amarelo b*.....	Anexo
<b>Tabela 13.</b>	Análise de variância a 5% de significância para o ângulo final (tempo de zero segundo).....	Anexo
<b>Tabela 14.</b>	Análise de variância a 5% de significância para BD final (tempo de 120 segundos).....	Anexo



## LISTA DE FIGURAS

		Páginas
<b>Figura 1.</b>	Árvore de Mogno Africano ( <i>Khaya ivorensis</i> ).....	2
<b>Figura 2.</b>	Definição do ângulo de contato $\theta$ entre uma gota líquida e uma superfície plana e horizontal.....	5
<b>Figura 3.</b>	Diferentes ângulos de contato de uma gota com a superfície.....	6
<b>Figura 4.</b>	Esquema de desdobro e retirada do material para os testes físicos das toras de <i>Khaya ivorensis</i> (A) Desdobro tangencial em serra-fita; (B) Desdobro em serra circular e (C) Peças destinadas à confecção de corpos-de-prova.....	6
<b>Figura 5.</b>	Desenho esquemático que mostra a retirada e placas radiais dos pranchões.....	7
<b>Figura 6.</b>	Sistema de contenção e climatização das amostras radiais para evitar possíveis empenamentos.....	7
<b>Figura 7.</b>	Desenho esquemático da medição da cor em cinco diferentes pontos equidistantes da amostra.....	9
<b>Figura 8.</b>	Efeito dos tratamentos térmicos a seco e a vapor nas propriedades da gota da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> . (A) ângulo de contato entre a gota e superfície da madeira. (B) volume da gota. (C) área da gota. (D) diâmetro da base da gota.....	12
<b>Figura 9.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco em diferentes temperaturas no ângulo de contato da gota ao longo do tempo de medição da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	13
<b>Figura 10.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco em diferentes temperaturas no diâmetro da base da gota ao longo do tempo de medição da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	14
<b>Figura 11.</b>	Visão dos vasos em corte longitudinal (A) e diagonal (B) de uma amostra de madeira de <i>Khaya ivorensis</i> revelando a grã reversa.....	15
<b>Figura 12.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco na relação entre a resistência a flexão e o limite de proporcionalidade na flexão da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	17
<b>Figura 13.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco e a vapor no pigmento cromático $b^*$ da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	19
<b>Figura 14.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco na área inicial da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	20
<b>Figura 15.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco no ângulo final da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	21
<b>Figura 16.</b>	Efeito do tratamento térmico a seco no BD final da madeira de <i>Khaya ivorensis</i> .....	21

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de produtos florestais, atualmente depara-se com a problemática do decréscimo de fornecimento de matéria prima para o setor, tanto pelas pressões ecológicas, visando diminuir a exploração das matas nativas, quanto pela escassez dos produtos florestais, cada vez mais distantes das zonas de consumo. Por isso, espécies exóticas têm sido introduzidas no país, para ser alternativas à exploração. O mogno africano poderá ser um ótimo investimento para o futuro, tanto para produtores rurais, como investidores de outras áreas.

Importante pelo seu valor econômico, cada hectare planta de mogno africano pode obter 160 m<sup>3</sup> de madeira serrada, a um valor de mercado de aproximadamente R\$ 2.300,00/m<sup>3</sup>. Para fins comerciais, o cultivo é demorado, pois o período de corte gira em torno de 18 anos, porém, quando se compara com outras espécies o seu retorno financeiro é rápido e elevado (PINHEIRO et al., 2011).

De acordo com Albuquerque (2001), o mogno africano foi introduzido no Brasil visando substituir o mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*) devido a sua alta resistência ao lepidóptero *Hypsiphyla grandella*, a principal praga do mogno brasileiro, conhecida como a “broca das meliáceas”.

Outras características que fazem do mogno africano uma espécie atrativa são suas propriedades tecnológicas e a beleza da sua madeira. A madeira de elevada durabilidade, fácil manuseio e secagem, boa estabilidade dimensional, e de castanho-avermelhado brilhante, depois de polida; é usada para produção de móveis de luxo, construção civil, instrumentos científicos de alta precisão, instrumentos musicais, esculturas e decorações interiores de navios e embarcações, dentre outros usos.

Na produção de instrumentos musicais o mogno é apreciado e muito valorizado pelo seu timbre característico e ressonância sonora, que tendem ao médio-grave, notadas em guitarras e violões e em alguns tambores percussivos. O aproveitamento da árvore é quase total, pois a madeira utilizada na fabricação de móveis com acabamento de qualidade na usinagem, na confecção de instrumentos musicais; sua casca e as folhas têm fins medicinais; os frutos para produção de sementes, as cinzas para conservação de grãos armazenados (PINHEIRO et al., 2011; FALESÍ & BAENA, 1999).

O grande desafio do setor madeireiro é equilibrar o apelo da madeira sustentável e a demanda por madeiras nobres. Há necessidade de investimento na exploração de madeira de reflorestamento de espécies nobres como o mogno africano. A madeira do mogno se tornou artigo de luxo, lembrando-se da própria escassez de árvores nativas bem como das fortes restrições legais ao seu corte na sua condição natural em áreas remanescentes, tanto no Brasil quanto em outros países da Ásia e África, fazendo necessário o seu plantio em escala comercial para atender a demanda por madeira.

Vários estudos tem mostrado que o tratamento térmico apresenta algumas vantagens, como: a menor higroscopicidade, menor teor de umidade de equilíbrio, maior estabilidade dimensional, maior durabilidade natural, alteração da cor original e também altera a molhabilidade da superfície da madeira, que é fundamental para a adesão e aplicação de revestimentos. Entretanto é importante notar que quando utilizamos o tratamento térmico para alcançar algumas dessas características como valorizar a estética da madeira e fazê-la competitiva no mercado, o tratamento também modificará outras características da madeira, entre elas as propriedades físicas e mecânicas que são importantes para a fabricação de móveis e a qualidade da superfície para a adesão e aplicação de revestimento (MILITZ, 2002; SHELDON & GARDNER, 2001).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar as características de cor e molhabilidade assim como as propriedades da madeira de mogno africano tratada e não tratada termicamente.

### 2.2 Objetivos específicos

- Determinar a molhabilidade das superfícies da madeira tratadas e não tratadas termicamente.
- Avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos na resistência e rigidez da madeira através de ensaios de flexão.
- Avaliar o efeito dos tratamentos térmicos executados em ambiente seco e úmido sobre a coloração da madeira e compará-los com a cor natural não tratada.

## 3. REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 Descrições da espécie estudada

A espécie *Khaya ivorensis* A. Chev., conhecida vulgarmente como mogno-africano, bisselon, mogno-seco-da-zona e mogno-de-Gambian, é uma espécie florestal exótica no Brasil que pertence a Família Meliaceae (GUIMARÃES *et al.*, 2004). É uma árvore robusta que domina o dossel da floresta. Seu tronco pode atingir 3,5 metros de diâmetro e uma altura total de 70 metros (média de 30 – 40 m), e a copa chega a 40 – 50m de largura (WILLIAMS 1932, LAMB 1966, PENNINGTON & SARUKHÁN 1968 citados por GROGAN *et al.*, 2002).



**Figura 1.** Árvore de Mogno Africano (*Khaya ivorensis*).

(Fonte:<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI152905-18293,00-MOGNO+AFRICANO.html>)

Segundo Lamprecht (1990) e Lemmens (2008), o mogno africano (*Khaya ivorensis*) é originário da África Ocidental, abrangendo os países como Costa do Marfim, Gana, Togo, Benin, Nigéria, o sul de Camarões e a província de Cabinda (Angola). Possivelmente, esta espécie também ocorra na Guiné, Libéria, na República Central da África e no Congo. A *Khaya ivorensis* é bastante plantada dentro de sua área natural de distribuição, mas também na Ásia tropical e América tropical. (PINHEIRO et al., 2011).

As espécies *Khaya ivorensis*, *K. anthotheca*, *K. grandifolia* e *K. senegalensis* são todas conhecidas pela denominação de mogno-africano. A *Khaya ivorensis* tem sido uma das espécies preferidas dos reflorestadores no Estado do Pará, não só pela facilidade de produzir as mudas, mas pelo seu elevado valor econômico no mercado internacional. O mogno-africano tem uso comercial extraordinário, devido às características tecnológicas e à beleza da madeira. É usada em movelaria, faqueado, construção naval e em sofisticadas construção de interiores. O mercado europeu consome principalmente a madeira de *Khaya ivorensis* (AUBREVILLE, 1959; LAMPRECHT, 1990 apud FALESI & BAENA, 1999).

A exploração nos últimos 70 anos fez com que a distribuição natural da espécie reduzisse drasticamente, isso vem aumentando o interesse e motivação para o cultivo comercial do mogno africano. A exigência do mercado por madeira de qualidade tem feito com que indústrias se interessem na oferta desta madeira (FALESI & BAENA, 1999). Em boas condições de solo, clima e manejo, segundo a EMBRAPA, estima-se produtividade em torno de 14 a 25 m<sup>3</sup>/ha/ano. Em áreas irrigadas a produtividade tem se mostrado superior (ALBUQUERQUE, 2011).

### 3.2 Tratamento térmico

Nas ultimas décadas, os cientistas estão pesquisando novas técnicas para melhorar as propriedades da madeira, de forma a ampliar sua utilização.

O tratamento térmico ou termorretificação é um processo em que o calor é aplicado à madeira visando à obtenção de um produto sólido, com características diferenciadas, quando comparado à madeira em condições normais, algumas delas podendo tornar-se interessantes para aplicações diferenciadas da madeira (BRITO et al., 2006). Segundo Modes (2010) a madeira tratada termicamente causa alterações químicas nos polímeros de celulose, hemicelulose e lignina e assim obtendo um material com características bem diferenciadas. As principais características da madeira tratada termicamente são: o menor teor de umidade de equilíbrio, a maior estabilidade dimensional, a maior durabilidade à podridão e a alteração da cor original da madeira (MILITZ, 2002). A principal desvantagem da madeira tratada termicamente é a redução de suas propriedades mecânicas (GARCIA et al., 2011).

Outra característica que faz com que o tratamento térmico seja atrativo é que ele não emprega produtos químicos, isso se torna um fator muito importante no aspecto ambiental. O tratamento pode ainda aumentar a resistência ao apodrecimento, sendo que o processo pode se transformar numa opção para substituição de madeiras tradicionais, principalmente para aquelas que apresentam elevado custo de obtenção, bem como para espécies em extinção (PINCELLI, 1999). Pode ainda substituir o tratamento de espécies, cuja impregnação com compostos químicos é proibida de acordo com a natureza do uso final da madeira (PESSOA, 2006).

Atualmente existem diversos tipos de tratamentos térmicos tendo com objetivo melhorar algumas das propriedades físicas. Os processos mais utilizados na Europa são: “ThermoWood®”, “Retification®”, “Le Bois Perdure®”, “Plato ®” e “Oil Heat Treatment®”.

As principais diferenças entre os tratamentos estão no uso de oxigênio ou nitrogênio, presença ou ausência de vapor, processo seco ou úmido e uso de óleos (MILITZ, 2001).

### 3.3 Medições de cor

A cor da madeira é de grande importância no ponto de vista prático, pela influência que exerce sobre seu valor decorativo. A variação da cor natural da madeira é facilmente perceptível aos olhos humanos. Essa variação é devido à impregnação de diversas substâncias orgânicas nas paredes celulares, sendo depositadas de forma mais acentuada no cerne (TSOUMIS, 1968).

Características como a densidade, textura, grã e dureza são bastante utilizadas na classificação e na avaliação da qualidade da madeira. Recentemente, a cor também vem sendo considerada como um importante índice de classificação e qualidade da madeira (MORI et al., 2004).

Segundo Nishino et al. (2000), a cor é uma das mais importantes características da madeira, assim como suas propriedades mecânicas, quando usada nas mais variadas formas. A cor da madeira dificilmente é associada a outras características físicas da madeira, entretanto, conhecendo-se melhor esta relação, pode-se entender o comportamento da coloração da madeira. Essa relação pode ser aplicada para determinar o uso apropriado das mais diferentes espécies e as condições mais adequadas de cultivo para a obtenção de produtos de qualidade.

Möttönen et al. (2002) observaram que as características e a uniformidade da coloração da madeira representam um papel direto no estabelecimento do preço e no valor final do produto. A cor é, portanto, um fator crucial na aparência da madeira.

Sendo assim, torna-se claro a importância da cor, uma vez que ela é um dos primeiros contatos visuais, podendo indicar de forma imediata a finalidade de um determinado produto. Além disso, no caso da madeira, a cor tem essa importância, por ser uma das características que a classifica esteticamente como aceitável ou não (MORI et al., 2005).

Para a determinação precisa da cor utiliza-se a colorimetria, ciência que, por meio de aparelhos específicos, conhecidos como espectrofotômetros e colorímetros, permite medir e analisar cada elemento da composição de uma cor, quantificando-a, ou seja, atribuindo-lhe valores numéricos.

Na maioria das vezes, a determinação de um padrão de cor na madeira é realizada de forma bastante subjetiva. Dentre a variedade de formas de descrever precisamente uma cor, existem métodos capazes de discerni-la cientificamente e de modo preciso (MORI et al., 2004).

Atualmente, o método mais eficaz para a determinação da cor da madeira consiste na utilização de aparelhos apropriados, podendo ser um colorímetro ou um espectrofotômetro, os quais utilizam o sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , o qual por sua vez é caracterizado por um sistema de coordenadas de cor tridimensional, sendo elas: a luminosidade ( $L^*$ ) que varia de 0 (preto) a 100% (branco) e as coordenadas cromáticas  $a^*$  (verde-vermelho) e  $b^*$  (azul-amarelo) que variam entre -60 e +60.

### 3.4 Ângulo de contato

O ângulo de contato pode ser definido como, a interação entre uma superfície e um determinado líquido ou o ângulo entre um plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado, conforme esquematizado na Figura 2.



**Figura 2.** Definição do ângulo de contato  $\theta$  entre uma gota líquida e uma superfície plana e horizontal (Fonte: YOUNG, 1805).

Nesta figura 2 observa-se  $\gamma_s$ , que corresponde à tensão superficial entre sólido e gás,  $\gamma_{LV}$  que corresponde à tensão superficial entre líquido e o gás e  $\gamma_{SL}$  que é a tensão entre sólido e líquido. A tensão superficial é definida como a força que age tangencialmente a gota do líquido. Young (1805), o primeiro a estabelecer relações entre a energia de superfície e o ângulo de contato através da seguinte equação:

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Em que:  $\gamma_s$  é a tensão superficial entre sólido e gás,  $\gamma_{SL}$  é a tensão entre sólido e líquido e  $\gamma_{LV}$  corresponde à tensão superficial entre líquido e o gás.

Mais tarde, Wenzel (1936) foi quem relacionou o ângulo de contato aparente a rugosidade da superfície a partir da equação de Young:

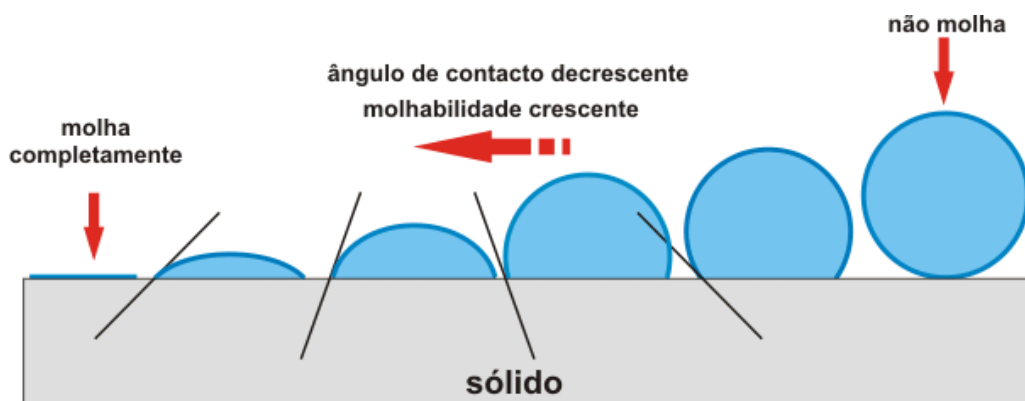
$$\cos \theta = R_w \cdot \cos \theta' \quad (2)$$

Em que  $\theta'$  é o ângulo de contato aparente e  $R_w$  é o fator de rugosidade da superfície.

A madeira pode ter caráter hidrofílico ou hidrofóbico que varia bastante pela complexidade de sua estrutura. Quando a madeira é tratada termicamente, ela pode ter a sua superfície modificada havendo mudança das moléculas e dos componentes da madeira (GLINDL et al., 2004). Assim, os grupamentos hidrofóbicos migram para a região mais externa, aumentando o ângulo de contato da água sobre a superfície (molhabilidade) (HAKKOU et al., 2005).

A gota pode apresentar um comportamento diferenciado de acordo com o tipo de superfície que entra em contato. O modo como o volume de uma gota se acomoda depende das interações entre a água e o a superfície do material em que foi depositada. É, portanto, possível medir o ângulo com que uma gota fica na superfície e com isto caracterizar a superfície. Os ângulos de contato de uma gota de água numa folha, no vidro, no azulejo, etc. são todos diferentes. Ele influencia como a água fica uma superfície, determinando assim a molhabilidade da mesma. Uma modificação química na superfície, por reação ou adsorção, pode ser usada para aumenta ou diminuir o ângulo de contato, de acordo com a necessidade, influenciando assim na molhabilidade do sólido pelo líquido.

Na Figura 3 observam-se diferentes ângulos de contato em contato com uma superfície. Quanto menor o ângulo de contato maior será a molhabilidade da superfície. As superfícies com ângulos de contato de  $0^\circ$  apresentam uma molhabilidade completa enquanto que uma superfície completamente hidrofóbica apresenta um ângulo de  $180^\circ$ . A molhabilidade é explicada pelas forças de coesão (líquido-líquido) e adesão (sólido-líquido).



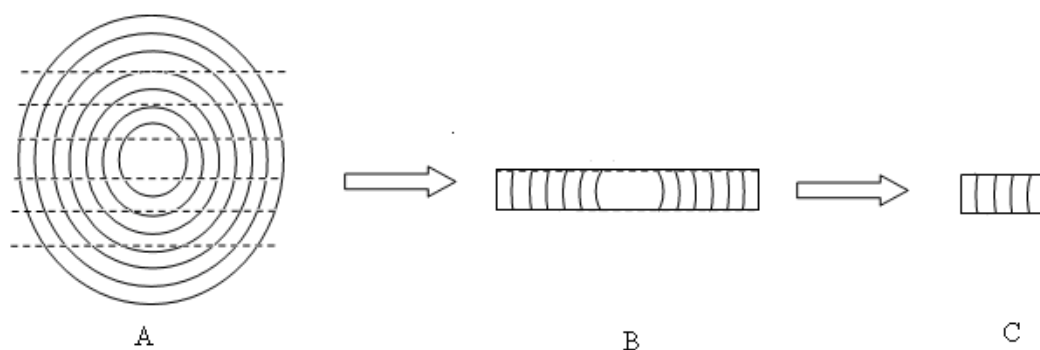
**Figura 3.** Diferentes ângulos de contato de uma gota com a superfície (Fonte: YOUNG, 1805).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterizações do material

Para a realização deste projeto foi utilizada madeira de *Khaya ivorensis* (mogno africano) obtidas no campus da UFRRJ, de duas árvores de aproximadamente 30 anos de idade.

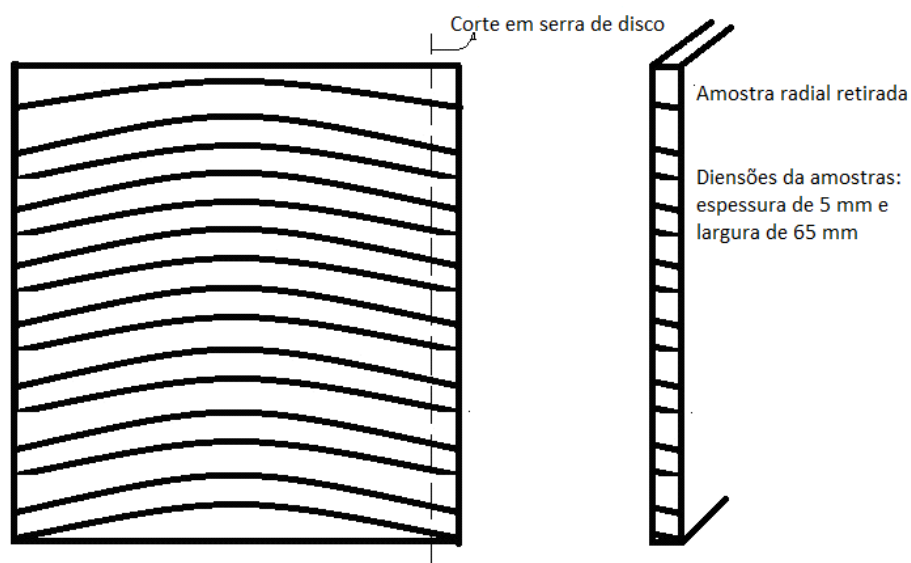
No desdobramento das toras foram aproveitados os pranchões radiais (Figura 4). Os pranchões foram secos ao ar e posteriormente climatizados em ambiente com temperatura controlada de 20°C e umidade relativa do ar com 65%.



**Figura 4.** Esquema de desdobro e retirada do material das toras de *Khaya ivorensis* para os testes físicos (A) Desdobro tangencial em serra-fita; (B) Desdobro em serra circular e (C) Peças destinadas à confecção de corpos-de-prova.

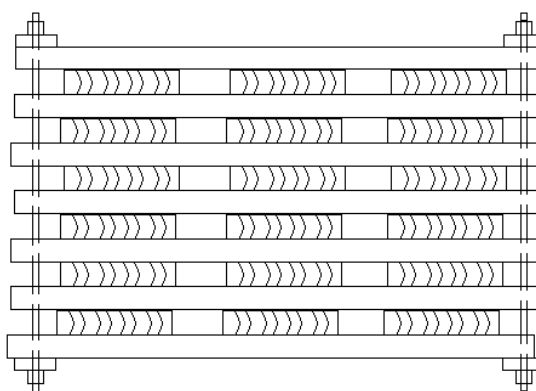
Dos pranchões radiais de madeira foram retirados placas de 5 mm x 65 mm x 240 mm de espessura, largura e comprimento respectivamente, com o auxílio da serra de disco com dentes vîdea. As peças foram devidamente aplainadas para a retirada de qualquer empenamento ou irregularidades.

Segue, na Figura 5 o esquema que mostra a retirada das placas de madeira.



**Figura 5.** Desenho esquemático que mostra a retirada e placas radiais dos pranchões.

Depois de cortadas, as placas foram climatizadas a 20°C e UR de 65% sob um sistema de travamento para se evitar possíveis empenamentos e foi realizadas medições até peso fosse constante (Figura 6).



**Figura 6.** Sistema de contenção e climatização das amostras radiais para evitar possíveis empenamentos.

Após esta etapa, das placas radiais foram retiradas amostras com 5 mm x 50 mm x 180 mm de espessura, largura e comprimento, respectivamente, com o auxílio da serra de disco. Depois de cortadas, selecionadas e climatizadas, as amostras foram devidamente ensacadas para posteriormente serem devidamente testadas.

#### 4.2 Tratamentos Térmicos

Foram considerados dois métodos de tratamento térmico: um em ambiente úmido e o outro em ambiente seco. Em ambiente úmido, sobre pressão, foram utilizadas duas temperaturas e duas pressões diferentes, usando-se para isto autoclave. O primeiro procedimento consistiu de banho de vapor numa temperatura de 120° C numa pressão de 1,5



kgf.cm<sup>-2</sup> durante 60 minutos e o segundo procedimento a temperatura de 160°C e pressão de 6 kgf.cm<sup>-2</sup>, durante 70 minutos. Após os tratamentos em autoclave, as amostras tratadas foram levadas a um ambiente climatizado até alcançar peso constante. Para não correr riscos de empenamento as amostras foram devidamente gradeadas e tensionadas.

O método a seco foi feito em Mufla elétrica laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, equipado com um sistema de controle de temperatura e tempo, e as amostras foram tratadas em temperaturas de 130°C, 160°C e 190 °C. O tempo de tratamento na temperatura alvo foi de 20 minutos, devido a valor da espessura das amostras (5 mm). Ao termino dos tratamentos, as amostras foram levadas para um ambiente climatizado para que atingissem o sua umidade de equilíbrio. Para não correr riscos de empenamento as amostras foram devidamente gradeadas e tensionadas.

O delineamento foi um fatorial que verifica o efeito da temperatura de termorreificação a seco e do efeito do tratamento a vapor a 120°C e a 160°C. A Tabela 1 traz o desenho experimental. Alguns tratamentos tiveram o efeito aditivo do tratamento a seco e a úmido, sendo que foram usados 12 repetições por cada tratamento, resultando em 144 amostras utilizadas. As amostras foram selecionadas previamente, antes da aplicação dos tratamentos térmicos, e distribuídas de modo que a densidade aparente fosse praticamente constante em cada tratamento, de modo a evitar a densidade aparente como covariável.

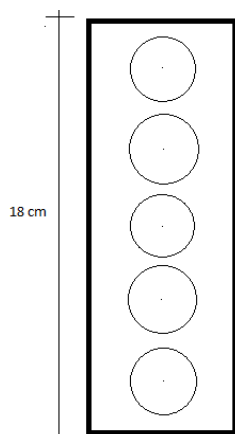
**Tabela 1.** Desenho experimental e o número de tratamentos resultantes.

Aplicação de vapor e temperatura	Controle	Tratamento a seco em Mufla.		
		130°C	160°C	190°C
Controle (não tratada)	T1	T4	T7	T10
120°C e 1,2 kgf.cm-2	T2	T5	T8	T11
160°C e 6,0 kgf.cm-2	T3	T6	T9	T12

### 4.3 Análises colorimétricas

As análises colorimétricas foram realizadas com o auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d da Konica Minolta no espaço de cor CIE L\*a\*b\*, segundo a norma CIEL 1976 «*Commission Internationale de L'Éclairage 1976*» (1986). O sistema CIE L\*a\*b\* é caracterizado por três diferentes coordenadas (L\*, a\* e b\*) em um espaço de cor tridimensional. A axe L\* representa a luminosidade, a qual varia de zero (preto) a 100 (branco), enquanto que a\* e b\* representam as coordenadas cromáticas, ambas variando entre -60 e +60. No diagrama de cromaticidade CIE L\*a\*b\*, os sinais positivos e negativos significam aumento na tonalidade vermelha (+a\*), aumento na tonalidade verde (-a\*), aumento na tonalidade amarela (+b\*) e aumento na tonalidade azul (-b\*) (KONICA MINOLTA, 1998).

Para essa medição foi necessário primeiramente o lixamento das amostras, com o auxílio de uma lixadeira. O lixamento de cada amostra foi feito, na sequência, com lixas de número 80, 220 e 360, respectivamente. Após o lixamento as amostras passaram por um processo de vibração para retirada do excesso de pó. A medição da cor foi feita em cinco pontos no comprimento de cada amostra, equidistante em 4,10 mm, conforme mostrado na Figura 7. Após a medição da cor, todo material foi devidamente ensacado, na ausência de ar.



**Figura 7.** Desenho esquemático da medição da cor em cinco diferentes pontos equidistantes da amostra.

#### **4.4 Ensaio de molhabilidade**

A molhabilidade das superfícies da madeira foi avaliada através do método da gota séssil, utilizando um sistema de análise de formato da gota «Drop Shape Analysis DSA100», versão 1.92 da KRÜSS GmbH (Hamburg, Alemanha) que mediu propriedades da gota como o ângulo de contato (graus). Esse sistema apresenta três componentes: (1) uma mesa de suporte para fixação da amostra; (2) um sistema de vídeo com câmera, um sistema óptico, um prisma padrão de formato para determinação do ângulo de contato e uma fonte de iluminação e abertura; e (3) um sistema dosador que pode ser controlado manualmente ou com o auxílio do software DSA1.

Das 12 amostras tratadas de cada tratamento, foram selecionadas 4 amostras para realizar-se o ensaio de molhabilidade. As medições ocorreram na mesma superfície, previamente lixada para a medição de cor. Em cada amostra foram feitas 3 leituras (3 gotas). O aparelho efetivou medições de ângulo (graus), área da gota ( $\text{mm}^2$ ), volume ( $\mu\text{L}$ ) e base da gota BD (diâmetro na base da gota em mm) a cada 20 segundos durante o período de 2 minutos. A primeira medição do ângulo foi para tempo zero (momento que a gota atinge a superfície da madeira) e o ultima medição no tempo de 120 segundos.

#### **4.5 Determinações da resistência e rigidez da madeira em ensaios de flexão**

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga concentrada no centro do corpo de prova, vinculado a dois apoios articulados. Este ensaio foi realizado em 4 amostras de cada tratamento, as mesmas amostras utilizadas no ensaio de molhabilidade.

O vão de teste foi 10 cm, obtendo a relação entre vão e altura da amostra ( $L/b$ ) maior que 21 vezes de modo a garantir o efeito desprezível da força cortante na determinação do modulo de elasticidade.

A resistência da madeira ao esforço de flexão é um valor dado pela tensão máxima que pode atuar um corpo de prova no ensaio de flexão simples. Sendo determinada pela seguinte etapa:

$$f_b = M_{m\acute{a}x}/W_e \quad (3)$$

Onde:

$f_b$  = resist\^encia m\^axima \^a flex\^ao est\^atica, em kgf.cm<sup>-2</sup>

$M_{m\acute{a}x}$  = m\^aximo momento fletor aplicado ao corpo- de- prova, em kgf.cm;

$W_e$  = m\^odulo de resist\^encia el\^astico da se\^ao transversal do corpo de prova, dado por  $b^2h/6$ , em cm<sup>3</sup>, onde espessura (b) e a largura da amostra (h).

O m\^odulo de elasticidade foi determinado pela seguinte etapa:

$$E_b = \frac{\Delta N L^3}{4 \Delta \delta b^3 h} \quad (4)$$

Onde:

$E_b$  = m\^odulo de elasticidade da madeira, em kgf.cm<sup>-2</sup>;  $\Delta N$  = diferen\^ca de carga, kgf.cm<sup>-2</sup>;

$L$  = v\^ao do corpo-de-prova, em cm;  $b$  e  $h$  = correspondem, respectivamente, \^a espessura e largura da se\^ao transversal do corpo-de-prova,  $\Delta \delta$  = diferen\^ca de flecha, cm;

#### 4.6 \^Angulos de inclina\^ao das fibras

Foram realizadas medi\^oes do \^angulo de inclina\^ao das fibras no centro de cada amostra. A medi\^ao ocorreu em rela\^ao \^a espessura e largura das amostras.

#### 4.7 An\^alises estat\^isticas

As vari\^aveis estudadas relativas \^a colora\^ao da madeira e as propriedades da gota, foram submetidas \^a verifica\^ao de normalidade e da heterocedasticidade, pressupostos para aplica\^ao da an\^alise de vari\^ancia e para tal usou-se o m\^etodo de Kolmogorov-Smirnov e Levene, respectivamente, ao n\^ivel de 5% de signific\^ancia. Quando a vari\^avel dependente estudada n\^ao atendeu aos pressupostos param\^etricos, foi aplicado teste n\^ao param\^etrico de Kruscall-Wallis ou Mann-Whitney. Quando diferen\^cas entre tratamentos foram detectadas, no campo param\^etrico e n\^ao param\^etrico, usou o teste de Tukey e teste de Dunn, respectivamente, ao n\^ivel de 5% de signific\^ancia, para diferenciar as m\^edias ou m\^edias dos postos. As an\^alises de correla\^oes foram feito pelo m\^etodo de Pearson, ao mesmo n\^ivel de signific\^ancia citado anteriormente.

## 5. RESULTADOS E DISCUSS\^AO

### 5.1 Propriedades da gota em fun\^cao dos tratamentos t\^ermicos

Na Tabela 2 s\^ao apresentadas \^as correla\^oes das propriedades da gota entre si, seu \^angulo de contato (graus), \^area (mm<sup>2</sup>), volume (uL) e di\^ametro na base da gota BD (mm). Pode-se observar que, o \^angulo formado pelo contato da gota com a superf\^icie da madeira apresenta uma rela\^ao altamente negativa com a propriedade BD, que corresponde ao di\^ametro da base da gota. Quanto menor \^e o di\^ametro da base da gota, maior \^e o \^angulo da

gota. Já o volume de água da gota tem relação positiva com a área formada e o diâmetro da base da gota (BD), ou seja, são variáveis diretamente proporcionais. Assim como, a área da gota está diretamente relacionada com o diâmetro da gota e o volume da gota.

**Tabela 2.** Correlação entre os valores médios das propriedades da gota em contato com a superfície da madeira.

	Ângulo (graus)	Volume (ul)	Área (mm <sup>2</sup> )	BD (mm)
Ângulo	-	0,04	0,13	<b>-0,81*</b>
Volume (ul)		-	<b>0,99</b>	<b>0,54</b>
Área (mm <sup>2</sup> )			-	<b>0,46</b>
BD (mm)				-

\* valores em negrito foram significativos com  $p < 0,05$  pelo método de Pearson.

A Tabela 3 traz o efeito do tratamento térmico a seco nas propriedades da gota em contato com a superfície da madeira, são elas: volume, ângulo de contato, área de contato e base do diâmetro da gota. Observa-se que, as variáveis de volume e área da gota em contato com a superfície da madeira apresentaram uma diferença estatística nos tratamentos a 130°C e 190°C. Neste caso o tratamento a 130°C foi aquele que se destacou, apresentando o maior volume médio da gota, no período de 120 segundos de leitura. As variáveis de ângulo da gota e o diâmetro da base da gota apresentaram efeito significativo nas temperaturas 160°C e 190°C quando se compara as temperaturas mais baixas.

**Tabela 3.** Análise de Kruskal-Wallis para o efeito da temperatura em ambiente seco para as variáveis de volume, ângulo de contato, área de contato e BD com a superfície da madeira.

Tratamento	Volume- $\mu$ l	Ângulo - graus	Área - mm <sup>2</sup>	BD - mm
	Média (posto)	Média (posto)	Média (posto)	Média (posto)
0°C	12,9 (472,2) <sup>a</sup>	97,6 (412) <sup>a</sup>	21,2 (469,3) <sup>a</sup>	3,5 (579,8) <sup>a</sup>
130°C	14,3 (622,5) <sup>b</sup>	98,8 (419) <sup>a</sup>	22,6 (616,3) <sup>b</sup>	3,6 (631,1) <sup>a</sup>
160°C	13,1 (502,4) <sup>a</sup>	104,9 (599) <sup>b</sup>	21,6 (504,1) <sup>a</sup>	3,3 (432,3) <sup>b</sup>
190°C	12,2 (412,6) <sup>ac</sup>	104,5 (586) <sup>b</sup>	20,6 (424,0) <sup>ac</sup>	3,2 (368,5) <sup>b</sup>

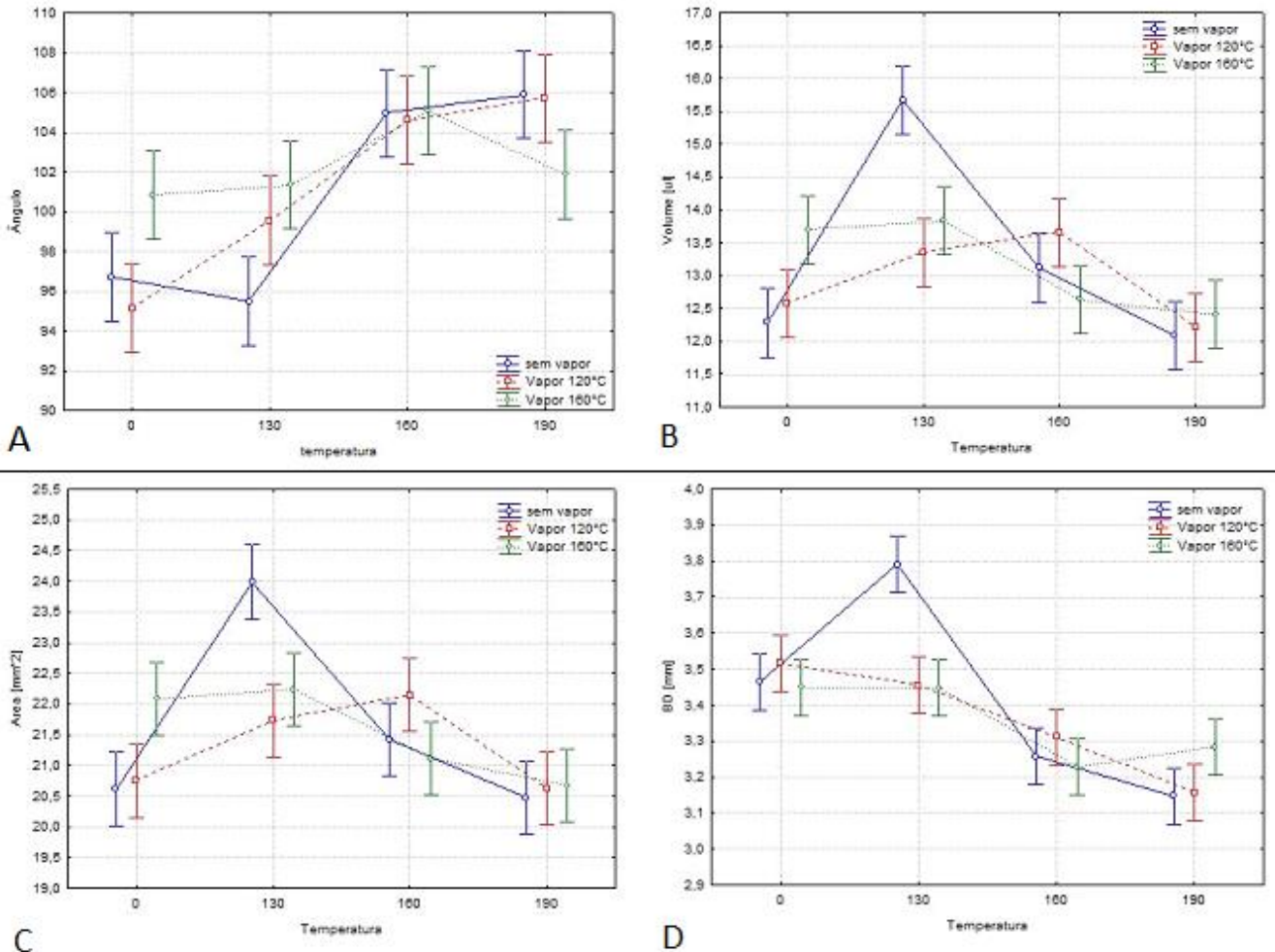
Letras distintas mostram diferença significativa, ao nível de 5%, pelo teste de Dunn. Valores entre parênteses mostram médias dos postos.

Observando-se a Figura 8 (A) nota-se que, o tratamento nas temperaturas de 130°C, 160°C e 190°C individualmente e combinados com o tratamento a vapor, provocaram um aumento significativo no ângulo de contato da gota na madeira, o que significa que a gota não se espalha com facilidade após a madeira ser tratada termicamente independente da temperatura. Quanto maior o ângulo de contato da gota menor será a molhabilidade da madeira. Observa-se também que à medida que a temperatura a seco aumenta, há uma nítida tendência do aumento do ângulo de contato.

Na Figura 8 (B) nota-se que o volume da gota apresentou grande aumento na temperatura de 130°C, porém os demais tratamentos a seco e a vapor esse valor diminuiu.

Na Figura 8 (C) está representado graficamente o efeito dos tratamentos térmicos na área de contato da gota na superfície da madeira. Observa-se que, ambos os tratamentos térmicos causam a diminuição dessa área de contato da gota com a superfície. Isto ocorre

devido à dificuldade de permeabilidade na superfície tratada no calor, indicando novamente que a gota não se espalha com facilidade após a madeira ser tratada termicamente, independente da temperatura.



**Figura 8.** Efeito dos tratamentos térmicos a seco e a vapor nas propriedades da gota da madeira de *Khaya ivorensis*. (A) ângulo de contato entre a gota e superfície da madeira. (B) volume da gota. (C) área da gota. (D) diâmetro da base da gota.

Na Figura 8 (D) vê-se que, o tratamento nas temperaturas de 130°C, 160°C e 190°C individualmente e combinados com o tratamento a vapor provocaram uma diminuição significativa no diâmetro da base da gota. Isso ocorre devido ao tratamento em altas temperaturas afetar negativamente a molhabilidade da superfície da madeira.

## 5.2 Propriedades da gota em função do tempo de medição

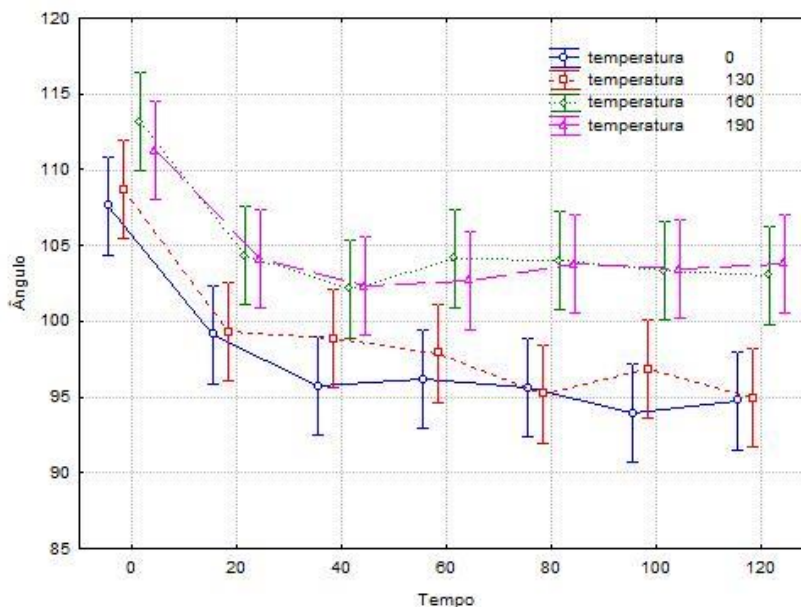
Na Tabela 4 segue as correlações das propriedades da gota no tempo inicial (tempo zero) e tempo final (120 segundos). Observa-se que, o ângulo inicial formado pela gota tem relação negativa com a área final, diâmetro da gota inicial, diâmetro da gota final, volume final e tem relação positiva com ângulo final. O ângulo final tem correlação altamente

negativa com o diâmetro da gota inicial. A área inicial e final tem boa correlação com a maioria das propriedades da gota tanto inicial quanto final. O diâmetro da gota inicial e final tem relações negativas com o ângulo inicial e final e relações positivas com as demais propriedades. O volume inicial tem correlação positiva com todas as propriedades assim como o volume final, com exceção aos ângulos.

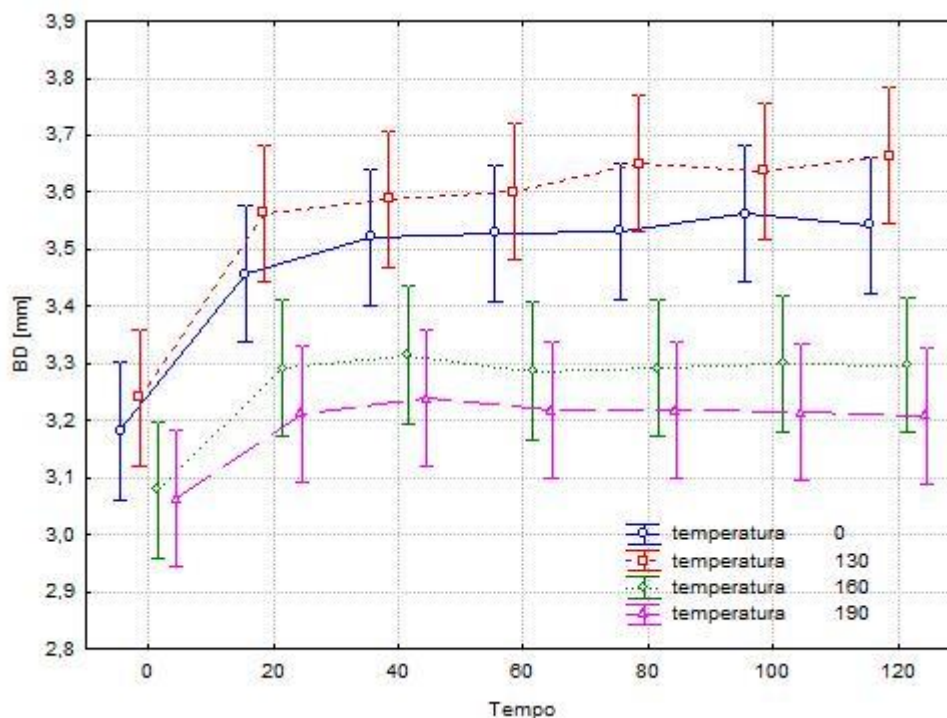
**Tabela 4.** Correlação entre as propriedades da gota na primeira e última mediações (tempo zero e 120 segundos).

	Ângulo inicial	Ângulo final	Área inicial	Área final	BD inicial	BD final	Volume inicial	Volume final
Ângulo inicial	-	<b>0,44</b>	0,29	<b>-0,35</b>	<b>-0,84</b>	<b>-0,54</b>	0,11	<b>-0,36</b>
Ângulo final		-	0,09	<b>-0,15</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,84</b>	0,01	<b>-0,17</b>
Área inicial			-	<b>0,50</b>	0,25	0,19	<b>0,97</b>	0,45
Área final				-	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,63</b>	<b>0,99</b>
BD inicial					-	<b>0,64</b>	0,42	0,65
BD final						-	0,32	<b>0,67</b>
Volume inicial							-	0,59
Volume final								-

Na Figura 9 observamos o efeito do tratamento térmico a seco em diferentes temperaturas no ângulo de contato da gota ao longo do tempo de medição. O ângulo de contato tende a diminuir ao longo do tempo de medição e os tratamentos a altas temperaturas tem um efeito mais significativo na variável. A Figura 10 mostra o efeito do tratamento térmico a seco na variável BD (diâmetro da base da gota) e nota-se o efeito contrário a variável de ângulo de contato da gota.



**Figura 9.** Efeito do tratamento térmico a seco em diferentes temperaturas no ângulo de contato da gota ao longo do tempo de medição da madeira de *Khaya ivorensis*.



**Figura 10.** Efeito do tratamento térmico a seco em diferentes temperaturas no diâmetro da base da gota ao longo do tempo de medição da madeira de *Khaya ivorensis*.

### 5.3 Propriedades da cor da madeira relacionadas às propriedades da gota e às propriedades mecânicas

Na Tabela 5 observa-se a correlação entre as propriedades e da gota inicial (tempo de 0 segundo) e final (tempo de 120 segundos) com as propriedades de cor. As propriedades luminosidade ( $L^*$ ) e cor total ( $Lab$ ) não apresentaram nenhum tipo de correlação significativa com as propriedades da gota. Porém, o pigmento cromático  $a^*$  que corresponde à cor vermelha apresenta correlação significativa e negativa com várias das propriedades entre elas, o ângulo inicial e final da gota, delta de volume e delta de área. Isso indica que a presença excessiva de pigmento vermelho na madeira pode afetar o espalhamento da gota na superfície da madeira. O pigmento cromático  $b^*$ , que corresponde à cor amarela também apresentou uma correlação negativa com os ângulos inicial e final e os deltas de volume, área e BD. O pigmento  $b^*$  tem relação significativa e positiva com BD inicial, volume, área e BD finais.

Na Tabela 6 se encontra os valores de correlação entre as propriedades de cor com as propriedades mecânicas e ângulo de inclinação de grã das amostras. Observa-se que o pigmento  $a^*$  (vermelho) apresentou correlações significativas e positivas com resistência máxima à flexão estática ( $f_b$ ), com o limite de proporcionalidade ( $l_p$ ) e o módulo de elasticidade na flexão ( $E_b$ ). Isso indica que a presença e intensidade de pigmento vermelho aumentam o valor de resistência oferecido pela madeira, assim como sua rigidez. Já o pigmento  $b^*$  (amarelo) apresentou correlação positiva significativas apenas com  $l_p$  e  $E_b$ . Ambos os pigmentos apresentaram uma correlação significativa negativa com o ângulo da grã na largura da amostra

**Tabela 5.** Correlação entre as propriedades da gota na primeira medição (tempo de 0 segundo) e na última medição (tempo de 120 segundos) e as propriedades de cor L\* (luminosidade), a\* (pigmento cromático vermelho), b\* (pigmento cromático amarelo).

	L*	a*	b*
Ângulo inicial	-0,05	<b>-0,19</b>	-0,15
Ângulo final	-0,12	-0,09	-0,10
Delta Ângulo*	0,08	-0,09	-0,04
Volume inicial	0,09	0,00	0,12
Área inicial	0,08	-0,03	0,10
BD inicial	0,07	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>
Volume final	0,03	<b>0,20</b>	<b>0,21</b>
Área final	0,01	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>
BD final	0,10	<b>0,20</b>	<b>0,19</b>
Delta volume*	0,04	<b>-0,21</b>	-0,11
Delta Área*	0,05	<b>-0,22</b>	-0,12
Delta BD*	-0,04	-0,06	-0,05

Observação: \* Delta corresponde à diferença entre os valores inicial (tempo de zero segundo) e final (tempo de 120 segundos) em relação a variável em questão.



**Figura 11.** Visão dos vasos em corte e longitudinal (A) e diagonal (B) de uma amostra de madeira de *Khaya ivorensis* revelando a grã reversa.

. A madeira de mogno africano possui grã irregular reversa, podendo num mesmo plano se ver os vasos cortados longitudinalmente (A) ou diagonalmente (B) (Figura 11). A cor medida na região (A) terá leitura diferente da região (B). Deste modo, o ângulo da grã afetará a leitura da cor da madeira e neste caso maiores ângulos implicam em menores leituras de pigmentação vermelha e amarela.



**Tabela 6.** Correlação entre as propriedades de cor L\* (luminosidade), a\* (pigmento cromático vermelho), b\* (pigmento cromático amarelo) com propriedades mecânicas e ângulo de inclinação de grã.

	fb	lp	fb/lp	Eb	Ângulo largura
L*	-0,20	-0,10	-0,15	-0,13	-0,05
a*	<b>0,32</b>	<b>0,40</b>	-0,17	<b>0,58</b>	<b>-0,31</b>
b*	0,15	<b>0,33</b>	-0,33	<b>0,40</b>	<b>-0,31</b>

$f_b$  = resistência máxima à flexão estática, em kgf.cm<sup>2</sup>;  $l_p$  = limite de proporcionalidade no teste de resistência a flexão;  $E_b$  = módulo de elasticidade na flexão  $f_b/l_p$  = razão entre a resistência a flexão e o limite de proporcionalidade na flexão.

Para a verificação do efeito dos tratamentos térmico seco e úmido nas propriedades de cor da gota séssil e das propriedades mecânicas foi verificada a normalidade e heterocedasticidade das variâncias das variáveis estudadas e observou-se que as variáveis L\* (luminosidade), a\* (pigmento cromático vermelho), b\* (pigmento amarelo), Lab\* (cor total), ângulo final, delta ângulo, área final, delta área, BD final, delta BD, volume inicial, volume final, delta volume,  $f_b$ ,  $l_p$ ,  $E_b$ ,  $f_b/l_p$  não cumpriram os pressupostos para análise de variância.

As variáveis estudadas que cumpriram os pressupostos da análise de variância foram o ângulo final, BD final,  $f_b/l_p$  e delta BD, e foram afetados apenas pelo tratamento a seco, mas não foram afetados para tratamento em ambiente úmido.

As variáveis de ângulo inicial, área inicial e BD inicial não atenderam o pressuposto de análise de variância e apresentaram diferenças pelo teste de Kruskal-Wallis, quando considerado o efeito da temperatura a seco. Os diferentes níveis de vapor não afetaram nenhuma dessas propriedades estudadas.

A Tabela 7 traz os valores médios das propriedades mecânicas e ângulo das fibras na largura das amostras em todos os tratamentos. Nota-se que a madeira de *Khaya ivorensis* mostra tendência de aumento do módulo de elasticidade, a medida que se aumenta a temperatura de tratamento a seco, apenas nas amostras que não foram tratadas em vapor.

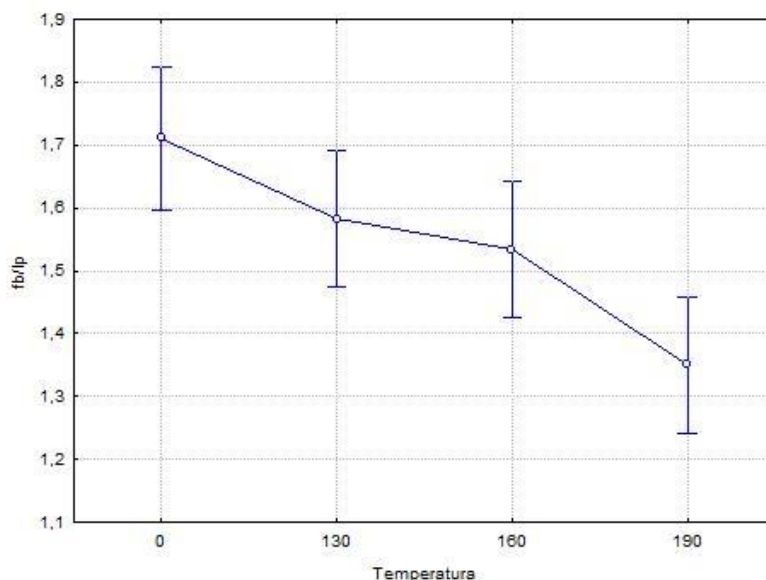
Os valores médios de ângulo de inclinação das fibras medidos no centro de cada amostra, em relação à largura das amostras, se mantiveram na faixa de 2,32 de mínimo e 4,04 de máximo.

A Figura 12 mostra o efeito da temperatura na relação  $f_b/l_p$ . Os valores de  $f_b/l_p$  tendem a diminuir nas amostras tratadas termicamente a seco. A resistência da madeira é afetada significativamente quando a madeira é submetida a altas temperaturas, havendo diminuição da resistência na flexão quando se considera o limite de proporcionalidade, em outras palavras, a um aumento do comportamento elástico da madeira e uma diminuição no comportamento plástica. A relação entre a resistência na flexão e o limite de proporcionalidade é fator de segurança para se chegar a valores de calculo na construção com madeira. Valor médio esperado em ensaio na flexão é de entre 1,7 e 1,8 e observa-se que madeira tratada termicamente reduz sensivelmente este fator de segurança à medida que a temperatura aumenta. Caso madeira termorretificada seja usada na construção civil, há de se verificar todos os fatores de seguranças, para se calcular as tensões de cargas ou de projeto.

**Tabela 7.** Valores médios das propriedades mecânicas resistência na flexão, limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade e ângulo das fibras na largura das amostras em todos os tratamentos.

Temperatura	Vapor	fb	lp	fb/lp	Eb	Ângulo largura
Ambiente	sem vapor	687	390	1,76 <sup>a</sup>	80.629	2,88
130		743	437	1,71 <sup>a</sup>	86.304	3,15
160		700	405	1,72 <sup>a</sup>	87.328	4,04
190		741	562	1,33 <sup>b</sup>	99.050	3,72
Média		718 <sup>a</sup>	448	1,63	88.328	3,45
Ambiente	120	726	433	1,68	82.571	2,87
130		694	487	1,42	91.056	2,93
160		688	495	1,41	85.223	3,72
190		506	377	1,37	101.304	2,41
Média		654 <sup>a</sup>	448	1,47	90.039	2,98
Ambiente	160	697	417	1,69	93.589	3,26
130		609	385	1,62	92.608	3,49
160		721	502	1,47	97.790	3,91
190		609	450	1,35	88.827	2,32
Média		659 <sup>a</sup>	439	1,53	93.204	3,25

$f_b$  = resistência máxima à flexão estática, em  $\text{kgf.cm}^{-2}$ ;  $l_p$  = limite de proporcionalidade na flexão;  $E_b$  = módulo de elasticidade na flexão;  $f_b/l_p$  = relação entre a resistência a flexão e o limite de proporcionalidade na flexão.



**Figura 12.** Efeito do tratamento térmico a seco na relação entre a resistência a flexão e o limite de proporcionalidade na flexão da madeira de *Khaya ivorensis*.

A Tabela 8 mostra os efeitos do tratamento a seco na relação entre a resistência à flexão e resistência a compressão no limite de proporcionalidade. Observa-se que o tratamento a temperatura de 160°C apresentou grandes efeitos na relação fb/lp. Após tratamento os valores diminuíram.

**Tabela 8.** Teste de Tukey para o efeito do tratamento a seco na relação entre resistência à flexão e limite de proporcionalidade (fb/lp).

Temperatura	fb/lp
190°C	1,35 <sup>a</sup>
160°C	1,53 <sup>ab</sup>
130°C	1,58 <sup>b</sup>
Não tratada	1,71 <sup>b</sup>

Diferenças estatísticas entre medias foram feitas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Após as análises não se observou diferenças estatísticas para o efeito dos tratamentos a seco e a vapor nas variáveis L\* (luminosidade), a\* (pigmento cromático vermelho), Lab (cor total), área final, e volume final.

Na Tabela 9 segue os valores de média do teste de Tukey para b\* (pigmento amarelo). A análise da variância para a variável segue em anexo (Tabela 12) e observa-se que não houve efeito do vapor isoladamente sobre a variável, mas o efeito da temperatura a seco e da interação dos dois tratamentos (temperatura x vapor) foram significativos. A figura 13 representa esse resultado graficamente. O teor de pigmento amarelo aumentou com o tratamento a altas temperaturas.

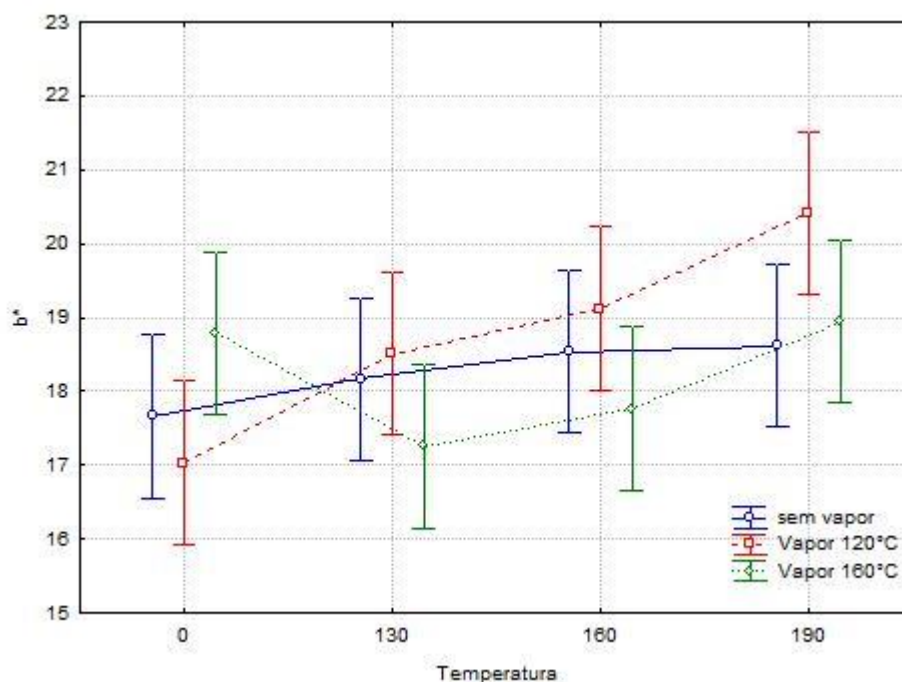
**Tabela 9.** Teste de Tukey para o efeito do tratamento a seco e a vapor no pigmento cromático b\* (amarelo).

Autoclave a vapor	Tratamento térmico a seco - °C			
	Não tratada	130 °C	160°C	190°C
Não tratada	17,66 <sup>a</sup> A	18,17 <sup>a</sup> A	18,54 <sup>a</sup> A	18,62 <sup>a</sup> A
120°C	17,03 <sup>a</sup> A	18,51 <sup>a</sup> AB	19,12 <sup>a</sup> AB	20,41 <sup>a</sup> AB
160°C	18,79 <sup>a</sup> A	17,26 <sup>a</sup> A	17,77 <sup>a</sup> A	18,95 <sup>a</sup> A

Observação: Letras distintas mostram diferença significativa entre medias sendo que as letras minúsculas na mesma coluna e letra maiúscula na mesma linha.

Na Tabela 10 têm-se os resultados da análise de Kruskal-Wallis para o efeito dos tratamentos a temperatura a seco e do vapor para as variáveis de ângulo de contato inicial, área de contato inicial e volume inicial (tempo de medição em zero segundo) com a superfície da madeira.

Para a variável ângulo de contato inicial observa-se uma diferença estatística nos tratamentos nas temperaturas de 160°C e 190°C. O tratamento a temperaturas a partir de 160°C causaram o aumento significativo no ângulo de contato inicial



**Figura 13.** Efeito do tratamento térmico a seco e a vapor no pigmento cromático  $b^*$  da madeira de *Khaya ivorensis*.

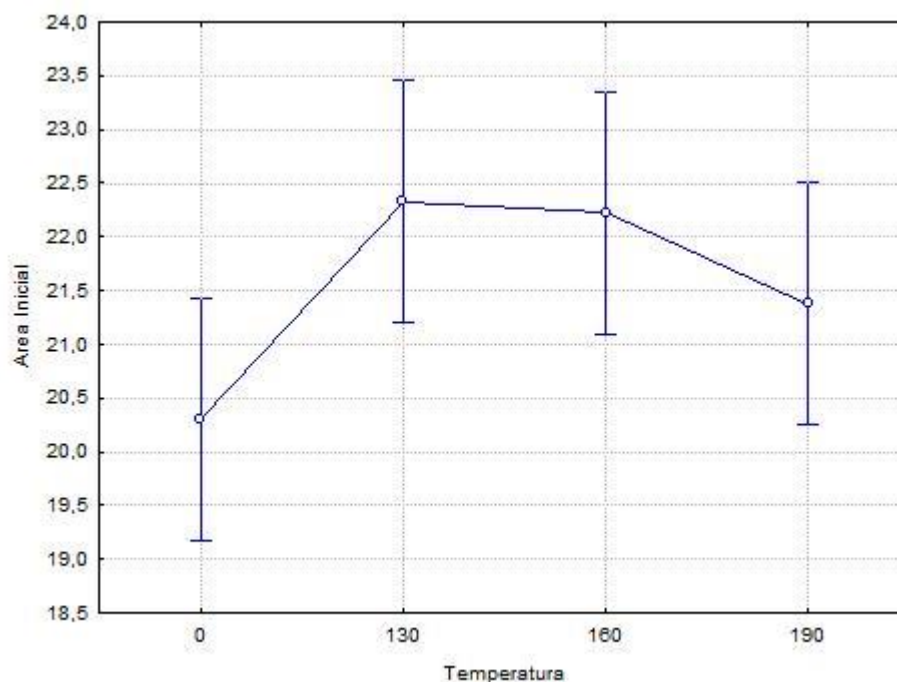
Na variável área inicial notamos diferenças estatísticas para os efeitos dos tratamentos a seco nas temperaturas de 130°C e 160°C. Na figura 14 mostra graficamente o efeito das temperaturas sob a área inicial da gota. A área inicial da gota tende a ser maior quando em contato com a superfície da madeira tratada termicamente.

Para o volume inicial da gota não se observou diferenças significativas na variável para o tratamento a vapor. Para o tratamento a seco houve diferenças estatísticas nas temperaturas 130°C e 190°C.

**Tabela 10.** Teste de Kruskal-Wallis para o efeito da temperatura em ambiente seco para as variáveis de ângulo de contato inicial, área de contato inicial e volume inicial com a superfície da madeira.

Tratamento	Ângulo inicial - graus	Área inicial - mm <sup>2</sup>	Volume inicial - μl
	Média (posto)	Média (posto)	Média (posto)
Não tratada	107,6 (62,8) <sup>a</sup>	20,3 (61,9) <sup>a</sup>	12,1 (63,1) <sup>a</sup>
130°C	108,8 (66,7) <sup>a</sup>	22,3 (88,1) <sup>ab</sup>	13,6 (89,4) <sup>b</sup>
160°C	113,1 (84,8) <sup>b</sup>	22,2 (77,1) <sup>ac</sup>	13,4 (76,2) <sup>ab</sup>
190°C	111,2 (75,8) <sup>b</sup>	21,4 (62,9) <sup>ac</sup>	12,7 (61,3) <sup>a</sup>

Letras distintas mostram diferença significativa, ao nível de 5%, pelo teste de Dunn. Valores entre parênteses mostram médias dos postos.



**Figura 14.** Efeito do tratamento térmico a seco na área inicial da madeira de *Khaya ivorensis*.

Na Tabela 11 traz o teste de Tukey para o efeito do tratamento térmico a seco para as variáveis ângulo final, BD final (tempo de 120 segundos) e delta BD. Para a variável ângulo de contato final observaram-se diferenças estatísticas para o efeito do tratamento a seco na temperatura de 160°C e 190°C. A análise de variância segue em anexo (Tabela 13). Na figura 15 mostra o efeito significativo da temperatura no ângulo final da gota. O ângulo final tende a ser maior em amostras tratadas termicamente a seco. Isso revela a dificuldade de permeabilidade de madeiras tratadas termicamente a altas temperaturas.

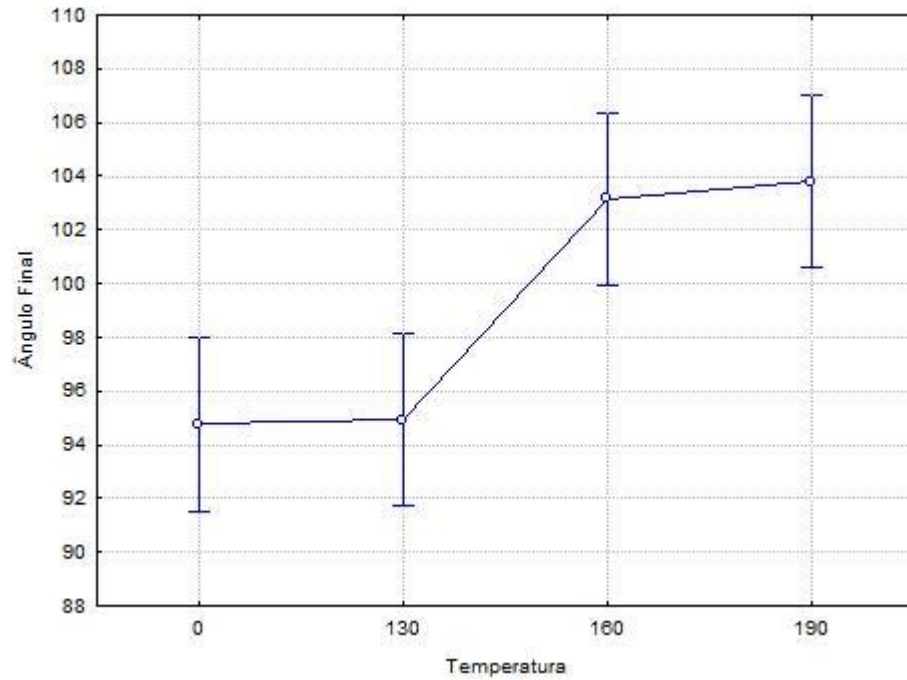
**Tabela 11.** Teste de Tukey para o efeito do tratamento térmico a seco para as variáveis, ângulo final, BD final e Delta BD.

Tratamento	Ângulo final - graus	BD final - mm	delta BD - mm
	Média	Média	Média
0°C	94,8 <sup>a</sup>	3,5 <sup>bc</sup>	-0,39 <sup>a</sup>
130°C	94,9 <sup>a</sup>	3,7 <sup>c</sup>	-0,42 <sup>a</sup>
160°C	103,2 <sup>b</sup>	3,3 <sup>ab</sup>	-0,22 <sup>a b</sup>
190°C	103,8 <sup>b</sup>	3,2 <sup>a</sup>	-0,14 <sup>b</sup>

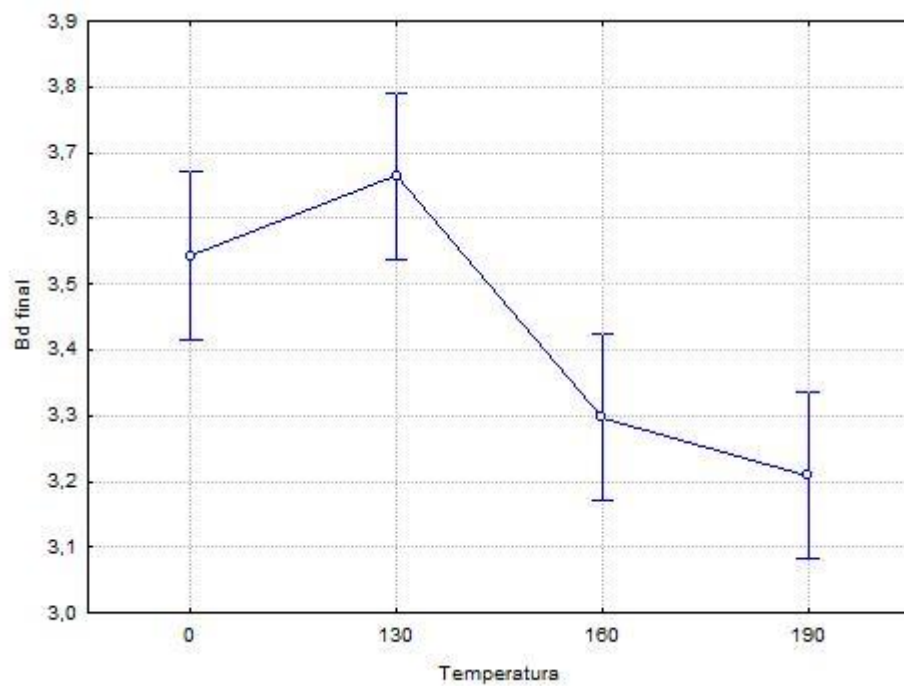
Diferenças estatísticas entre medias foram feitas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para a variável BD final nota-se que o tratamento a vapor e a interação entre ambos não foi significativo. A análise da variância para a variável segue em anexo (Tabela 14) e observa-se que o tratamento a seco teve efeito significativo. A Figura 16 mostra o efeito negativo do tratamento a seco em altas temperaturas ao diâmetro final da gota na superfície da madeira. Os tratamentos a 160°C e 190°C diminuíram consideravelmente o diâmetro da base

da gota. Também na Tabela 11 se encontram os valores médios do teste de Tukey para delta BD (diferença tempo de medição zero e 120 segundos).



**Figura 15.** Efeito do tratamento térmico a seco no ângulo final da madeira de *Khaya ivorensis*.



**Figura 16.** Efeito do tratamento térmico a seco no BD final da madeira de *Khaya ivorensis*.

## 6. CONCLUSÕES

- O tratamento térmico alterou o ângulo de contato da madeira de mogno africano, ou seja, houve uma diminuição na molhabilidade da superfície.
- O pigmento cromático  $a^*$  que corresponde à cor vermelha também interfere no ângulo de contato da gota na superfície da madeira tratada termicamente e conseqüentemente a molhabilidade da superfície onde maiores níveis de pigmentação diminuem o ângulo de contato.
- A presença dos pigmentos cromáticos  $a^*$  (vermelho) e  $b^*$  (amarelo) estão relacionados diretamente com as propriedades mecânicas da madeira tratada termicamente de resistência à flexão e rigidez (módulo de elasticidade).
- O aumento da temperatura do tratamento térmico reduz o coeficiente de segurança ou coeficiente de majoração em ensaio de flexão.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, C.P. et al. **Levantamento bibliográfico sobre o Mogno Africano**. Consultoria Florestal. FCA. UNESP. P.C. 67, REV.:00, p. 1 – 24, 2011.
- AUBREVILLE, A. La flore forestière de la Côte d'Ivoire I,11,III, 1959.
- BRITO, O. B.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO, Jr. G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. S. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.
- FALESI, I. C.; BAENA, A.R.C. **Mogno-africano *Khaya ivorensis* A. Chev. em sistema silvipastoril com leguminosa e revestimento natural do solo**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 52p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 4).
- GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F.; MATOS, J. J. M.; SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden wood using stress wave method. **Wood Sci. Technol.**, 2011. Doi: 10.1007/s00226-010-0387-6.
- GINDL, M.; REITERER, G.; SINN, S.E Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz Roh Werkst.**, v. 62, p. 273–280, 2004.
- GROGAN, J.; BARRETO P.; VERÍSSIMO A. **Mogno na Amazônia Brasileira: Ecologia e Perspectivas de Manejo**; Belém: Imazon 2002. 40p.
- GUIMARÃES, K. V. & MARINHO, P. S. B. & SILVA, M. F. G. V. & FERNANDES, J. B. & VIEIRA, P. C. & MÜLLER, M. W. 2004. **Limonóides isolados na família Meliaceae**. In:XXVI Reunião anual sobre evolução, sistemática e ecologia micromoleculares.
- HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of the reasons for the increase of wood durability after heat treatment based on changes of wettability and chemical composition. In: European conference on wood modification, 2., 2005, Göttingen. **Proceedings...** Göttingen: ECWM, 2005. p.36-46
- MILITZ, R. Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art. In: CONFERENCE ON ENHANCING THE DURABILITY OF LUMBER AND ENGINEERED WOOD PRODUCTS. **Proceedings...** Kissimmee, Orlando: Forest Products Society, Madison, US, 2002.
- MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico- mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, 99p. 2010.
- MORI, C. L. S. DE O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.



MORI, C. L. S. DE O.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, A. C. Influência das características da cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 123-132, 2004.

MÖTTÖNEN, K.; ALVILA, L.; PAKKANEN, T. CIELab Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. **Scandinavian Journal Forest Research**, v. 17, p. 179-191, 2002.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAMADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v. 46, p. 267-272, 2000.

PESSOA, A. M. C.; BRITO FILHO, E.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorretefi cada de *Eucalyptus grandis*, submetida ao ataque de cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 72, p. 11-16, dez. 2006.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Efeito da termorreteficação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1999. 115 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciências Florestais, ESALQ-USP, Piracicaba, 1999.

PINHEIRO, A.L., et al. Ecologia, Silvicultura e Tecnologia de Utilização dos Mogno-Africanos (*Khaya* spp.). Viçosa: 2011, 99p.

SHELDON, S.; GARDNER, D. Dynamic adhesive wettability of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1, p. 58–68, 2001.

TSOUMIS, G. **Wood as raw material**. Nancy, 1968. 276p.

VERGARA, A.J.B. Aproximación hacia um manejo integrado Del barrenador de lãs meliaceas, *Hypsipylagrandella* (ZELLER). **Revista Florestal Venezolana**, v.41, n.1, p. 23-28, 1997.

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. **Industrial & Engineering Chemistry**, v.28, n.8, p.988-994, 1936.

## ANEXO

**Tabela 12.** Análise de variância a 5% de significância para o pigmento cromático amarelo b\*.

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Probabilidade
Intercepto	48760,00	1	48760,00	13000,45	0,000000
Temperatura	49,28	3	16,43	4,38	0,005658
Vapor	9,74	2	4,87	1,30	0,276525
Temperatura*vapor	52,26	6	8,71	2,32	0,036497
Resíduo	495,08	132	3,75		

**Tabela 13.** Análise de variância a 5% de significância para o ângulo final (tempo de zero segundo).

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Probabilidade
Intercepto	471980,4	1	471980,4	10765,25	0,000000
Temperatura	901,0	3	300,3	6,85	0,000907
Vapor	17,8	2	8,9	0,20	0,817631
Temperatura*vapor	302,8	6	50,5	1,15	0,353662
Resíduo	1578,3	36	43,8		

**Tabela 14.** Análise de variância a 5% de significância para BD final (tempo de 120 segundos).

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Probabilidade
Intercepto	564,1871	1	564,1871	6935,345	0,000000
Temperatura	1,6113	3	0,5371	6,602	0,001139
Vapor	0,0309	2	0,0155	0,190	0,827645
Temperatura*vapor	0,2733	6	0,0455	0,560	0,759106
Resíduo	2,9286	36	0,0813		