



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

FÁBIO PEREIRA DOS ANJOS

**EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE TRÊS ESPÉCIES MADEIREIRAS DA
AMAZÔNIA**

BELÉM

2014



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

FÁBIO PEREIRA DOS ANJOS

**EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE TRÊS ESPÉCIES MADEIREIRAS DA
AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Mestrado em Ciências Florestais na área de concentração de manejo de ecossistemas e bacias hidrográficas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Adriano Marlisom Leão de Sousa
Co-orientador: Alcir Tadeu de Oliveira Brandão

BELÉM

2014

Anjos, Fábio Pereira dos

Efeitos da termorretificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia / Fábio Pereira dos Anjos. - Belém, 2014.

66 f.; il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2014.

1. Madeira 2. Tratamento térmico 3. Higroscopicidade 4. Perda de Massa 5. Estabilidade dimensional. I. Título

CDD – 674.38



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

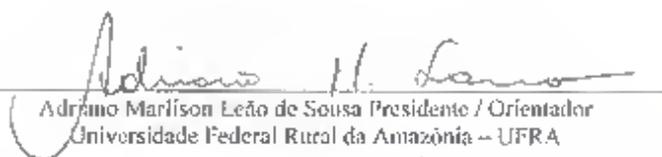
FÁBIO PEREIRA DOS ANJOS

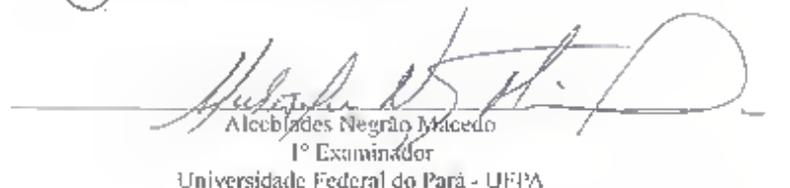
**EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE TRÊS ESPÉCIES MADEIREIRAS DA
AMAZÔNIA**

Dissertação Apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Mestrado em Ciências Florestais, na área de concentração de Manejo de Ecossistemas e Bacias Hidrográficas, para obtenção do título de Mestre.

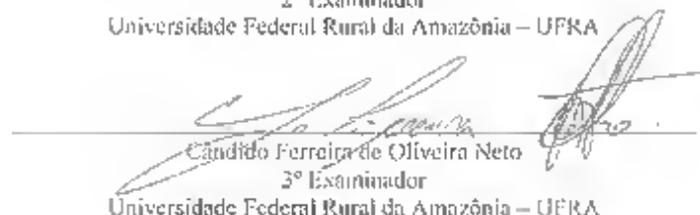
Aprovado em 14 de Março de 2014

BANCA EXAMINADORA


Adriano Marlison Leão de Sousa Presidente / Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA


Alcebades Negrão Macedo
1º Examinador
Universidade Federal do Pará - UFPA


Rodrigo Silva do Vale
2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA


Cândido Ferreira de Oliveira Neto
3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, Cleyziane dos Anjos, esposa e amiga, Israel dos Anjos e Fábio dos Anjos Filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, que permitiu ao Senhor Jesus que morresse na cruz por nossos pecados para que hoje viéssemos ter a nossa salvação.

Ao Senhor Jesus que, no Getsêmani, orou com sua alma angustiada, mesmo sabendo de sua morte, mas nem por isso desistiu de nós.

E pelo Seu precioso sangue que foi derramado na cruz do calvário, por ele somos salvos e perdoados até o dia da volta de Jesus, amém.

Aos meus pais, Américo Lopes dos Anjos e Dircyvalda Pereira dos Anjos, que me incentivaram, mesmo não tendo a mesma formação, mas sonharam juntamente comigo para que hoje todas as coisas na minha vida viessem a se cumprir.

À família dos Anjos pelo apoio, e que em meio às lutas e vitórias encontra-se sempre unida e de pé na presença de Cristo Jesus.

Ao professor Adriano Marlison Leão de Sousa, meu orientador, que foi a pessoa que me estendeu a mão e acreditou em mim nesse trabalho.

Ao Professor Alcir Tadeu Brandão pela brilhante co-orientação.

À amiga, Mayara Ribeiro de Araujo, mestranda da ESALQ-USP, que ofereceu a sua ajuda para a condução deste trabalho.

Palavra de Salvação

“Porque o mesmo Senhor descerá do céu com alarido, e com voz de arcanjo, e com a trombeta de Deus; e os que morreram em Cristo ressuscitarão primeiro. Depois nós, os que ficarmos vivos, seremos arrebatados juntamente com eles nas nuvens, a encontrar o Senhor Jesus nos ares, e assim estaremos sempre com o Senhor. Portanto, consolai-vos uns aos outros com estas palavras.”

I Tessalonicenses 4:16-18

Palavra de Cura

“Estando Jesus numa das cidades, passou um homem coberto de lepra. Quando viu Jesus, prostrou-se com o rosto em terra e rogou-lhe: "Se quiseres, podes purificar-me". Jesus estendeu a mão e tocou nele, dizendo: "Quero. Seja purificado!" E imediatamente a lepra o deixou.”

Lucas 5:12-13

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| Figura 1 - | Dimensões e orientação do corpo-de-prova (ABNT-NBR 7190/97) | 26 |
| Figura 2 - | Equipamentos utilizados para determinar peso e medições dos corpos-de-prova. Em (A) balança digital de precisão 0,01g e em (B) paquímetro digital | 26 |
| Figura 3 - | Equipamentos utilizados na calibração da sala de climatização. (A) termômetro e termo-higrometro, (B) desumidificador de ar e (C) sala de climatização com os corpos-de-prova depois de calibrada | 27 |
| Figura 4 - | Termorretificação em estufa. (A) modelo da estufa e (B) corpos-de-prova no interior da estufa | 28 |
| Figura 5 - | Corpos-de-prova no desumidificador contendo em seu interior sílica gel | 29 |
| Figura 6 - | Corpos-de-prova sendo submetidos aos ciclos de mergulho em água ... | 29 |
| Figura 7 - | Perda de massa ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação | 34 |
| Figura 8 - | Massa específica aparente ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha) | 37 |
| Figura 9 - | Valor médio de massa específica aparente de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba em condições de equilíbrio higroscópico a 12% e a 18% | 39 |
| Figura 10 - | Taxa de absorção de água ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha) | 40 |
| Figura 11 - | Inchamento volumétrico ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha) | 44 |
| Figura 12 - | Rachaduras dos corpos-de-prova ocasionada pela termorretificação. (A) e (C) Maçaranduba e (B) Pau-roxo | 44 |
| Figura 13 - | Inchamento linear, radial e tangencial ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha) | 45 |
| Figura 14 - | Curva de equilíbrio higroscópico dos corpos-de-prova de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba em sala de climatização (20° C e 65% UR). Valores médios de peso ($\chi \pm EP$) | 49 |
| Figura 15 - | Comportamento do ganho de peso dos corpos-de-prova termorretificados e testemunhas em sala de climatização a 18% de equilíbrio higroscópico | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Tabela 1 - | Combinação dos tratamentos de termorreificação | 24 |
| Tabela 2 - | Fatores avaliados e suas respectivas variáveis que competem o experimento | 28 |
| Tabela 3 - | Tipos de tratamento pelos quais passaram os corpos-de-prova estudados, bem como suas avaliações | 30 |
| Tabela 4 - | Teste de comparação de médias para os fatores espécie, temperatura e tempo | 35 |
| Tabela 5 - | Teste de comparação de média para interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo (Valores médios \pm Desvio Padrão) | 36 |
| Tabela 6 - | Teste de comparação de média para massa específica aparente a 18% do fator espécie e fator temperatura (inclui testemunha) | 38 |
| Tabela 7 - | Teste de comparação de média para massa específica aparente a 18% referente a interação dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha) (Valores médios \pm Desvio Padrão) | 38 |
| Tabela 8 - | Teste de comparação de média para taxa de absorção de água | 42 |
| Tabela 9 - | Teste de comparação de média para taxa de absorção de água referente a interação dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha) | 42 |
| Tabela 10 - | Teste de comparação de média para inchamento volumétrico, radial e tangencial dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha) | 46 |
| Tabela 11 - | Teste de comparação de média para inchamento volumétrico, radial e tangencial da interação dos fatores espécie x temperatura (inclui testemunha) | 47 |
| Tabela 12 - | Teste de comparação de média para a perda de umidade em pau-roxo, maçaranduba e cupiúba em sala de climatização a 12% de equilíbrio higroscópico | 50 |
| Tabela 13 - | Teste de comparação de médias do ganho de umidade para os fatores espécie, temperatura e tempo | 52 |
| Tabela 14 - | Teste de comparação de média para interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo referente ao ganho de umidade (Valores médios \pm Desvio Padrão) | 53 |
| Tabela 15 - | Teste de comparação de média para os fatores: espécie, temperatura e tempo, referente a umidade de equilíbrio (inclui testemunha) | 54 |
| Tabela 16 - | Valores de umidade de equilíbrio da interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo (Valores médios \pm Desvio Padrão) | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Resumo | 11 |
| Abstract | 12 |
| 1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 13 |
| 2. INTRODUÇÃO | 15 |
| 3. OBJETIVOS | 17 |
| 3.1. OBJETIVO GERAL | 17 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 4. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO | 17 |
| 4.1. COMPOSIÇÃO DA MADEIRA | 19 |
| 4.2. TERMORRETIFICAÇÃO | 21 |
| 5. MATERIAL E MÉTODOS | 23 |
| 5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA | 23 |
| 5.2. MODELO MATEMÁTICO | 24 |
| 5.3. COLETA DE DADOS | 25 |
| 5.4. AMOSTRAGEM E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA | 25 |
| 5.5. ENSAIOS DE TERMORRETIFICAÇÃO | 27 |
| 5.6. VARIÁVEIS A SEREM ANALISADAS | 30 |
| 5.6.1. Perda de massa | 30 |
| 5.6.2. Massa específica aparente | 31 |
| 5.6.3. Taxa de absorção de água | 32 |
| 5.6.4. Inchamento volumétrico e inchamento linear (tangencial e radial) | 32 |
| 5.6.5. Equilíbrio higroscópico | 32 |
| 5.6.6. Umidade de equilíbrio | 33 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 6.1. PERDA DE MASSA | 34 |
| 6.2. MASSA ESPECÍFICA APARENTE | 37 |
| 6.3. TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA | 40 |
| 6.4. INCHAMENTO VOLUMÉTRICO E INCHAMENTO LINEAR (RADIAL E TANGENCIAL) | 43 |
| 6.5. EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E UMIDADE DE EQUILÍBRIO | 48 |
| 7. CONCLUSÃO | 56 |
| 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 56 |
| REFERÊNCIAS | 58 |
| APÊNDICE | 64 |

EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE TRÊS ESPÉCIES MADEIREIRAS DA AMAZÔNIA

Resumo

A termorretificação ou madeira termo tratada é o aquecimento aplicado à madeira, sendo considerada uma importante alternativa em substituição aos tratamentos químicos dispensados ao material por parte da indústria que dela se beneficia. Essa técnica tem se tornado uma escolha ecológica no tratamento de madeiras utilizadas para os mais diversos fins, tais como: pisos, móveis, lambris, assoalhos, acabamento de interiores, dentre outros. O objetivo desta pesquisa foi submeter espécies madeireiras ao tratamento térmico tendo como principal intuito colaborar, através de técnicas mais econômicas, com o setor madeireiro. O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF), localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no campus de Belém/PA. Foram aplicadas temperaturas de 140 °C, 160 °C e 180 °C, em dois tempos de aplicação 1h30min e 3h de duração nas espécies de maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.), pau-roxo (*Peltogyne recifensis* Ducke) e cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.). Foram utilizados, para o referido experimento, corpos-de-prova das três espécies citadas nas dimensões de 2 x 3 x 5cm e estabelecidos 05 para cada tratamento, totalizando 105 amostras, sendo 35 de cada espécie, subdivididas entre os tratamentos. Dessa forma, 90 corpos-de-prova foram termorretificados e 15 serviram como testemunha. Antes de termorretificá-las, as amostras foram submetidas a uma sala de climatização com temperatura atingindo 20 °C e umidade relativa (UR) de 65% para calibração em 12% de umidade de equilíbrio higroscópico. Após o processo de termorretificação, as amostras retornaram à sala, agora com calibração de 25 °C e UR de 85% e 18% de equilíbrio higroscópico para fins de ganho de umidade. Das espécies em questão, a cupiúba se comportou melhor em perda e ganho de umidade quando submetida à sala de climatização também no ciclo de mergulho quando foram saturadas, porém a maçaranduba apresentou variação em sua estrutura. Observou-se que a perda de massa foi acentuada nas espécies de pau-roxo e cupiúba na maior parte dos tratamentos, a maçaranduba apresentou maior perda de massa em relação às demais quando aplicada a temperatura de 180 °C por 3h. Os fatores espécie, temperatura e tempo e a interação entre eles influenciou significativamente na perda de massa ao nível de 1% de probabilidade. O pau-roxo e a cupiúba se mostraram estatisticamente iguais, apresentando maiores valores de média (9,57 e 9,88%), divergindo da maçaranduba que perdeu menos massa (6,84%). Para comparação das médias entre os tratamentos, aplicou-se o teste Tukey e as três espécies apresentaram diferença estatística entre si, sendo que a maçaranduba apresentou maior valor de média com massa específica aparente a 18% de 1,01 g/cm³, seguida do pau-roxo (0,86 g/cm³) e cupiúba (0,83 g/cm³). Referente aos valores da taxa de absorção de água, verificou-se diferença estatística considerável entre as espécies, a cupiúba apresentou maior valor de média (45,38%) seguida do pau-roxo (34,88%) e da maçaranduba (16,25%), respectivamente.

Palavras-chave: Madeira, Tratamento Térmico, Higroscopicidade, Perda de Massa, Estabilidade Dimensional.

EFFECTS OF THE THERMO RECTIFICATION IN PHYSICAL PROPERTIES IN THREE WOOD SPECIES OF AMAZONIA

Abstract

The thermal retification or wood thermally treated is the heating applied to the wood and is considered an important alternative to replacing chemical treatments provided by industry that benefits from wood. This technique has become an ecological choice in the treatment of wood used for various purposes, such as flooring, furniture, paneling, interior finishing, among others. The objective of this research was subjugate timber species to thermal treatment whose main purpose collaborate through more economic techniques to the timber industry. The experiment was conducted at the Laboratory of Forest Products Technology (LFPT), located at the Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) at the Belém / PA campus. Temperatures of 140 °C, 160 °C and 180 °C were applied and divided into two time intervals, 1h30min and 3h duration, in *maçaranduba* species (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.), *pau-roxo* (*Peltogyne recifencis* Ducke) and *cupiúba* (*Goupia glabra* Aubl.). Were used for this experiment body-specimens the three species cited in the dimensions of 2 x 3 x 5cm, were established 05 for each treatment, totaling 105 samples, with 35 of each species, divided among treatments. Thus, 90 body-specimens were thermally rectified and 15 served as witnesses. Before of thermal-rectify the samples, they were subjected to a acclimatized room with temperature reaching 20°C and relative humidity (RH) of 65% for calibration at 12% moisture content of hygroscopic equilibrium. After process of the thermal rectification, the samples returned to room, now with calibration at 25 °C and RH 85% and 18% of hygroscopic equilibrium for the moisture gain purpose. For the species in question, the *cupiúba* behaved better in loss and gain moisture when subjected to the acclimatized room. also in the dive cycle when they were saturated, but the *maçaranduba* ranged in structure. It was observed that the mass loss was most accentuated in species of *pau-roxo* and *cupiúba* in most treatments. The *maçaranduba* showed greater mass loss compared to the others when applied the temperature of 180 °C for 3h. Factors species, temperature and time and the interaction theirs significantly influenced for the mass loss at 1% probability. The *pau-roxo* and *cupiúba* were statistically equal, with higher mean values (9.57 and 9.88%), diverging from the *maçaranduba* who lost less mass (6.84%). For comparison of means between treatments, we applied the Tukey test and the three species showed statistical difference between themselves, being that *maçaranduba* showed higher value of average with specific mass apparent 18% of 1.01g/cm³, follow the *pau-roxo* (0.86g/cm³) and *cupiúba* (0.83g/cm³). Referring the values of the rate of water absorption, it was found significant statistical difference between the species, *cupiúba* showed higher mean value (45.38%) followed by *cock-purple* (34.88%) and *maçaranduba* (16, 25%), respectively.

Keywords: Wood, Heat Treatment, Hygroscopicity, Loss Mass, Dimensional Stability.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda pelo uso da madeira tem sido justificada pelas excelentes propriedades tecnológicas que possui, permitindo sua utilização de diversas maneiras, como pisos, paredes, terraços, decks, barcos, portas, janelas, móveis, instrumentos musicais, entre outros. Porém, alguns fatores são limitantes para o uso em determinados fins, trata-se da sua instabilidade dimensional, inflamabilidade, degradação devido à radiação UV, biodegradação, entre outros (ARAÚJO, 2010). Esses fatores foram culminantes para que muitos pesquisadores empregassem técnicas de melhoria das propriedades da madeira, neste caso, ainda são utilizados preservativos, pesticidas e tintas UV-absorventes, mas sabe-se que a maioria destes produtos traz prejuízos ao meio ambiente, uma vez que, em sua aplicabilidade, liberam metais pesados e outros químicos tóxicos derivados dessas substâncias e, por isso, o uso destes métodos está se tornando menos aceito frente às leis de alguns países (MOHEBBY, 2003).

A partir deste princípio, novas técnicas para melhorar as propriedades da madeira têm sido adotadas, dentre elas cita-se o tratamento térmico, embora já conhecido, é pouco estudado no Brasil, porém é bastante empregado em outros países, como os da Europa.

O tratamento térmico é considerado um método de fácil aplicabilidade e um processo de baixo custo como afirma Modes (2010), pois pode tornar o material como uma opção em substituição a madeiras tradicionais de elevado custo de aquisição (ARAÚJO, 2010). Desta forma, a termorreificação causa efeitos positivos nas propriedades da madeira, melhorando a higroscopicidade, a estabilidade dimensional e sua biorresistência (devido ao ataque de organismos xilófagos).

Para a pesquisa, foram utilizadas espécies típicas da região amazônica, tais como Pau-Roxo (*Peltogyne recifencis* Ducke), Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.) e Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.). Suas características estão descritas a seguir. (REMADE, 2013)

Pau-Roxo (*Peltogyne recifencis* Ducke)

Possui outros nomes como amarante, coataquiçaua, pau-roxo-da-terra-firme, pau-roxo-da-várzea, roxinho, roxinho-pororoca, violeta. No Brasil encontra-se presente na Amazônia, Mata Atlântica, Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia; além dos estados da Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais. (NAHUZ, 2013)

Possui ainda características sensoriais, tais como: cerne e alburno distintos pela cor, cerne roxo podendo escurecer com o tempo, alburno bege-claro, brilho moderado a

acentuado; cheiro e gosto imperceptíveis; alta densidade; é dura no que diz respeito ao corte; grã direita a irregular; textura fina a média. (NAHUZ, 2013)

Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.)

É também conhecida por Maçaranduba-verdadeira, maçaranduba-amarela, maçaranduba-de-leite, maçaranduba-mansa, maçaranduba-preta, maçaranduba-verdadeira, paraju e maparajuba. Outras espécies do gênero *Manilkara* (*M. elata*, *M. amazônica*, *M. longifolia*, *M. paraensis*, *M. bidentata*, *M. langifoliata*, *M. surinamensis*) possuem madeiras com aparência e aplicações similares. (EMBRAPA, 2004)

Dentre as árvores da região Amazônica, é uma das que atingem maior porte, frequentemente cerca de 40-50 m de altura, diâmetro entre 60 e 120 cm. Por possuir fuste reto, é geralmente aproveitável desde a base. Ocorre geralmente nas regiões de terra firme da Amazônia de até 700 m de altitude. (EMBRAPA, 2004)

Possui características específicas, tais como: cerne vermelho-escuro, grã direita, textura fina, cheiro indistinto, brilho moderado. (EMBRAPA, 2004)

A Maçaranduba é madeira muito pesada, com alta retratibilidade volumétrica e resistência mecânica de média a alta. Possuindo elevada durabilidade natural. (EMBRAPA, 2004)

Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.)

É conhecida cupiúba, cupiúba-rosa, cupiúva, cutiúba, cachaceiro, peniqueiro e perobado-norte. Ocorre em matas de terra firme em toda a região Amazônica, tanto em terrenos arenosos como argilosos. É árvore de grande porte, apresentando de 10-40m de altura e copa piramidal. O tronco retilíneo e cilíndrico pode alcançar até 130 cm de diâmetro; a base é reta a acanalada. Sua casca é fibrosa, de superfície escamosa. (SCHWENGBER; SMIDERLE, 2005)

Suas características são: cerne de coloração castanho-amarelada ou bege-clara passando a castanho-avermelhada. Textura média a grosseira, grã direita a irregular, superfície com pouco brilho. Quando verde, apresenta cheiro característico e desagradável, gosto imperceptível. (SCHWENGBER; SMIDERLE, 2005)

Possui Propriedades Físico-Mecânicas, dentre elas: a madeira é pesada e dura e apresenta retratibilidade volumétrica e resistência mecânica média e boa trabalhabilidade. Boa resistência ao apodrecimento. (SCHWENGBER; SMIDERLE, 2005)

Baseando-se em todas as informações apresentadas, e da necessidade de ampliar os estudos acerca da tecnologia da madeira, esta pesquisa tem como objetivo principal analisar o comportamento de material madeireiro de três espécies florestais da Amazônia, conduzindo a

secagem da madeira dessas espécies através de termorretrificação.

2. INTRODUÇÃO

A madeira é um importante objeto de comercialização e uso nas indústrias de móveis, na produção de pisos, portas e janelas, na construção civil, na geração de energia, na indústria de papel e celulose, entre outros produtos. A grande vantagem de se trabalhar com a madeira é o motivo de ser um produto de matéria-prima renovável, o que faz dela uma potência no que diz respeito à exportação.

Hoje a madeira tornou-se um produto com sua finitude determinada devido à grande procura pelo material e seu uso desmedido, o que tem desencadeado problemas na aquisição de matéria-prima. O aumento do consumo e da exploração predatória são fatores determinantes para a escassez e esse fator poderá acarretar, para algumas espécies, a falta de aprovação para o corte, como acontece atualmente com o mogno. Esses aspectos negativos são corrigidos ao longo do tempo com adoção de práticas de manejo florestal sustentável e técnicas de uso correto da madeira e suas tecnologias. (TAKESHITA, 2011)

O Brasil ainda possui poucos estudos técnico-científicos englobando a utilização industrial da madeira. Essas deficiências que engendram a teoria trazem consequências para as indústrias que utilizam a madeira como seu produto principal, refletindo diretamente na qualidade de seu produto final. Diferentemente, alguns países da Europa, apesar de não possuírem uma diversidade de espécies tal qual a da Amazônia, competem em aprimorar as pesquisas acerca da agregação de valores a madeira. (MODES, 2010)

O emprego de técnicas de secagem tem como objetivo a obtenção de um produto final com valor elevado em relação à madeira verde, sendo assim torna-se um importante fator para as melhorias das propriedades tecnológicas do material, isso quando realizada de forma planejada, pois aprimora suas características de trabalhabilidade. A madeira seca traz benefícios para o uso da indústria, tornando-a isenta de defeitos e imune a ataques de organismos xilófagos e promovendo estabilidade em suas dimensões pela diminuição de sua higroscopicidade, fator importante para a ocorrência de defeitos em sua estrutura. (BRITO, 2013)

Muitos dos problemas enfrentados por quem utiliza a madeira verde são causados pela alta umidade, o que torna a madeira instável em sua dimensão podendo variar sazonalmente

ou enquanto seca, estando suscetível a empenamentos, rachaduras e variações em seu tamanho e forma. Diversas empresas de mobiliaria no Brasil simplesmente não atentam para as tecnologias de secagem e sofrem com problemas no seu produto final, outras precisam exportá-las para localidades aonde a umidade relativa difere da umidade relativa de origem, propiciando defeitos e problemas futuros. (BRITO, 2013)

A higroscopicidade, troca de umidade com o ambiente, é uma das características da madeira e possui como consequência a variação dimensional, caracterizando-a como um material dimensionalmente instável. A grande preocupação é mitigar os efeitos da higroscopicidade da madeira e pensando nisso, muitos pesquisadores têm promovido estudos e métodos de secagem que possam reduzir os problemas causados pela variação dimensional. A reduzida higroscopicidade é o principal efeito que o tratamento térmico promove a madeira, pois além de perder parte de sua camada mais hidrófila – dependendo da temperatura aplicada – ocasiona menor variação dimensional de sua estrutura. (MODES, 2010)

Takeshita (2011) afirma que para amenizar a instabilidade dimensional da madeira são utilizados tratamentos térmicos para reduzir retrações e expansões.

A termorretificação – ou retificação térmica, ou tratamento térmico da madeira, ou madeira termo tratada – é um procedimento bastante simples em que são aplicadas temperaturas mais altas em relação à temperatura ambiente, objetivando criar um produto com alta durabilidade, higroscopicidade reduzida e estabilidade dimensional. Essa técnica tornou-se comum no exterior e vem sendo cada vez mais aplicada no Brasil, porém ainda são poucos os estudos relacionados à termorretificação em espécies florestais da Amazônia. (ARAÚJO, 2010)

Os efeitos da termorretificação na madeira são visíveis a partir do momento em que se aplicam temperaturas maiores a 140 °C, nesse ponto a madeira começa a sofrer modificações em relação a sua estrutura física e química. A perda de massa é uma das consequências desse processo, aonde parte dos componentes químicos da madeira, e principalmente as hemiceluloses, são diretamente afetadas. De acordo com Modes (2010) essas substâncias são os componentes que comportam os grupos OH, parte ligada diretamente à troca higroscópica.

Esse processo acompanha a perda de parte dos componentes da madeira como a celulose, a hemicelulose, a lignina e extrativos, tais perdas trazem novas características bastante atraentes para as indústrias, pois agregam valores ao seu produto final. (MODES, 2010)

Diante do exposto o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da termorretificação na higroscopicidade da madeira de três espécies de folhosas, através da avaliação de suas

propriedades físicas após tratamento térmico em estufa utilizando três temperaturas e dois tempos de aplicação.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é avaliar os efeitos da termorretificação em algumas propriedades físicas nas madeiras de Pau-roxo (*Peltogyne recifencis* Ducke), Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.) e Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) para contribuição na indústria madeireira.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Promover a estabilidade dimensional pela redução da higroscopicidade para o aproveitamento tecnológico da madeira;
- II. Analisar em que sentido a termorretificação de madeira poderá contribuir para a indústria madeireira;
- III. Demonstrar a importância do tratamento térmico no beneficiamento da madeira;
- IV. Orientar a aplicação do conhecimento de termorretificação na industrialização do material.

4. REFERÊNCIAS TEÓRICO-METODOLÓGICAS

Diversos estudos com o intuito de melhorar a eficiência produtiva de serrarias e outras indústrias correlatas têm sido desenvolvidos, visando não somente reduzir a perda e o volume dos resíduos gerados no beneficiamento, mas também chegar a produtos com padrão de qualidade para disputar o mercado exterior (BARBOSA et. al., 2001).

A madeira tem sido alvo de pesquisas acerca de seus processos e equipamentos para secagem, na tentativa de que a comercialização do material se torne cada vez mais forte não

somente no Brasil, mas também em sua exportação (JANKOWSKY, 2010).

A madeira pode ser considerada perfeitamente seca quando apresenta características específicas, tais como estar livre de defeitos visíveis, como empenamentos, rachaduras, manchas; e seu teor de umidade deve estar de acordo com a pretensão para utilização (JANKOWSKY, 2010).

Para que essa secagem obtenha a qualidade desejada é imprescindível que fatores sejam levados em consideração como, por exemplo, a temperatura, a umidade da madeira, a velocidade do ar e a umidade relativa. É importante frisar que a anisotropia também é um fator relevante para a escolha do método de secagem. (TAKESHITA, 2011)

Atualmente, a secagem da madeira, tal qual a redução de custos, é tida como um elemento de vital importância em todo o processo industrial. A qualidade dessa secagem deve atingir padrões rígidos, que tenham como objetivo final uma madeira de grande valor comercial (SEVERO, 2000)

Todos estes fatores supracitados têm grande influência sobre a taxa de secagem da madeira. Esta, por sua vez, é uma variável que fornece informações relevantes acerca do comportamento da madeira em processo de secagem. A taxa é influenciada ainda pelo tipo de método utilizado para a remoção de água da madeira (SANTINI; HASELEIN, 2001).

A saída de água é influenciada por diversas variáveis relacionadas diretamente ao material como estrutura anatômica; e da estufa, como largura da pilha, espessura dos separadores, velocidade do ar, temperatura da madeira e umidade relativa do ar (HERZBERG et al., 1985 apud SANTINI; HASELEIN, 2002).

A higroscopicidade da madeira pode ser entendida pelos inchamentos radial, tangencial e longitudinal, sendo este último insignificante. Uma redução no inchamento representa um aumento da estabilidade dimensional, que é requerido para muitos usos da madeira. Outra forma de observar a redução da higroscopicidade da madeira é pelo teor de umidade de equilíbrio (TUE), cuja redução esta ligada com a degradação dos compostos higroscópicos da madeira e conseqüentemente o aumento da estabilidade dimensional (ESTEVEZ; DOMINGOS; PEREIRA, 2008).

O tratamento térmico promove o aumento da estabilidade dimensional da madeira e a resistência a organismos xilófagos (cupins e fungos), porém em algumas espécies há uma queda na resistência e na densidade da madeira por conta da degradação da parede de hemicelulose, isso porque a termorretificação degrada as camadas sensíveis à temperatura, ocorrendo assim perda de massa (POUBEL et al., 2013).

A ocorrência dessas mudanças se dá pelo fato de que, na madeira termicamente

tratada, é ocasionada a termo degradação de seus constituintes. Dessa forma, o material obtido possui reduzida higroscopicidade pela decomposição dos grupos OH presentes nas hemiceluloses, constituintes mais hidrófilos da madeira (BRITO, 1993). As pontes de hidrogênio desses grupos são rompidas pelo aquecimento e por isso tem suas propriedades alteradas.

As madeiras com higroscopicidade alterada possuem um melhoramento em sua estabilidade pelo reduzido poder de ganho de água de capilaridade, fazendo com que a peça obtenha um custo mais elevado para o mercado, pois tratada de forma correta ela torna-se isenta de defeitos e ainda tem sua durabilidade melhorada. (TAKESHITA, 2011)

4.1. COMPOSIÇÃO DA MADEIRA

A madeira apresenta grande variabilidade em suas propriedades, por isso é considerada como uma estrutura biologicamente complexa, na qual estão inseridos diferentes tipos de células que trabalham em conjunto para manutenção das necessidades da planta (WIEDENHOEFT, 2010).

A estrutura da madeira pode ser compreendida pela organização de suas células e pela composição química das substâncias presentes na parede celular, as quais possuem produtos bioquímicos armazenados no corpo das plantas (MOREY, 1980).

No processo de formação da estrutura da madeira, é importante observar os componentes que fazem parte de sua composição. A madeira é formada por três elementos principais, inseridos nas paredes primária e secundária das células vegetais: celulose, hemicelulose e lignina, sendo os dois primeiros polissacarídeos e o último um polímero aromático (MOREY, 1980).

No processo de construção, a lamela média, que uni as células umas as outras, surge como uma primeira membrana após a divisão celular e sobre ela se acumulam as microfibrilas de celulose, localizadas no interior das células, formando então a parede primária. Já a segunda parede celular, que contém três camadas distintas S1, S2 e S3, é formada logo após o processo de diferenciação celular, onde se depositam novas microfibrilas de celulose, só então começa a lignificação que completa a formação da estrutura da madeira (BURGER e RICHTER, 1991).

Desta forma, Modes (2010) compara a celulose a um esqueleto que dá forma e estrutura à parede, juntamente com a hemicelulose. Esses, tanto a celulose quanto a hemicelulose, são aglutinados com a lignina tornando a estrutura da madeira mais estável.

A proporção entre a quantidade de celulose, hemicelulose e lignina presentes na parede celular depende da espécie vegetal e varia de camada para camada (CARVALHO et al., 2009). Porém, a celulose é o constituinte que sofre menor variação entre as espécies, podendo representar de 40 a 50% da estrutura da madeira, já a hemicelulose encontra-se em maior quantidade em madeira de folhosas e a lignina em madeiras de coníferas e vice-versa (HILL, 2006; MILLER, 1999; FENGEL; WEGENER, 2003; MORAIS et al., 2005).

A celulose é considerada um polímero com alto grau de polimerização e o mais abundante composto orgânico da natureza, sendo o principal componente da parede celular dos vegetais (MORAIS et. al., 2005). Encontra-se predominante na parede secundária em forma de fibras (SILVA, 2012).

As ligações de hidrogênio, que unem os polímeros de celulose, formam as microfibrilas, que proporcionam uma estrutura mais ordenada e cristalina, conferindo-lhe uma estabilidade térmica, culminando em menor higroscopicidade na camada de celulose (FENGEL e WEGNER, 1989). Além disso, os agrupamentos OH presentes nas celulosas, permitem a capacidade do polímero associar-se com outras moléculas.

Fengel e Wegner (1989) classificam a celulose em duas formas, a amorfa e a cristalina, sendo a primeira semelhante à hemicelulose e por esse motivo é mais sensível a elevação da temperatura, porém a combinação de calor com a água pode torná-la cristalina. Já a celulose cristalina é mais resistente e sofre alteração em sua estrutura quando submetida a temperaturas maiores que 300 °C.

A hemicelulose, composta por unidades de açúcares ligadas a sua cadeia principal, é chamada de polissacarídeo heterogêneo (SILVA, 2012; BATISTA, 2012). Possui características amorfas e agrupamentos hidroxilas expostos, o que a torna menos estável. Dos três componentes da madeira, este é o mais hidrófilo e sensível à ação do calor e a degradação química (CADERMARTORI, 2012).

Jeffries (1990) considera que uma das funções da hemicelulose é também proporcionar rigidez estrutural a madeira, a qual está relacionada com a estabilização das ligações entre microfibrilas e lignina, garantida pelos agrupamentos OH e pelas ramificações de açúcar das hemicelulosas. Porém, o mesmo autor afirma que esses agrupamentos e ramificações tornam a hemicelulose mais vulnerável a radicais livres.

A lignina, componente que difere a madeira dos demais materiais celulósicos da natureza, é um carboidrato que confere rigidez e resistência mecânica a madeira (MILLER, 1999). Trata-se de um polímero de natureza predominantemente aromática e altamente amorfa, que se deposita nas paredes celulares e na lamela média (HILL, 2006; TSOUMIS,

1991). Marcelo (2007) afirma que esta macromolécula representa o componente mais hidrofóbico da madeira, sendo também considerado um material cimentante ou adesivo entre as células atribuindo rigidez e dureza à parede celular. Para Soratto (2012), a lignina é o componente mais estável da madeira, também sensível ao calor, porém não menos que a hemicelulose.

Além de celulose, hemicelulose e lignina, também são encontrados na madeira os componentes orgânicos e inorgânicos que assumem papel relevante em sua composição. Os componentes orgânicos são os extrativos da madeira, representados por substâncias extracelulares de baixo peso molecular, geralmente representam menos de 10% da massa seca da madeira (BATISTA, 2012). Essas pequenas moléculas contribuem na acepção de cor, odor, densidade, higroscopicidade e inflamabilidade da madeira, além de exercerem função de defesa contra a demanda biológica (SILVA, 2012; SORATTO, 2012).

4.2. TERMORRETIFICAÇÃO

O tratamento térmico, termorretificação, retificação térmica ou madeira termo tratada, denominações citadas por Araújo (2010), é o aquecimento aplicado à madeira e pode ser considerada uma alternativa em substituição aos tratamentos químicos. Syrjanen (2001) afirma que essa técnica tem se tornado uma escolha ecológica no tratamento da madeira, quando se pretende utilizá-la para diversos fins como pisos, móveis, lambris, assoalhos, acabamento de interiores, etc.

A melhoria nas propriedades da madeira, quando tratada termicamente, tem incentivado a comercialização de produtos derivados deste material, principalmente a partir da década de 1990 (BATISTA, 2012). Além disso, outros fatores estão contribuindo para este crescimento contínuo, trata-se da escassez de madeiras duráveis e da procura por materiais renováveis e que requeiram o desenvolvimento sustentável, sobretudo pelas pressões ambientais, no que se refere aos produtos tóxicos (XIE et. al., 2002; ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Vários conceitos são dirigidos à modificação térmica da madeira. Para Griebeler (2013), essa mudança consiste na aplicação de calor a certa temperatura, por determinado período de tempo, dependendo da utilização final da madeira com intenção de melhorar suas propriedades.

Brito (et. al., 2006) relata que a termorretificação é um processo em que a madeira é submetida a baixas temperaturas capazes de promover o início da degradação de seus

componentes químicos, entre os principais está a hemicelulose por ser mais sensível ao calor. É importante frisar que o autor considera as temperaturas entre 120 °C e 200 °C baixas em relação a certos tratamentos térmicos que a madeira é submetida, considerando sua capacidade de estabilização.

Batista (2012) defende que a termorreificação é realizada quando se utilizam temperaturas entre 140 e 260 °C com objetivo de modificar a estrutura química da madeira. O mesmo autor afirma que o emprego de temperaturas menores nas madeiras é considerado secagem artificial, e de temperaturas maiores é considerado torrefação, uma vez que quando aplicadas temperaturas inferiores a 140 °C a madeira sofre apenas pequenas alterações, enquanto que em temperaturas superiores a 260 °C as alterações são incabíveis, tornando a madeira inviável para muitos fins (FORINTEK, 2003; HILL, 2006). Por esse motivo, um dos principais objetivos do processo de termorreificação é encontrar padrões de temperatura que melhor se adéquem as espécies estudadas.

Pessoa (et. al., 2006), também afirma que o processo de retificação térmica ou termorreificação é aquele conduzido nas temperaturas inferiores àquelas usadas na torrefação, porém destaca que a torrefação ocorre na faixa de temperatura entre 200 e 280 °C, diferente do exposto por Batista (2012).

Silva (2011) relata que, geralmente, o processo de termorreificação que mantém a qualidade da madeira para uso estrutural ocorre entre as temperaturas de 120 a 280 °C, temperaturas menores que 120 °C são consideradas apenas como uma secagem alta, e maiores de que 280 °C são denominadas de torrefação.

A termorreificação é considerada um método antigo utilizado para melhorar as propriedades da madeira. Cademartori (2012) afirma que os primeiros estudos científicos sucederam na Alemanha por volta de 1930 por Stamm e Hansen. Anos depois, em 1940 estudos começaram a ser realizado nos Estados Unidos pelo pesquisador White (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003). Stamm, Burr e Kline (1946) chamaram de “Staybwood”, que significa madeira estável, o processo em que a madeira não prensada atinge estabilidade dimensional apenas com o calor, sendo desta forma que se desenvolveram os primeiros estudos para melhorar a estabilidade dimensional da madeira utilizando altas temperaturas (GRIEBELER, 2013).

No Brasil ainda são poucas as pesquisas com termorreificação, só a partir da década de 1980 o tema começou a ser discutido em revistas e congressos científicos brasileiros pelos poucos pesquisadores da área (BATISTA, 2012). Brito (1993) publicou o primeiro trabalho sobre a termorreificação da madeira no país, em que usou *Eucalyptus saligna* como base de

estudo, apresentando resultados do tratamento térmico sobre diversas propriedades como redução de massa, alteração da densidade, composição química e capacidade de retração volumétrica. Pincelli (1999) foi o primeiro a desenvolver uma dissertação de mestrado sobre o tema, em que o mesmo avaliou as alterações nas propriedades de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* quando aquecidas em estufa à temperaturas entre 120 e 180 °C.

A partir destes estudos diversos trabalhos têm sido realizados no Brasil, cita-se Griebeler (2013), Brito (2013), Xavier (2013), Batista (2012), Cademartori (2012), Soratto (2012), Poubel (2011), Modes (2010), Araújo (2010) entre outros, empregando-se metodologias diferentes para o tratamento térmico de madeiras, porém com o mesmo objetivo de melhorar as propriedades da madeira e torná-la de melhor qualidade para diversos usos.

5. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF), da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém/PA.

5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

No experimento adotou-se Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado com Arranjo Fatorial 3 x 3 x 2 com 05 repetições, onde se avaliou o efeito de 03 temperaturas aplicadas a 02 tempos de termorretificação sobre 03 espécies de madeira. Totalizando 18 tratamentos.

O efeito dos tratamentos foi avaliado através de análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo analisados com o software Assistat 7.7 beta.

A combinação dos tratamentos de termorretificação, bem como os números de corpos-de-prova utilizados em cada um encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 – Combinação dos tratamentos de termorretificação.

| Fatores | | | Repetições | | | | | Nº Corpos-de-prova |
|---------|---------|---------|------------|----|-----|----|---|--------------------|
| Fator A | Fator B | Fator C | I | II | III | IV | V | |

| | | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|--|--|--|--|--|--|---|
| a ₁ | b ₁ | c ₁ | a ₁ b ₁ c ₁ | 5 | |
| | | c ₂ | a ₁ b ₁ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₁ b ₁ c ₃ | 5 |
| | b ₂ | c ₁ | a ₁ b ₂ c ₁ | 5 |
| | | c ₂ | a ₁ b ₂ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₁ b ₂ c ₃ | 5 |
| a ₂ | b ₁ | c ₁ | a ₂ b ₁ c ₁ | 5 | |
| | | c ₂ | a ₂ b ₁ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₂ b ₁ c ₃ | 5 |
| | b ₂ | c ₁ | a ₂ b ₂ c ₁ | 5 |
| | | c ₂ | a ₂ b ₂ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₂ b ₂ c ₃ | 5 |
| a ₃ | b ₁ | c ₁ | a ₃ b ₁ c ₁ | 5 | |
| | | c ₂ | a ₃ b ₁ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₃ b ₁ c ₃ | 5 |
| | b ₂ | c ₁ | a ₃ b ₂ c ₁ | 5 |
| | | c ₂ | a ₃ b ₂ c ₂ | 5 |
| | | c ₃ | a ₃ b ₂ c ₃ | 5 |
| Total de corpos-de-prova termorretificados | | | | | | | | 90 | |

NOTAS: Em que: o fator A representa a temperatura (a₁ = 140°C; b₂ = 160°C e b₃ = 140°C), o fator B equivale aos tempos de termorretificação (b₁ = 1 hora e 30 min. e b₂ = 3 horas) e o fator representa as espécies (c₁ = pau-roxo, c₂ = maçaranduba e c₃ cupiúba).

5.2. MODELO MATEMÁTICO

O Modelo Matemático foi inspirado no trabalho para apoio didático de Riboldi (2001).

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + A_i*B_j + A_i*C_k + B_j*C_k + A_i*B_j*C_k + \varepsilon_{ijkl}$$

Onde:

A_i = Temperatura

B_j = Tempo de aplicação

C_k = Espécies

Y_{ij} = valor da variável testada sob o i -ésimo nível do fator A e j -ésimo nível do fator B

μ = média geral do experimento para a variável

A_i = efeito do i -ésimo nível do fator A

B_j = efeito do j -ésimo nível do fator B

C_k = efeito do k -ésimo nível do fator C

A_i*B_j = efeito da interação A e B

A_i*C_k = efeito da interação A e C

B_j*C_k = efeito da interação B e C

$A_i*B_j*C_k$ = efeito da interação A, B e C

ε_{ijkl} = erro aleatório

5.3. COLETA DE DADOS

Para a realização do estudo foram utilizadas três espécies de madeira, típicas da região amazônica: Pau-roxo (*Peltogyne recifencis* Ducke), Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand.) e Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.).

A escolha das espécies baseou-se no fato de serem facilmente encontradas na Amazônia por conta de sua abundância, são madeiras bastante utilizadas comercialmente na região e têm potencial no mercado nacional, além de estarem disponíveis para a realização do estudo.

As espécies foram obtidas junto à empresa Jean David Sales Rodrigues – Madeiras, localizada no município de Benevides – Pará, Avenida Martinho Monteiro s/nº, Murinim, coordenadas geográficas de 01°15'52" S e 48°19'39,40" W.

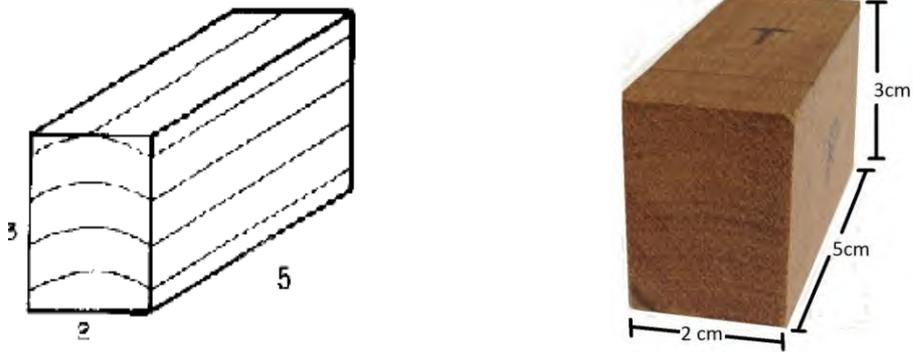
5.4. AMOSTRAGEM E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA

Dos lotes de madeira, foram escolhidas toras recém serradas de cada espécie, de onde foram cortadas peças da região do cerne na disposição transversal em relação aos raios, as mesmas encontravam-se em bom estado de conservação, isentas de rachaduras ou defeitos para preparo dos corpos-de-prova. Após a escolha, as peças foram levadas para a serraria da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) para serem serradas.

Na serraria da UFRA procedeu-se o corte dos corpos-de-prova, retirando-os de regiões afastadas das extremidades das peças com no mínimo de 30 cm de cada lado, para cada espécie foram retirados corpos-de-prova de uma única peça de madeira. Foram adotadas as dimensões de 2,0cm de largura, 3,0cm de altura e 5,0cm de comprimento, ao longo das fibras e com orientação dos anéis de crescimento perpendicular a altura, como prevista na ABNT-NBR 7190/97 (figura 1).

Em seguida, foram separados por espécie e acondicionados em sacos plásticos e levados até o laboratório para os procedimentos de pesagem e medição de sua dimensão.

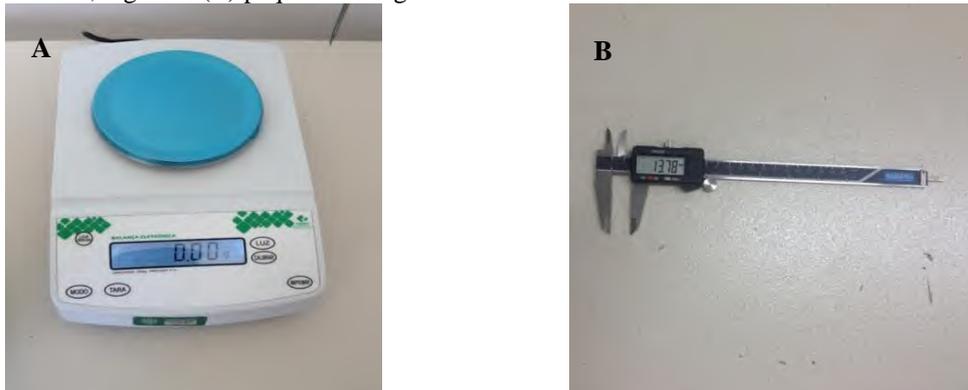
Figura 1 – Dimensões e orientação do corpo-de-prova (ABNT-NBR 7190/97).



FONTE: o próprio autor.

Imediatamente após o corte, os corpos-de-prova foram pesados com auxílio de uma balança digital de semi-precisão de 0,01g e medidos em direção longitudinal, tangencial e radial com um paquímetro digital (figura 2), estando os mesmos já referenciados.

Figura 2 – Equipamentos utilizados para determinar peso e medições dos corpos-de-prova. Em (A) balança digital de precisão 0,01g e em (B) paquímetro digital.



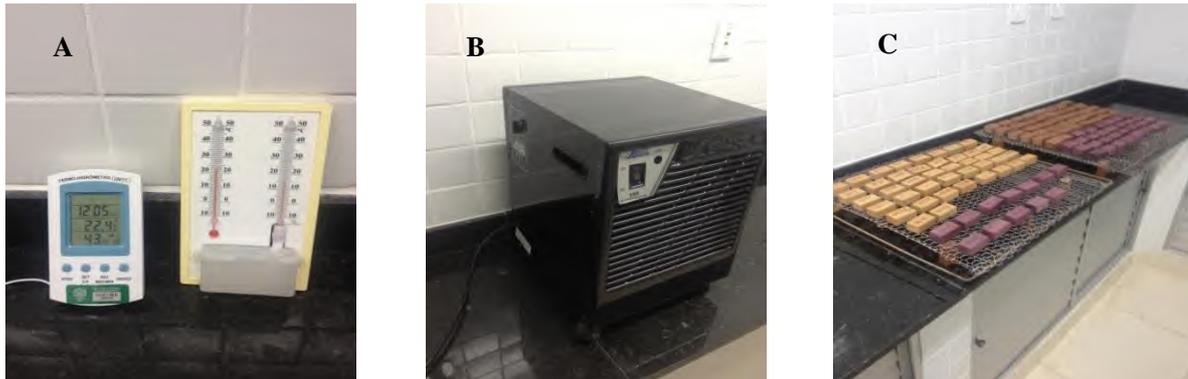
FONTE: o próprio autor.

Para o início do trabalho, foi necessário que os corpos-de-prova estivessem com umidade de equilíbrio entre 12% a 15%. Desta forma, estimou-se a umidade inicial de cada espécie tomando como base alguns corpos-de-prova denominados de testes, os mesmos foram levados para secagem em estufa à $103^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ até atingirem peso constante, e posteriormente foi determinado o teor de umidade apresentando valores médios em torno de $13,72\% \pm 0,08\%$ para o pau-roxo, $14,92\% \pm 0,24\%$ para a maçaranduba e $32,1\% \pm 1,9\%$ para cupiúba.

Pelo fato de alguns corpos-de-prova encontrarem-se com umidade de equilíbrio alta, principalmente a cupiúba, foi necessário submetê-los a sala de climatização até que atingissem umidade de equilíbrio de 12% a 15%. Neste procedimento, a sala de climatização do laboratório precisou ser calibrada, para isso foi utilizado o software *Air Humide Et*

Équilibre Du Bois, disponível no site do LTPF, que determina os parâmetros físicos do ar relacionados a secagem da madeira e com auxílio de alguns equipamentos como termômetro, termo-higrômetro e desumidificador de ar, foi possível realizar a calibração tendo como base a temperatura e umidade relativa da sala (figura 3).

Figura 3 – Equipamentos utilizados na calibração da sala de climatização. (A) termômetro e termo-higrometro, (B) desumidificador de ar e (C) sala de climatização com os corpos-de-prova depois de calibrada.



FONTE: o próprio autor.

Após a calibração, todos os corpos-de-prova das espécies foram colocados na sala de climatização em temperatura de aproximadamente 20 °C e 65% de umidade relativa (UR), proporcionando equilíbrio higroscópico de 12%. O acesso a sala ficou restrito para evitar consideráveis variações.

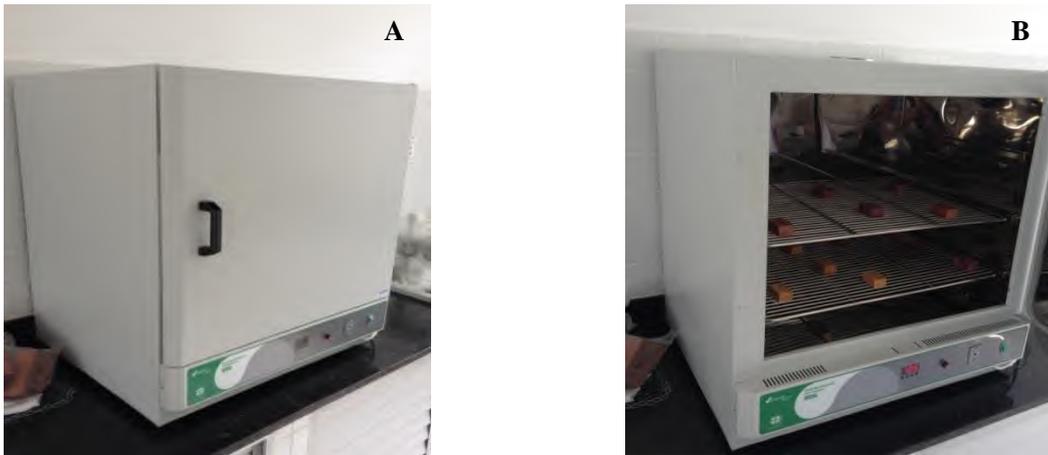
A cada 6 horas foi realizada a coleta de dados de temperatura da sala, bulbo úmido e bulbo seco, sendo os mesmos locados no software *Air Humide Et Équilibre Du Bois* para monitoramento da umidade de equilíbrio. A cada 24 horas os corpos-de-prova foram pesados até atingirem peso constante, haja vista que precisavam adquirir a umidade desejada para o início dos tratamentos de termorretificação.

Alcançando a umidade desejada, foram realizadas as pesagens e medições longitudinal, tangencial e radial dos corpos-de-prova, seguidas do processo de termorretificação. As testemunhas de todas as espécies pesquisadas permaneceram na sala de climatização com observações diárias de peso até o final do processo.

5.5. ENSAIOS DE TERMORRETIFICAÇÃO

A termorretificação dos corpos-de-prova foi realizada em estufa com capacidade para 150L e aquecimento máximo de até 200 °C (figura 4).

Figura 4 – Termorretificação em estufa. (A) modelo da estufa e (B) corpos-de-prova no interior da estufa.



FONTE: o próprio autor.

A escolha das temperaturas foi baseada em estudos realizados no Brasil, em que os tratamentos térmicos aplicados tiveram temperaturas variando entre 120 °C a 220 °C (MODES, 2010; ARAÚJO, 2010; SORATTO, 2012; CADEMARTORI et al., 2012).

No experimento foram avaliadas as combinações entre três fatores: temperatura, tempo de termorretificação e espécie madeireira, exemplificado na tabela 2.

Tabela 2 - Fatores avaliados e suas respectivas variáveis que competem o experimento.

| Fatores | Variáveis |
|-----------------------|---|
| Fator A (Temperatura) | a ₁ = 140 °C a ₂ = 160 °C a ₃ = 180 °C |
| Fator B (Tempo) | b ₁ = 1 hora e 30 min. b ₂ = 3 horas |
| Fator C (Espécies) | c ₁ = Pau-roxo c ₂ = Maçaranduba c ₃ = Cupiúba |

Os corpos-de-prova foram submetidos a temperaturas de 140, 160 e 180 °C com tempos de tratamento de 1h30 e 3h, contados do momento em que a estufa atingiu o patamar desejado. Ao final de cada termorretificação houve a realização imediata das medições e pesagens dos corpos-de-prova e, para que não houvesse ganho de umidade, os mesmos foram colocados em desumidificador contendo em seu interior sílica gel (figura 5).

Figura 5 - Corpos-de-prova no desumidificador contendo em seu interior sílica gel.



FONTE: o próprio autor.

A partir de então, iniciou-se a fase de condicionamento higroscópico, em que os corpos-de-prova foram encaminhados novamente até a sala de climatização para resfriamento e ganho de umidade, porém com nova calibração em temperatura de 26 °C e umidade relativa de 85%, dispensando o uso do desumificador, pois não houve necessidade de retirar a umidade da sala. Neste ambiente foi possível obter 18% de equilíbrio higroscópico.

Diariamente, os corpos-de-prova foram pesados até atingir peso constante, sendo possível obter uma curva de reumificação do material até a umidade de equilíbrio, neste patamar novas medições e pesagens foram realizadas.

Finalizando a fase de ganho de umidade em sala de climatização, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios para determinar algumas variáveis relacionadas à estabilidade dimensional, neste caso tomou-se como base a norma NBR-7190 (ABNT, 1997). O material passou por ciclo de mergulho em água e secagem em estufa à 103° C ± 2° C (figura 6).

Figura 6 - Corpos-de-prova sendo submetidos aos ciclos de mergulho em água.



FONTE: o próprio autor.

As testemunhas, mesmo não recebendo nenhum tratamento térmico, também foram analisadas para fins de comparação dentro de cada espécie em estudo sendo por tanto, realizadas suas medições e pesagens em todas as fases do experimento concorrendo para os resultados de algumas variáveis analisadas.

Os resultados permitiram analisar os tratamentos para cada espécie de madeira conforme descrito na tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de tratamento pelos quais passaram os corpos-de-prova de cada espécie em estudo.

| TRATAMENTOS | TEMPERATURA | TEMPO |
|-------------|---|------------------------|
| T1 | Testemunha (madeira não termorretificada) | - |
| T2 | Madeira termorretificada a 140 °C | Por um período de 1h30 |
| T3 | Madeira termorretificada a 140 °C | Por um período de 3h |
| T4 | Madeira termorretificada a 160 °C | Por um período de 1h30 |
| T5 | Madeira termorretificada a 160 °C | Por um período de 3h |
| T6 | Madeira termorretificada a 180 °C | Por um período de 1h30 |
| T7 | Madeira termorretificada a 180 °C | Por um período de 3h |

Foram estabelecidos cinco corpos-de-prova para cada tratamento descrito na tabela 3. No total foram utilizados 105 corpos-de-prova, sendo 35 de cada espécie, subdivididas entre os tratamentos. Logo, 90 corpos-de-prova passaram por termorretificação e 15 serviram como testemunha (cinco de cada espécie).

5.6. VARIÁVEIS A SEREM ANALISADAS

Após a estabilização dos corpos-de-prova na sala de climatização, foram determinadas as propriedades de cada espécie seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR-7190 (ABNT, 1997).

5.6.1. Perda de massa

A determinação da perda de massa foi realizada tendo como base o peso constante dos corpos-de-prova em sala de climatização (20°C e 65% de UR) antes da termorretificação e peso imediato após cada tratamento de termorretificação, em que foi utilizada uma balança digital de semi-precisão de 0,01g. O cálculo teve procedimento conforme a equação 1.

$$\blacktriangleright P_m = [(M_{AT} - M_{DT}) / M_{AT}] \times 100 \quad \text{Equação (1).}$$

Em que:

P_m : perda de massa (%);

M_{AT} : massa dos corpos-de-prova em equilíbrio antes da termorreificação (g);

M_{DT} : massa dos corpos-de-prova após o tratamento de termorreificação (g);

5.6.2. Massa específica aparente

A densidade aparente foi calculada em duas condições, a primeira tendo como base os valores de massa dos corpos-de-prova a 12% de umidade de equilíbrio e de volume destes nas mesmas condições, sendo este procedimento realizado logo após a estabilização dos corpos-de-prova na sala de climatização em 12% (20 °C e 65% de UR), e a segunda após termorreificação em sala de climatização a 18% de umidade de equilíbrio higroscópico (26 °C e 85% de UR). O cálculo foi realizado de acordo com a equação 2.

$$\blacktriangleright \rho_{ap} = M_{12\%}/V_{12\%} \quad \text{Equação (2).}$$

Em que:

ρ_{ap} : massa específica aparente (g/cm³);

$M_{12\%}$: massa dos corpos-de-prova a 12% de umidade (ou após termorreificação em sala de climatização a 26 °C e 85% de UR) (g);

$V_{12\%}$: volume dos corpos-de-prova com 12% de umidade (ou após termorreificação em sala de climatização a 26 °C e 85% de UR) (cm³).

Para analisar algumas variáveis relacionadas à higroscopicidade, após a etapa de termorreificação os corpos-de-prova em equilíbrio higroscópico foram imersos em água até a saturação total, inclusive as testemunhas. Desta forma, os corpos-de-prova foram saturados com água em campânula de vidro com auxílio de uma bomba à vácuo até que a quantidade de água necessária estivesse preenchido todos os espaços vazios dos corpos-de-prova, a saturação ocorreu no momento em que bolhas de ar pararam de sair no interior da campânula, nesse momento os mesmos foram considerados saturados de água.

Após a imersão, foram avaliadas as medições longitudinal, radial e tangencial, bem como realizadas as pesagens de cada corpo-de-prova. Em seguida os mesmos foram aquecidos em estufa a 103°C ± 2° C até peso constante, sendo novamente avaliadas as suas dimensões após a secagem. Através desses dados foi avaliada a taxa de absorção de água e os

índices de inchamento volumétrico e inchamento linear (tangencial e radial) por meio das seguintes fórmulas:

5.6.3. Taxa de absorção de água

$$\blacktriangleright T_{H_2O} = [(Mu - Ms)/Ms]*100 \quad \text{Equação (3).}$$

Em que:

T_{H_2O} : taxa de absorção de água (%);

Mu: massa úmida dos corpos-de-prova após a imersão em água (g);

Ms: massa seca dos corpos-de-prova após secagem em estufa à $103^\circ C \pm 2^\circ C$ (g);

5.6.4. Inchamento volumétrico e inchamento linear (tangencial e radial)

$$\blacktriangleright \Delta = [(V_{sat} - V_{seca})/V_{seca}]*100 \quad \text{Equação (4).}$$

$$\blacktriangleright \epsilon_i = [(L_{sat} - L_{seca})/L_{seca}]*100 \quad \text{Equação (5).}$$

Em que:

Δ : inchamento volumétrico (%);

V_{sat} : volume dos corpos-de-prova após imersão em água (cm³);

V_{seca} : volume dos corpos-de-prova após secagem em estufa à $103^\circ C \pm 2^\circ C$ (cm³);

ϵ_i : inchamento linear (radial e tangencial);

L_{sat} : dimensão linear (radial e tangencial) dos corpos-de-prova após imersão em água (cm);

L_{seca} : dimensão linear (radial e tangencial) dos corpos-de-prova após secagem em estufa à $103^\circ C \pm 2^\circ C$ (cm).

5.6.5. Equilíbrio higroscópico

Para verificar o equilíbrio higroscópico foi realizada a pesagem dos corpos-de-prova até peso constante, sendo este determinado para duas condições, a primeira no momento em que os corpos-de-prova foram submetidos à sala de climatização a $20^\circ C$ e 65% de umidade relativa, avaliado antes da termorretificação. E a segunda condição, quando os corpos-de-prova foram submetidos a condicionamento higroscópico em sala de climatização a $26^\circ C$ e

umidade relativa de 85%, realizada após os tratamentos de termorreificação. Dessa forma, foi possível obter a curva de perda e ganho de umidade nessas condições.

5.6.6. Umidade de equilíbrio

Foi determinada inicialmente para verificar em que umidade se encontravam os corpos-de-prova antes de entrarem em sala de climatização, pela equação 6.

$$\blacktriangleright U = [(M_c - M_0) / M_0] * 100 \quad \text{Equação (6).}$$

Em que:

U: Umidade de equilíbrio inicial dos corpos-de-prova (%);

M_c: Massa dos corpos-de-prova antes de entrarem na sala climatizada a 20° C e 65% UR(g);

M₀: Massa constante na condição de secagem em estufa a 103°C ± 2° C (g).

Durante a permanência dos corpos-de-prova em sala de climatização a 12% de equilíbrio higroscópico (antes da termorreificação) e a 18% (após termorreificação), a umidade de equilíbrio foi calculada tendo como base o peso seco estimado, conforme as equações abaixo.

$$\blacktriangleright P_{s_{est}} = (100 * P_{u_0}) / (U + 100) \quad \text{Equação (7).}$$

$$\blacktriangleright UE = [(P_u - P_{s_{est}}) / P_{s_{est}}] * 100 \quad \text{Equação (8).}$$

Em que:

P_{s_{est}}: Peso seco estimado dos corpos-de-prova (g);

P_{u₀}: Peso úmido inicial dos corpos-de-prova antes de entrarem na sala de climatização (g);

U: Umidade inicial dos corpos-de-prova calculada após secagem em estufa a 103°C ± 2° C (%);

UE: Umidade de equilíbrio (%);

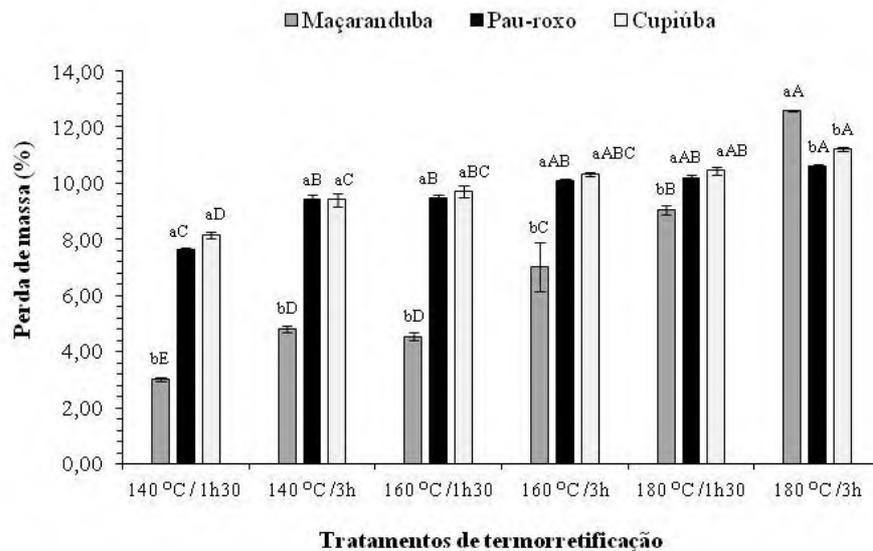
P_u: Peso úmido dos corpos-de-prova em sala de climatização antes da termorreificação ou após termorreificação (g);

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. PERDA DE MASSA

Os resultados demonstraram que a termorretificação proporcionou perda de massa nas três espécies, sendo maior quando se aplicou temperaturas mais elevadas como representado na figura 7. No geral, a perda de massa foi mais acentuada nas espécies de pau-roxo e cupiúba em quase todos os tratamentos, porém quando se aplicou temperatura de 180 °C por 3h a maçaranduba apresentou maior perda de massa em relação às demais.

Figura 7 - Perda de massa ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si.



Através da análise de variância observa-se que tanto o fator espécie, o fator temperatura, o fator tempo e a interação entre eles influenciaram significativamente na perda de massa ao nível de 1% de probabilidade, com exceção da interação do fator temperatura e tempo (apêndice A).

Utilizou-se o teste Tukey para verificar a diferença entre as médias dos tratamentos. Desta forma, a tabela 4 indica que dentre as espécies estudadas, pau-roxo e cupiúba foram estatisticamente iguais apresentando maiores valores de média, 9,57 e 9,88% respectivamente, as mesmas foram diferentes da maçaranduba que perdeu menos massa 6,84%. Para as três temperaturas testadas, verificou-se diferença estatística significativa de perda de massa, comportando-se de maneira crescente em função da temperatura, 180 °C apresentou perda de

10,67% seguida das de 160 e 140 °C. Também houve diferença estatística significativa no fator tempo, mostrando que em 3h de termorretificação as espécies perderam maior percentual de massa (9,50%) quando comparadas com o tempo de 1h30.

Tabela 4 - Teste de comparação de médias para os fatores espécie, temperatura e tempo.

| Espécie | Perda de massa (%) | Temperatura | Perda de massa (%) | Tempo | Perda de massa (%) |
|----------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| Pau-roxo | 9,57 a* | 140 °C | 7,08 c | 1h30 | 8,03 b |
| Maçaranduba | 6,84 b | 160 °C | 8,52 b | 3 h | 9,50 a |
| Cupiúba | 9,88 a | 180 °C | 10,67 a | - | |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Estes resultados já eram esperados, Silva (2012) afirma que a madeira, quando submetida a um tratamento térmico, perde massa devido à degradação de seus principais constituintes químicos como a celulose, hemicelulose e lignina. Essa perda de massa também está relacionada à diminuição da água higroscópica no interior da madeira, especificamente nas paredes celulares da mesma (BORREGA & KÄRENLAMPI, 2008).

Além disso, podemos afirmar que os corpos-de-prova submetidos à temperatura de 180 °C tiveram maiores modificações em suas propriedades, seguidas das temperaturas de 160 e 140 °C, pois as alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira ocasionadas pelo tratamento térmico tendem a influenciar de forma direta e proporcional na perda de massa do material (BAL e BECKTAS, 2012; SILVA, 2012). Portanto, quanto maior a temperatura aplicada, maior será a alteração sofrida.

Porém, mesmo havendo diferença significativa entre os tempos de aplicação, verifica-se que a maior diferença ocorre entre as temperaturas, pois estas tendem a proporcionar maiores alterações das propriedades da madeira (WINDEISEN; STROBEL; WEGNER, 2007).

Houve diferença significativa na interação entre os três fatores (espécie, temperatura e tempo), o teste Tukey constatou que a espécie cupiúba apresentou diferença estatística em todos os tratamentos, mostrando que a perda de massa foi diferente em decorrência da temperatura e do tempo de aplicação. Porém, o mesmo teste revelou que na espécie pau-roxo a perda de massa apresentou valores de média estatisticamente iguais entre a termorretificação a 140 °C por 3h e a 160 °C por 1h30, e semelhança também entre 160 °C por 3h e 180 °C por 1h30. Para a maçaranduba, a semelhança estatística ocorreu somente entre 140 °C por 3h e a 160 °C por 1h30 (tabela 5).

Tabela 5 - Teste de comparação de média para interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo (Valores médios \pm Desvio Padrão).

| Interação – Espécies x Temperatura x Tempo | | | | |
|--|-------|------------------|-----------------|-------------------|
| Temperatura | Tempo | Espécie | | |
| | | Pau-roxo | Maçaranduba | Cupiúba |
| 140 °C | 1h30 | 7,64 (0,15) aC* | 3,03 (0,16) bE | 8,17 (0,26) aD |
| | 3,0h | 9,44 (0,38) aB | 4,82 (0,27) bD | 9,42 (0,51) aC |
| 160 °C | 1h30 | 9,46 (0,35) aB | 4,53 (0,34) bD | 9,77 (0,46) aBC |
| | 3,0h | 10,09 (0,19) aAB | 7,01 (1,97) bC | 10,34 (0,14) aABC |
| 180 °C | 1h30 | 10,20 (0,26) aAB | 9,07 (0,39) bB | 10,45 (0,31) aAB |
| | 3,0h | 10,59 (0,22) bA | 12,59 (0,09) aA | 11,22 (0,16) bA |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Letras maiúsculas comparam entre as linhas e letras minúsculas comparam entre as colunas.

Dessa forma, as semelhanças encontradas no pau-roxo e na maçaranduba entre temperatura e tempo, mostram que os efeitos do maior tempo de aplicação em baixas temperaturas de termorretificação foram equivalentes aos efeitos do menor tempo em temperaturas mais elevadas.

Pesquisa realizada por Modes (2010) em *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, demonstrou que no tratamento utilizado em estufa a 160 °C durante 3h a perda de massa foi de 12,72% em *P. taeda* e 11,72% em *E. grandis*. Quando a autora testou outra forma de tratamento, chamada de combinação por usar autoclave e também estufa, não obteve valores muito diferentes dos outros, 12,88 e 11,82%, respectivamente.

Poubel (2011) em seu estudo sobre termorretificação de *Pinus caribaea* em estufa a 200 e 220 °C durante duas horas verificou perda de massa de 9,94 e 21,03% para as temperaturas testadas, respectivamente. Os valores foram maiores do que o encontrado neste estudo em função das temperaturas mais elevadas testadas pela autora.

Soratto (2012), também encontrou valores maiores em seu estudo sobre termorretificação de *Eucalyptus* sp. em três temperaturas durante 6 horas, com exceção da temperatura de 140 °C, a autora obteve perda de massa de 6,71; 11,16 e 17,34% para as temperaturas de 140, 180 e 220 °C, respectivamente.

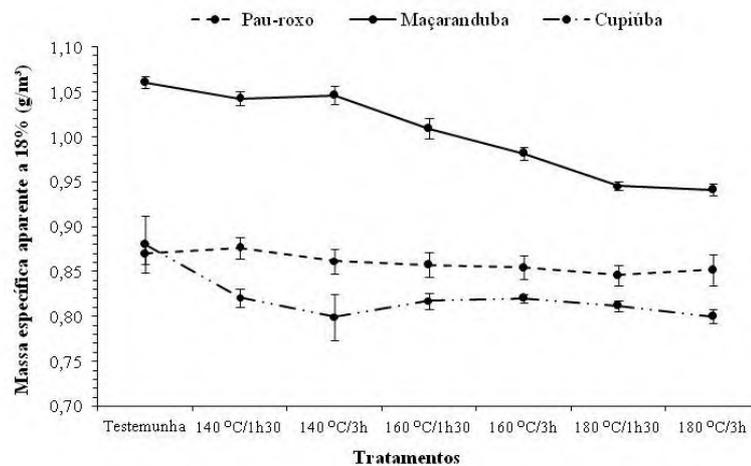
A diferença nos valores de perda de massa encontrados pelos autores pode ser explicada pelos diferentes métodos de termorretificação utilizados, das combinações entre temperatura e tempo, além do tipo de espécie madeireira estudada. Porém, com base nesses estudos, foi possível perceber que temperaturas mais elevadas promovem maiores perdas de massa.

6.2. MASSA ESPECÍFICA APARENTE

A massa específica aparente, também chamada de densidade aparente, foi determinada sobre duas condições, a primeira para os corpos-de-prova em sala climatizada a 12% de equilíbrio higroscópico (antes da termorretificação) e a segunda em sala climatizada a 18% de equilíbrio higroscópico (depois da termorretificação).

Observa-se que a massa específica aparente a 12% de equilíbrio higroscópico foi de 0,87 g/cm³ para o pau-roxo, 1,05 g/cm³ para a maçaranduba e de 0,85 g/cm³ para cupiúba. Na sala de climatização a 18% de equilíbrio higroscópico, após os corpos-de-prova terem sido termorretificados, verificou-se que os valores de massa específica aparente foram diferentes nos tratamentos quando comparados com testemunha, com exceção do pau-roxo que obteve variações desprezíveis nos valores da variável (figura 8).

Figura 8 - Massa específica aparente ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha).



Através da análise de variância dos resultados a 18% de equilíbrio higroscópico, verificou-se que o fator espécie, o fator temperatura e a interação de ambos foram significativos ao nível de 1% de probabilidade, influenciando expressivamente na massa específica aparente. Porém, o fator tempo, a interação dos fatores espécie e tempo, a interação da temperatura e tempo, e a interação entre os três fatores, foram não significativos (apêndice B).

Aplicou-se o teste Tukey para comparar as médias entre os tratamentos que foram significativos. Desta forma, a tabela 6 indica que as três espécies apresentaram diferença estatística entre si, sendo que a maçaranduba apresentou maior valor de média com massa

específica aparente a 18% de 1,01 g/cm³, seguida do pau-roxo (0,86 g/cm³) e cupiúba (0,83 g/cm³), respectivamente. No fator temperatura, 140 °C e 160 °C foram estatisticamente iguais, porém diferiram da temperatura de 180 °C.

Tabela 6 - Teste de comparação de média para massa específica aparente a 18% do fator espécie e fator temperatura (inclui testemunha).

| Espécies | ρ_{ap} 18% (g/cm ³) | Temperatura (°C) | ρ_{ap} 18% (g/cm ³) |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Pau-roxo | 0,86 b* | Testemunha | 0,93 a |
| Maçaranduba | 1,01 a | 140 | 0,91 b |
| Cupiúba | 0,83 c | 160 | 0,89 b |
| - | - | 180 | 0,87 c |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Para a interação dos fatores espécie e temperatura, o teste Tukey constatou que o pau-roxo não apresentou diferença estatística significativa entre as temperaturas de termorretificação, comportando-se de maneira semelhante à testemunha.

Os valores de massa específica entre os tratamentos térmicos também foram semelhantes para a cupiúba, diferindo estatisticamente somente da testemunha que apresentou maior valor de média para a espécie. Já para a maçaranduba foi possível observar que os valores da variável foram estatisticamente iguais entre a testemunha e a temperatura de 140 °C, porém estas diferiram estatisticamente das demais temperaturas, apresentando valores decrescentes no decorrer dos tratamentos térmicos (tabela 7). Essa diminuição tem relação com a perda de massa, pois a mesma influi no cálculo de densidade, logo a diminuição das massas específicas aparentes estão relacionadas à perda de componentes químicos da madeira quando aplicado o tratamento térmico, afirma Thiam et al. (2002).

Tabela 7 - Teste de comparação de média para massa específica aparente a 18% referente a interação dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha) (Valores médios \pm Desvio Padrão).

| Espécies | Temperatura | | | |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Testemunha | 140° C | 160° C | 180°C |
| Pau-roxo | 0,87 (0,03) bA* | 0,87 (0,03) bA | 0,85 (0,03) bA | 0,85 (0,03) bA |
| Maçaranduba | 1,06 (0,02) aA | 1,04 (0,02) aA | 1,00 (0,02) aB | 0,94 (0,01) aC |
| Cupiúba | 0,88 (0,07) bA | 0,81 (0,04) cB | 0,82 (0,01) cB | 0,80 (0,01) cB |

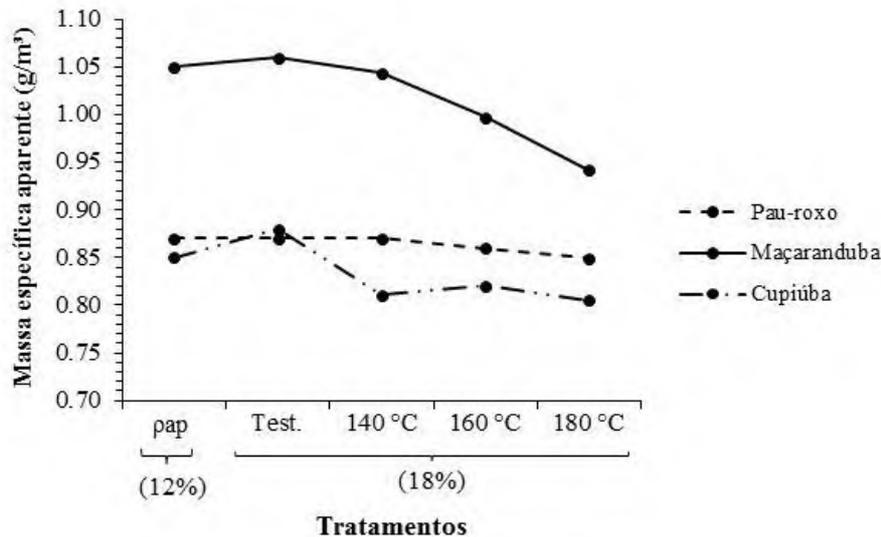
*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Letras maiúsculas comparam entre as colunas e letras minúsculas comparam entre as linhas.

Através dos valores foi possível elaborar um gráfico em que descreve a variação na massa específica dentre os tratamentos comparando com a massa específica aparente a 12% de equilíbrio higroscópico (figura 9). Os resultados demonstram que a massa específica aparente a 12% de equilíbrio higroscópico sofre alterações quando os corpos-de-prova são submetidos à sala de climatização a 18% após termorretificação, com exceção do pau-roxo

que sofreu pouca variação.

Figura 9 - Valor médio de massa específica aparente de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba em condições de equilíbrio higroscópico a 12% e a 18%.



Comparando a massa específica a 12% com as testemunhas a 18%, verifica-se um pequeno aumento da variável nas três espécies, porém quando se aplicou a termorretificação houve diminuição, sendo menor quando se aplicou temperaturas mais elevadas como demonstra a figura 9. Na maçaranduba, essa diminuição foi mais acentuada em relação às demais espécies, variando entre 1,06 e 0,94 g/cm³ dentre os tratamentos enquanto que, a cupiúba variou de 0,87 a 0,81 g/cm³ e o pau-roxo entre 0,87 e 0,85 g/cm³.

Para Cademartori (2012), a diminuição dessa variável pode estar associada a uma maior perda de massa e variação do volume dos corpos de prova termorretificados em relação às testemunhas. Do mesmo modo, as modificações na estrutura anatômica das madeiras termorretificadas influenciam diretamente na variação da massa específica. Logo, a perda de massa é um fator primordial para a alteração da densidade aparente (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Batista (2012) também afirma que a umidade influencia na densidade da madeira, bem como a perda de massa ocasionada pela diminuição dos constituintes da parede celular. Desta forma, podemos afirmar que a diminuição da quantidade de água na madeira e a degradação dos seus constituintes, principalmente hemicelulose, alteram a densidade da mesma após a termorretificação.

Além disso, muitos são os fatores capazes de influenciar na densidade da madeira, como a própria espécie, a umidade que esta se encontra, a estrutura celular, formação do

lenho, idade da madeira, quantidade e tipo de extrativos e composição química como afirma Tsoumis (1991).

Calonego (2009) também verificou a redução da massa específica aparente quando estudou *E. grandis*, após a termorretificação e em condições de 17,5% de equilíbrio higroscópico, o autor obteve valores variando de 0,489 g/cm³ na temperatura de 140 °C a 0,444 g/cm³ na temperatura de 220 °C, sendo menores que a testemunha com 0,508 g/cm³.

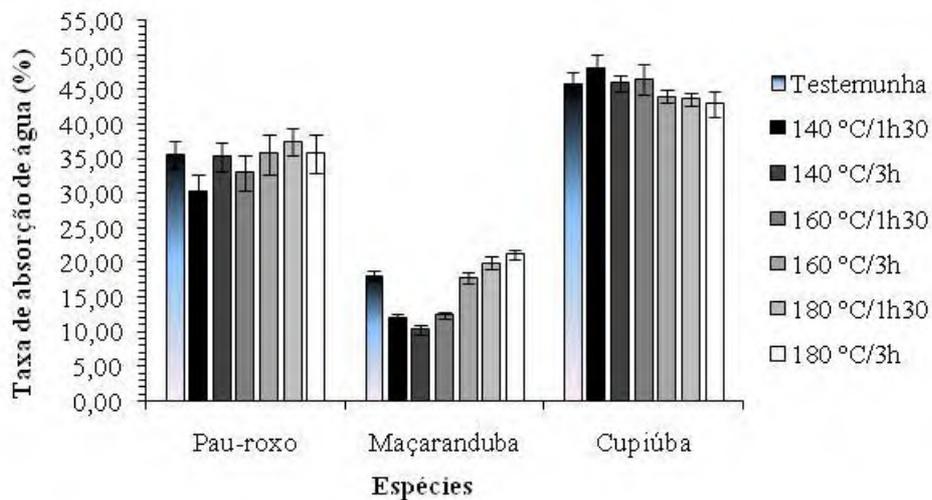
O processo de termorretificação também influenciou na diminuição da densidade a 12% no estudo realizado por Batista (2012) em *E. grandis*, em que os valores obtidos foram de 0,46, 0,46 e 0,41 g/cm³ para as termorretificadas a 140, a 160 e 180 °C, respectivamente e 0,49 para as testemunhas.

Esses resultados de diminuição na massa específica aparente em madeiras termorretificadas corroboram com este estudo, pois todos relatam que a densidade da madeira após tratamento térmico é reduzida.

6.3. TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados da taxa de absorção de água, calculadas após ciclo de mergulho para os corpos-de-prova termorretificados e também para as testemunhas, demonstram que as três espécies comportaram-se de maneira bem diferentes entre si e entre os tratamentos, como podemos observar na figura 10.

Figura 10 - Taxa de absorção de água ($\chi \pm EP$) de pau-roxo, maçaranduba e cupiúba nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha).



De acordo com a figura 10, podemos analisar que para o pau-roxo a taxa de absorção

de água apresentou valores bem diferentes entre os tratamentos, não houve grandes variações entre a temperatura de 140, 160 e 180 °C por 3h em comparação com as testemunhas. A taxa de absorção foi crescente a partir de 160 °C a 1h30 até 180 °C por 1h30, porém houve um pequeno decréscimo no valor da variável na temperatura de 180 °C por 3h em relação ao tratamento anterior. A menor taxa de absorção de água ocorreu na temperatura de 140 °C por 1h30 (30,24%).

Como observado na figura 10, o comportamento na taxa de absorção de água dentre os tratamentos na maçaranduba pode ser explicado devido à obtenção de mais espaços vazios nos corpos-de-prova termorretificados a temperaturas maiores e por isso, absorveram mais água, enquanto que nas temperaturas menores os corpos-de-prova tiveram menor taxa de absorção de água em relação às demais temperaturas.

É por essa razão que nas temperaturas de 140 °C houve diminuição na taxa de absorção de água (12,09% a 1h30 e 10,31% a 3h), a partir de então houve acréscimo contínuo até o último tratamento em maçaranduba, apresentando valores de 12,42; 17,94; 19,95 e 21,19% para 160 °C/1h30, 160 °C/3h, 180 °C/1h30 e 180 °C/3h, respectivamente. No caso das testemunhas, que obtiveram taxa de absorção maior que as temperaturas de 140 e 160 °C, pode-se afirmar que o valor alto (18,10%) está relacionado ao fato de as mesmas não passarem por nenhum tratamento térmico, apenas absorveram água no ciclo de mergulho, influenciando no valor da variável.

A cupiúba, mesmo apresentando maior taxa de absorção de água que as demais espécies, foi a espécie que sofreu menor variação no valor da variável entre os tratamentos. Na figura 10, verificou-se que a taxa foi diminuindo em função do tratamento de termorretificação, variando de 48,06 a 42,97%, afirmando que temperaturas mais elevadas proporcionaram menor taxa de absorção de água para a espécie. Essa diminuição entre os tratamentos pode estar relacionada ao fato de algumas espécies, em especial a cupiúba, sofrerem alterações mais consideráveis em sua estrutura quando submetidas a elevadas temperaturas, diminuindo a quantidade de ligações OH responsáveis pela absorção de água.

No pau-roxo e na maçaranduba os tratamentos com temperaturas mais elevadas constataram maior taxa de absorção de água, provavelmente trata-se do ganho de água livre, porém a madeira tende a perder água mais rapidamente devido a mesma ocupar somente os espaços vazios resultantes da degradação dos componentes químicos da parede celular da madeira.

Através da análise de variância foi possível observar que o fator espécie e o fator temperatura, bem como a interação entre espécie e temperatura, influenciaram de forma

significativa ao nível de 1% de probabilidade na taxa de absorção de água. A análise constatou que o tempo não foi significativo, assim como sua interação com os demais fatores (apêndice C).

O teste Tukey foi aplicado para comparação dos valores de média da variável entre os tratamentos, e verificou-se diferença estatística significativa entre as espécies. A cupiúba apresentou maior valor de média (45,38%), seguida do pau-roxo e da maçaranduba, 34,88 e 16,25%, respectivamente. Houve diferença estatística significativa também entre os tratamentos, em que a temperatura de 180 °C apresentou maior valor de média diferindo dos demais tratamentos, porém a taxa de absorção de água foi estatisticamente igual entre a temperatura de 160 °C e as testemunhas (tabela 8).

Tabela 8 - Teste de comparação de média para taxa de absorção de água.

| Espécies | Taxa de absorção de água (%) | Temperatura (°C) | Taxa de absorção de água (%) |
|-------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| Pau-roxo | 34,88 b | Testemunha | 33,25 ab |
| Maçaranduba | 16,25 c | 140 | 30,33 b |
| Cupiúba | 45,38 a | 160 | 31,58 ab |
| - | - | 180 | 33,53 a |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Cadermatori (2012) afirma que geralmente as madeiras que apresentam maior taxa de absorção de água são aqueles que possuem menor densidade básica, devido à grande quantidade de espaços vazios na estrutura da madeira capazes de serem preenchidos por água, fato que pode ser comparado com a cupiúba que tem densidade básica de 0,71 g/cm³ menor que o pau-roxo (0,74 g/cm³) e maçaranduba (0,83 g/cm³). Além disso, a maçaranduba que possui maior densidade, apresentou menor taxa de absorção de água que as demais espécies em estudo, o que corrobora com a hipótese do autor.

Quando avaliada a interação dos fatores espécie e temperatura, o teste Tukey revelou que o pau-roxo e a cupiúba apresentaram valores de médias estatisticamente iguais entre os tratamentos para cada espécie, já para a maçaranduba ocorreu de forma contrária, todos os tratamentos apresentaram diferença estatística significativa entre si (tabela 9).

Tabela 9 - Teste de comparação de média para taxa de absorção de água referente a interação dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha).

| Espécies | Temperatura | | | |
|-------------|-------------|----------|-----------|----------|
| | Testemunha | 140 °C | 160 °C | 180 °C |
| Pau-roxo | 35,69 bA | 32,80 bA | 34,38 bA | 36,67 bA |
| Maçaranduba | 18,10 cAB | 11,20 cC | 15,13 cBC | 20,57 cA |
| Cupiúba | 45,95 aA | 46,98 aA | 45,23 aA | 43,36 aA |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Letras maiúsculas comparam entre as colunas e letras minúsculas comparam entre as linhas.

O processo de termorreificação ocasiona a redução da taxa de absorção de água e, com isso, a parede celular da madeira absorve menos água devido à degradação dos grupos OH (sítios de adsorção) presentes na estrutura do material (CADEMARTORI, 2012; KORKUT et al., 2008).

No entanto, a diferença significativa entre os corpos-de-prova que receberam o tratamento de termorreificação em maçaranduba é explicado devido ao aparecimento de rachaduras proporcionadas pelas elevadas temperaturas, por esse motivo percebe-se um expressivo aumento na taxa de absorção de água entre os tratamentos. Charani et al. (2007) afirma que a absorção de água tende a diminuir para as madeiras tratadas termicamente, porém o aparecimento de rachaduras e os danos causados na estrutura física da madeira resultante da termorreificação, fazem com que haja um aumento na taxa de absorção de água.

Além disso, para Mohebbi e Sanaei (2005) a termorreificação ocasiona maior porosidade na madeira pela rachadura dos raios e degradação de componentes químicos, como as hemiceluloses. Esteves e Pereira (2009) afirmam que os poros da madeira aumentam de tamanho com a aplicação da temperatura, pela remoção dos componentes da parede celular. Nesse caso, pode-se afirmar que a madeira tratada sofre uma maior absorção de água quando se aplica temperaturas mais elevadas em relação às temperaturas menores.

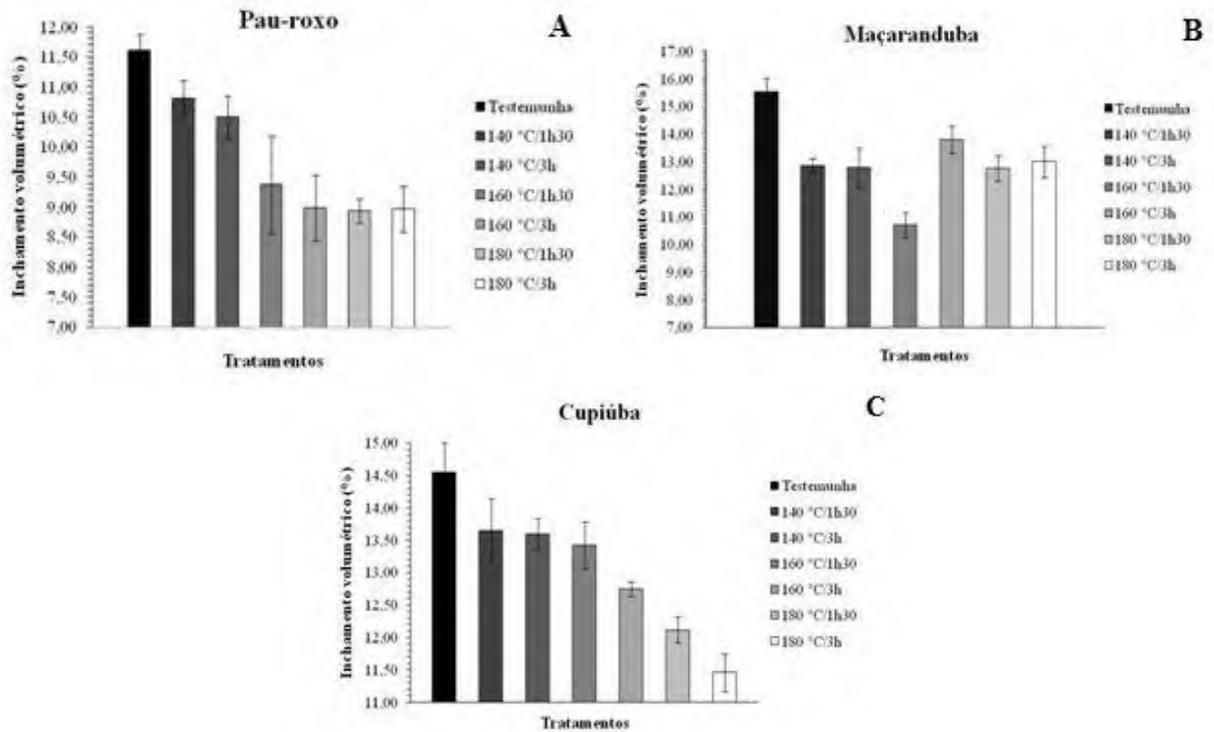
6.4. INCHAMENTO VOLUMÉTRICO E INCHAMENTO LINEAR (RADIAL E TANGENCIAL)

Os resultados demonstraram que a termorreificação proporcionou variação nas propriedades dimensionais das espécies em estudo, influenciando na redução da higroscopicidade.

O inchamento volumétrico se comportou de forma decrescente com o aumento da temperatura para as três espécies.

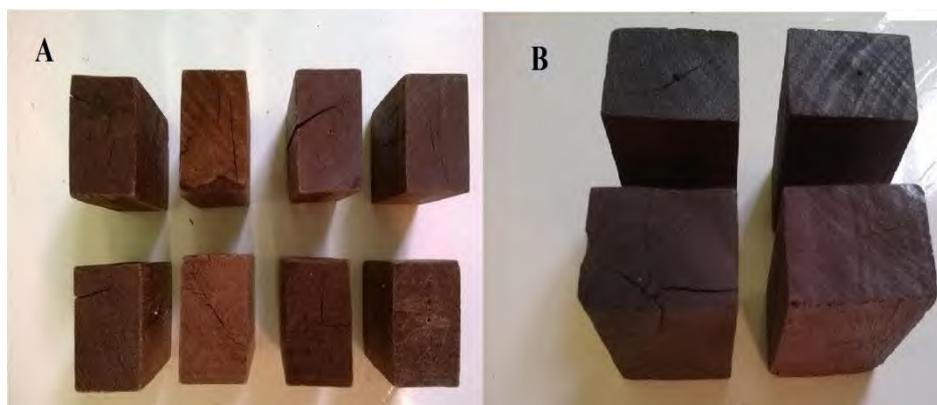
Pau-roxo e cupiúba seguiram uma diminuição contínua até a temperatura mais elevada (180 °C/1h30), porém a maçaranduba apresentou variações no decorrer dos tratamentos, demonstrando acréscimo no valor do inchamento volumétrico a partir da temperatura de 160 °C/3h (figura 11).

Figura 11 - Inchamento volumétrico ($\chi \pm EP$) de pau-roxo (A), maçaranduba (B) e cupiúba (C) nos tratamentos de termorreificação (inclui testemunha).



A variação de volume entre os tratamentos observados na maçaranduba está relacionada ao fato dos corpos-de-prova da espécie terem sofrido rachaduras, tanto no sentido radial como no sentido tangencial. O pau-roxo também apresentou rachaduras, porém em menor expressão (figura 12).

Figura 12 - Rachaduras dos corpos-de-prova, ocasionada pela termorreificação. (A) e (C) Maçaranduba e (B) Pau-roxo.

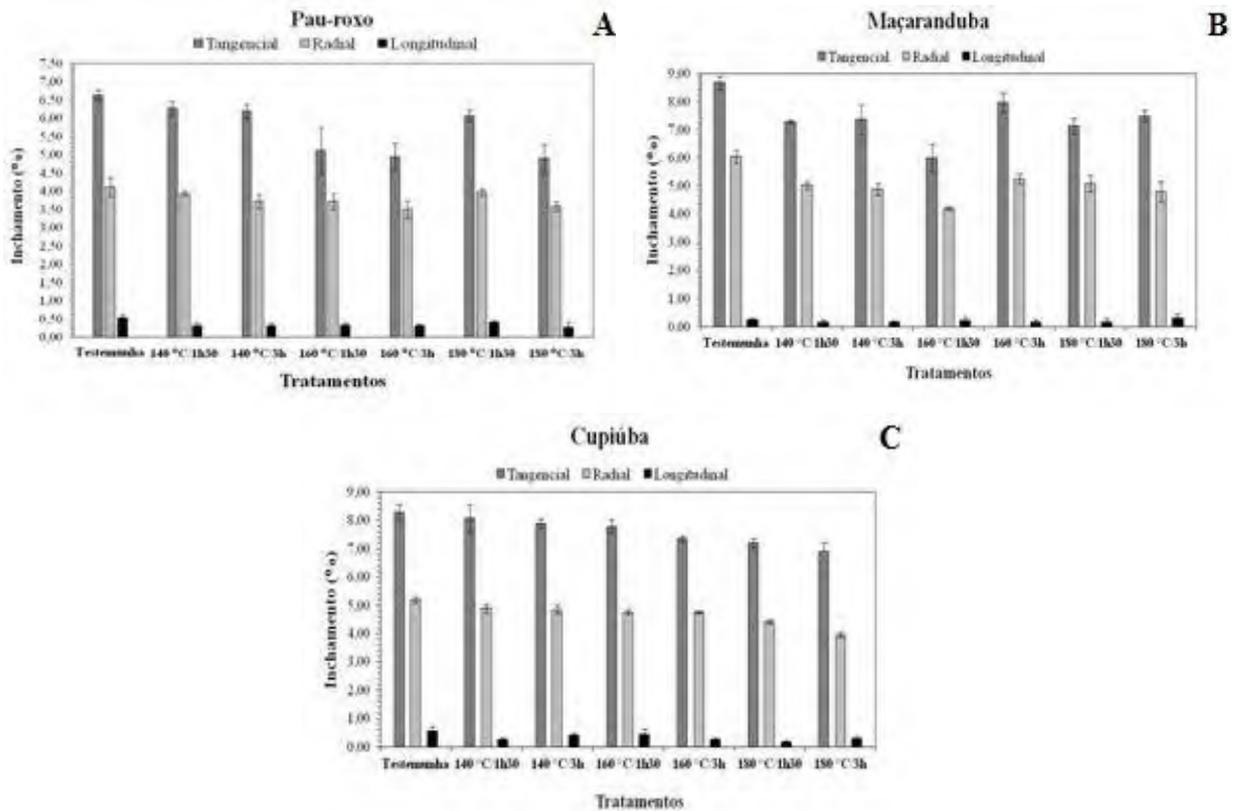




As rachaduras nos corpos-de-prova foram ocasionadas pela aplicação do processo de termorretificação, em particular nas espécies maçaranduba e pau-roxo.

As rachaduras também influenciaram as variações nos valores de inchamento radial e tangencial entre os tratamentos, sendo mais evidente na maçaranduba (figura 13).

Figura 13 - Inchamento linear, radial e tangencial ($\chi \pm EP$) de pau-roxo (A), maçaranduba (B) e cupiúba (C) nos tratamentos de termorretificação (inclui testemunha).



Para o pau-roxo e cupiúba, os inchamentos radiais e tangenciais também seguiram de

forma decrescente em função do aumento da temperatura, com exceção da temperatura de 180°C/3h, no pau-roxo, que demonstrou aumento nessas dimensões em relação aos outros tratamentos de termorretificação por sofrer pequenas rachaduras quando se aplicou esta temperatura. Observa-se que nas três espécies o inchamento longitudinal sofreu alterações desprezíveis durante os tratamentos, o que corrobora com a análise de variância descrita no apêndice D, cujos valores foram não significativos para todos os fatores em estudo.

A análise de variância demonstrou que houve influencia significativa nos valores de inchamento volumétrico, radial e tangencial para o fator espécie, fator temperatura e interações entre espécie e temperatura, e espécie e tempo (apêndice D).

O inchamento no sentido longitudinal é desprezível pelo fato de ocorrer pequenas mudanças das microfibrilas nesta direção com a remoção da água, pois a disposição das microfibrilas na camada S2 da parede celular encontra-se bem próxima ao eixo longitudinal da camada, por isso, não sofre grandes variações (SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Utilizou-se o teste Tukey para verificar a diferença entre as médias dos tratamentos e verificou-se que entre as espécies, a maçaranduba e a cupiúba foram as espécies que apresentaram maior valor de média nos inchamentos tangenciais e radiais, e conseqüentemente no volume, porém o aumento de volume na maçaranduba foi expressivo devido as rachaduras que os corpos-de-prova apresentaram, fato que não ocorreu na cupiúba (tabela10).

Tabela 10 - Teste de comparação de média para inchamento volumétrico, radial e tangencial dos fatores espécie e temperatura (inclui testemunha).

| Espécie | Volumétrico | Tangencial | Radial |
|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Pau-roxo | 10,26 b | 5,85 b | 3,82 c |
| Maçaranduba | 13,41 a | 7,58 a | 5,18 a |
| Cupiúba | 13,17 a | 7,68 a | 4,73 b |
| Temperatura (°C) | Volumétrico | Tangencial | Radial |
| Testemunha | 13,73 a | 7,82 a | 5,08 a |
| 140 | 12,37 b | 7,18 b | 4,55 b |
| 160 | 11,51 c | 6,53 c | 4,37 b |
| 180 | 11,51 c | 6,61 c | 4,30 b |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Comparando essas variações entre os corpos-de-prova testemunhas e os termorretificados, verificou-se que os valores de inchamento volumétrico, radial e tangencial diminuíram com a termorretificação e foram menores quando se aplicou temperatura mais elevadas, sendo que as temperaturas de 160 e 180 °C foram estatisticamente iguais, com exceção do inchamento radial, ao qual não houve diferença estatística significativa entre as

três temperaturas aplicadas (tabela 10).

A interação entre o fator espécie e temperatura confirma a hipótese de que os inchamentos volumétrico, radial e tangencial são menores quando se aplicam elevadas temperaturas (tabela 11).

Tabela 11 - Teste de comparação de média para inchamento volumétrico, radial e tangencial da interação dos fatores espécie x temperatura (inclui testemunha).

| Inchamento volumétrico (%) | | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|----------|----------|
| Espécies | Testemunha | 140° C | 160° C | 180° C |
| Pau-roxo | 11,35 cA | 10,66 bAB | 9,18 bC | 9,85 cBC |
| Maçaranduba | 15,66 aA | 12,83 aB | 12,26 aB | 12,88 aB |
| Cupiúba | 14,17 bA | 13,62 aA | 13,08 aA | 11,79 bB |
| Inchamento Tangencial (%) | | | | |
| Espécies | Testemunha | 140° C | 160° C | 180° C |
| Pau-roxo | 6,64 bA | 6,23 bAB | 5,03 bC | 5,48 bBC |
| Maçaranduba | 8,70 aA | 7,32 aB | 6,98 aB | 7,31 aB |
| Cupiúba | 8,11 aA | 7,98 aA | 7,56 aAB | 7,05 aB |
| Inchamento Radial (%) | | | | |
| Espécies | Testemunha | 140° C | 160° C | 180° C |
| Pau-roxo | 4,07 cA | 3,83 bAB | 3,61 bB | 3,78 bAB |
| Maçaranduba | 6,08 aA | 4,97 aB | 4,74 aB | 4,94 aB |
| Cupiúba | 5,10 bA | 4,87 aA | 4,76 aA | 4,19 bB |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Letras maiúsculas comparam entre as colunas e letras minúsculas comparam entre as linhas.

O fato de ocorrer diminuição dos inchamentos máximos em tratamentos com elevadas temperaturas pode ser explicado devido a maior perda de massa que estes tratamentos causaram, pois ocorreram mudanças na estrutura da madeira fazendo com que esta se tornasse mais estável pelo menor ganho de umidade. Batista et al. (2011) também verificou que a perda de massa resultou em menor inchamento volumétrico em *Eucalyptus grandis*.

Os inchamentos volumétricos, tangenciais e radiais observados nas testemunhas são maiores devido à maior quantidade de água que é inserida nas regiões amorfas e espaços entre as células da madeira, o que causa um aumento de volume nas amostras. Já nas amostras termorretificadas, os inchamentos são menores devido à formação de polímeros menos higroscópicos e ao aumento da cristalinidade da celulose a elevadas temperaturas (VITAL & DELLA-LUCIA, 1982).

Igualmente no trabalho de Araújo (2010), ocorreu diminuição de volume e das dimensões tangenciais e radiais quando aplicadas temperaturas maiores em três métodos de termorretificação (prensa, estufa a vácuo e estufa com nitrogênio) em espécies de peroba mica (*Aspidosperma populifolium*) e eucalipto (*Eucalyptus* sp.). Nunes (2009) também verificou redução no inchamento volumétrico, tangencial e radial de *Corymbia citriodora* em tratamento térmico a 200 e 220 °C, em que a autora afirma ter melhorado a estabilidade

dimensional da espécie.

No trabalho realizado por Soares et al. (2013), em que aplicou-se temperatura de 180, 200, 220 e 240 °C em *E. grandis*, também foi possível observar que os valores de inchamento volumétrico, tangencial e radial foram menores quando testados a temperaturas mais elevadas, reduzindo de 5,53 a 2,36% no sentido tangencial, 4,28 a 1,86% no sentido radial e de 9,63 a 4,33% no inchamento volumétrico máximo.

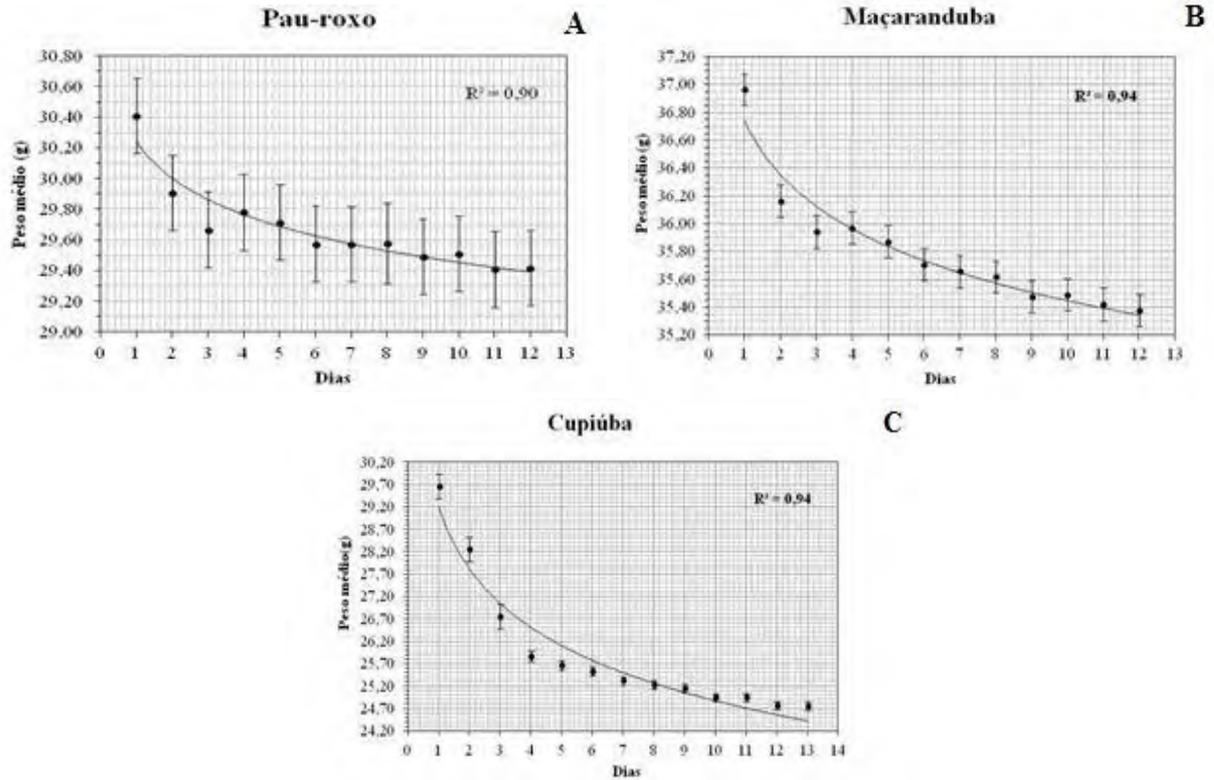
Em madeira de amescla (*Trattinnickia burseraefolia* MART.), Libera (2013) obteve inchamento volumétrico de 20,74; 11,94 e 7,75%, inchamento tangencial de 10,16; 6,13 e 3,69%, e inchamento radial de 8,41; 5,29 e 3,23% nas amostras testemunhas, termorretificadas a 200 e 245 °C, respectivamente, ou seja, também houve diminuição nos valores das variáveis. Além disso, a autora também constatou que a maior perda de massa influenciou na diminuição dos inchamentos.

Assim como nos trabalhos citados, esta pesquisa demonstrou que o inchamento volumétrico foi menor em amostras termorretificadas do que nas testemunhas, igualmente quando se analisa a umidade de equilíbrio, pois, conferem maiores valores nas testemunhas e menor valor nas termo tratadas, isso indica que a termorretificação promove o beneficiamento de madeiras pelo aplicação da temperatura, diminuindo o inchamento volumétrico e a higroscopicidade, que são fatores que interferem diretamente na variação dimensional. Porém, não podemos considerar que as maiores temperaturas aplicadas trarão maiores benefícios, pois se faz necessário avaliar o conjunto de fatores que sejam relevantes para o uso final da madeira.

6.5. EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Os gráficos abaixo expressam valores relacionados ao condicionamento higroscópico dos corpos-de-prova em sala de climatização calibrada a 12% de equilíbrio higroscópico (20° C e 65% UR). Foi possível observar que os pesos das amostras diminuíram até ficar constante (figura 14), e conseqüentemente sofreram secagem até atingirem a umidade de equilíbrio higroscópico desejada para o início da termorretificação.

Figura 14 - Curva de equilíbrio higroscópico dos corpos-de-prova de pau-roxo (A), maçaranduba (B) e cupiúba (C) em sala de climatização (20 °C e 65% UR). Valores médios de peso ($\chi \pm EP$).



A curva de umidade de equilíbrio higroscópico acima demonstra um gráfico decrescente, indicando que houve troca de umidade dos corpos-de-prova com o meio até que os mesmos entrassem em equilíbrio com o ar do ambiente. Essa umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova tende a ser cada vez menor quando submetidos a ambientes com baixa umidade relativa, perdendo umidade até permanecerem com massa constante, sendo capaz de promover a chamada curva de dessecção (CALONEGO, 2009).

O fenômeno ocorre devido às alterações na estrutura química da madeira, durante os corpos-de-prova permanecerem na sala com baixa umidade relativa do ar, as pontes de hidrogênio que ligam as moléculas de água à celulose quebram-se antes mesmo que toda a água livre seja evaporada fazendo com que haja a perda de umidade da madeira (CHAUHAN; AGGARWAL, 2004). Dessa forma, a madeira entra em equilíbrio higroscópico adquirindo valores que dependem da temperatura e umidade relativa do ambiente.

É possível observar que a diminuição do peso das três espécies ocorreu de forma gradativa em função da perda de umidade dos corpos-de-prova com o meio, neste caso a sala de climatização, em que as variáveis de temperatura e umidade relativas controladas, a 20 °C e 65% de UR, proporcionaram uma umidade de equilíbrio da sala de 12%. Dentre as espécies, o pau-roxo foi a que se estabilizou mais rapidamente, no 6º dia de pesagem com $29,5 \pm 0,25$ g, porém a partir do 8º dia verificaram-se pequenas oscilações no peso, diminuindo para $29,4 \pm 0,25$ g. Já a maçaranduba e cupiúba só atingiram peso constante a partir do 12º dia com $35,3$

$\pm 0,12$ g e $24,7 \pm 0,10$ g respectivamente.

A diminuição do peso tem relação direta com a perda de umidade dos corpos-de-prova, o que influencia diretamente no equilíbrio higroscópico da madeira. Desta forma, a análise de variância dos valores de perda de umidade dos corpos-de-prova em sala de climatização a 12% constatou que as espécies foram significativas ao nível de 1% de probabilidade (apêndice E).

Através do teste de comparação de média, verificou-se que o pau-roxo e a maçaranduba foram estatisticamente iguais entre si, porém as mesmas diferiram estatisticamente da cupiúba, que apresentou maior valor de média (tabela 12).

Tabela 12 - Teste de comparação de média para a perda de umidade em pau-roxo, maçaranduba e cupiúba em sala de climatização a 12% de equilíbrio higroscópico.

| Tratamentos | Perda de umidade % ($\bar{x} \pm DP$) | Tukey* |
|-------------|---|--------|
| Pau-roxo | $3,38 \pm 0,66$ | b |
| Maçaranduba | $4,49 \pm 0,39$ | b |
| Cupiúba | $14,09 \pm 1,19$ | a |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Todas as espécies obtiveram perda de umidade, porém a cupiúba apresentou maiores valores de perda, isto porque inicialmente a mesma tinha maior umidade de equilíbrio ($32,1\% \pm 1,9\%$). O fato ocorre porque as peças de madeira, depois de serradas e expostas a um ambiente seco, tendem a perder umidade para o meio circundante até entrarem em equilíbrio (GLASS; ZELINKA, 2010).

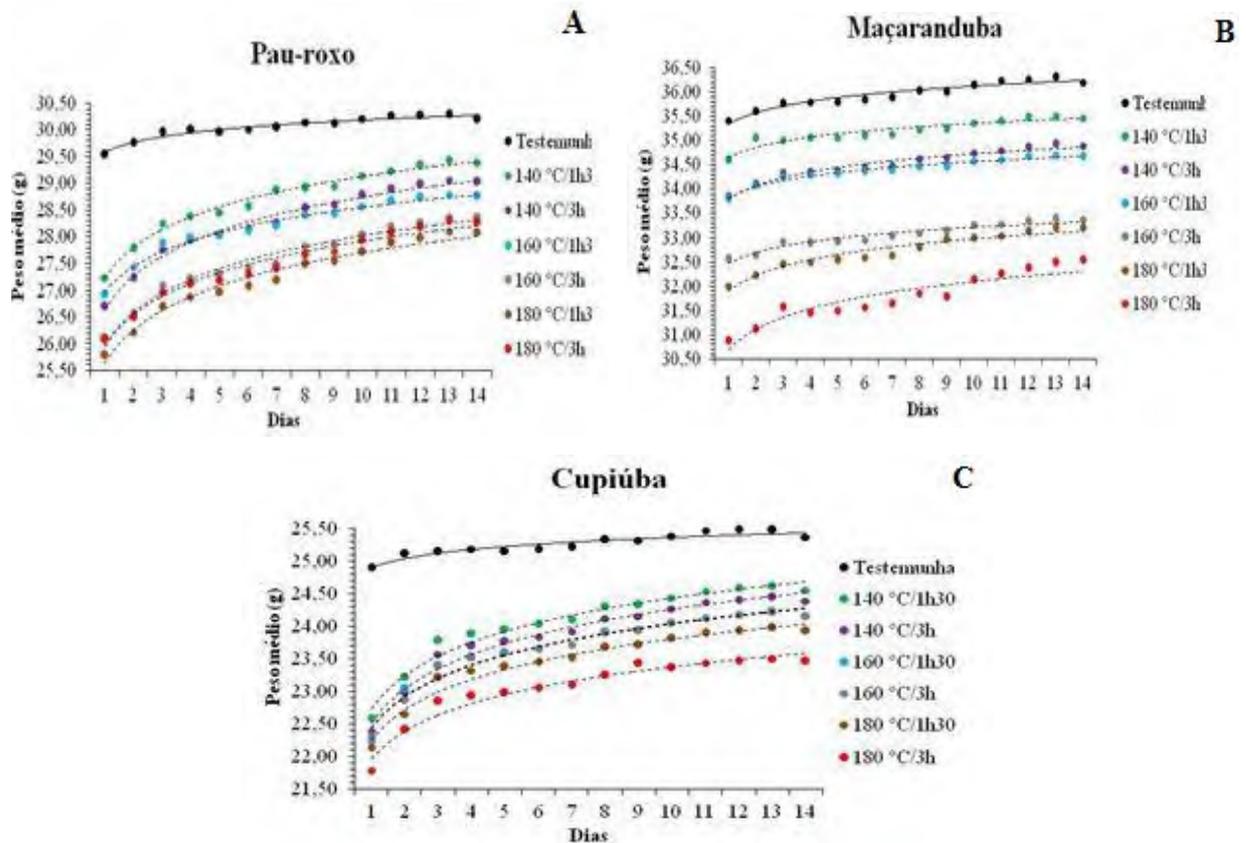
Após estabilização em sala a 12% de equilíbrio higroscópico, os corpos-de-prova apresentaram umidade de equilíbrio de $15,06 \pm 0,70\%$ para o pau-roxo, $14,02 \pm 0,38\%$ para a maçaranduba e de $12,41 \pm 0,38\%$ para cupiúba (valores expressos em média \pm erro padrão), estando dentro dos padrões para início da termorretificação, 12 a 15%.

Após o processo de termorretificação, as amostras foram levadas à sala de climatização com calibração para 18% de equilíbrio higroscópico (26° C e 85% UR), onde teve início o segundo processo de condicionamento higroscópico com a finalidade de analisar o comportamento da higroscopicidade dos corpos-de-prova das três espécies.

Nesse ambiente, o ganho de umidade foi mais acentuado nas amostras termorretificadas do que nas testemunhas, por conta da perda de massa sofrida durante o tratamento térmico. As amostras termorretificadas sofreram uma secagem brusca e variação na sua estrutura que conseqüentemente levou à perda de massa influenciando diretamente no ganho de umidade. Como as testemunhas não tiveram perda de componentes, apresentou pouca variação na curva de ganho de umidade, fato pode ser observado pela comparação de

variação de peso entre os corpos-de-prova das testemunhas e termorretrificados (figura 15).

Figura 15 - Comportamento do ganho de peso dos corpos-de-prova termorretrificados e testemunhas em sala de climatização a 18% de equilíbrio higroscópico.



Tal constatação pode ser explicada pelo efeito do tratamento térmico ter ocasionado a degradação de parte dos constituintes da madeira, tornando-a mais porosa e com ligações de hidrogênio livres entre as moléculas de celulose proporcionando, portanto, maior absorção de água livre.

Fazendo uma avaliação geral do gráfico (figura 15), a curva de ganho de umidade (aumento do peso das amostras) comportou-se de maneira crescente, proporcionando aumento da umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova na sala de climatização até que os mesmos atingissem o equilíbrio higroscópico. Isto ocorre porque a madeira seca quando submetida a um ambiente com umidade relativa do ar crescente tende a absorver água, fenômeno chamado de adsorção (OLIVEIRA, 2007; DEL MENEZZI, 2004).

Modes (2010) afirma que a interação da madeira com a água ocorre devido à presença de grupos hidroxílicos (OH) na estrutura da madeira. Desta forma, mesmo ocorrendo perda de parte de seus constituintes químicos após a termorretrificação, a madeira tende a sofrer o processo de adsorção, pois as moléculas de água do ambiente se ligam por pontes de

hidrogênio que ficaram livres entre as moléculas de celulose em decorrência da quebra de ligação das cadeias celulósicas (CALONEGO, 2009).

Isto explica o fato das testemunhas terem adquirido pouca umidade durante a segunda fase de condicionamento higroscópico a 18%, pois as mesmas já se encontravam com moléculas de água fixas em seus constituintes químicos decorrente da climatização a 12% de equilíbrio higroscópico.

A análise de variância obtida através dos valores de ganho de umidade dos corpos-de-prova revelou que houve significância entre todos os fatores e suas respectivas interações ao nível de 1% de probabilidade para o ganho de umidade (apêndice F).

Através do teste Tukey foi possível observar que em cada fator (espécie, temperatura e tempo) os valores de ganho de umidade apresentaram diferença estatística significativa entre si (tabela 13).

Tabela 13 - Teste de comparação de médias do ganho de umidade para os fatores espécie, temperatura e tempo.

| Espécie | Ganho de umidade (%) | Temperatura | Ganho de umidade (%) | Tempo | Ganho de umidade (%) |
|----------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| Pau-roxo | 6,86 b | Testemunha | 2,46 d | 1h30 | 5,56 b |
| Maçaranduba | 3,22 c | 140 °C | 6,82 b | 3 h | 5,89 a |
| Cupiúba | 7,08 a | 160 °C | 6,52 c | - | - |
| - | - | 180 °C | 7,09 a | - | - |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

A cupiúba apresentou maior valor de média (7,08%), ou seja, teve maior ganho de umidade, seguida do pau-roxo (6,86%) e maçaranduba (3,22%), respectivamente. Esses resultados provavelmente se explicam devido à perda de massa, pois a mesma seguiu o mesmo comportamento, foi maior na cupiúba e menor na maçaranduba. Desta forma, constata-se que a maçaranduba obteve menor ganho de umidade devido à espécie ter perdido menos massa que as demais, o que influenciou nos valores desta variável.

Nota-se que os corpos-de-prova termorretificados a temperaturas mais elevadas (180 °C) e a um período de tempo maior (3h), apresentaram maior ganho de umidade por conta da maior perda de componentes hidrófilos da estrutura da madeira, isto faz com as amostras tenham mais espaços vazios em seu interior, disponíveis para o ganho de umidade. Assim, para os corpos-de-prova testemunhas que teoricamente tem menos espaços vazios em seu interior, pois não sofreram danos consideráveis em sua estrutura, tendem a adquirir menor ganho de umidade, o que pode ser comprovado pela tabela 13.

Na interação dos fatores, foi possível perceber que o ganho de umidade em pau-roxo submetido à termorretificação a 140 °C por 3,0 h, a 160 °C por 3,0h e a 180 °C por 1h30

foram iguais estatisticamente entre si e apresentaram maiores valores de média. Na maçaranduba, o ganho de umidade foi estatisticamente igual nas temperaturas de 140 e 160 °C por 1h30, e na cupiúba a semelhança ocorreu nas temperaturas de 140 °C por 1h30 e 160 °C nos dois tempos testados (tabela 14).

Tabela 14 - Teste de comparação de média para interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo referente ao ganho de umidade (Valores médios \pm Desvio Padrão).

| Interação – Espécies x Temperatura x Tempo | | | | |
|--|-------|-----------------|------------------|-----------------|
| Temperatura | Tempo | Espécie | | |
| | | Pau-roxo | Maçaranduba | Cupiúba |
| Testemunha | - | 2,51 (0,13) aD | 2,53 (0,05) aD | 2,32 (0,16) aD |
| 140 °C | 1h30 | 7,99 (1,14) bB | 2,64 (0,18) cCD | 9,02 (0,28) aAB |
| | 3,0h | 8,87 (0,32) aA | 3,23 (0,22) bBC | 9,17 (0,17) aA |
| 160 °C | 1h30 | 6,92 (0,25) bC | 2,68 (0,16) cCD | 8,99 (0,21) aAB |
| | 3,0h | 8,80 (0,19) aA | 3,19 (0,64) bBCD | 8,58 (0,12) aAB |
| 180 °C | 1h30 | 8,93 (0,16) aA | 3,77 (0,32) cB | 8,37 (0,23) bBC |
| | 3,0h | 8,37 (0,46) aAB | 5,24 (0,39) bA | 7,88 (0,22) aC |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

Letras maiúsculas comparam entre as linhas e letras minúsculas comparam entre as colunas.

Percebe-se que para o pau-roxo e maçaranduba houve maior ganho de umidade quando se aplicou temperaturas mais elevadas, já na cupiúba o ganho de umidade apresentou valores menores em decorrência do aumento da temperatura, essa diferença na cupiúba pode estar relacionada à composição química da espécie bem como as diferentes alterações sofridas em sua estrutura, neste caso a cupiúba teve um comportamento diferente com a termorretificação, diminuindo consideravelmente os sítios de absorção de água (ligações OH), fato que também foi refletido na taxa de absorção de água que foi menor em corpos-de-prova submetidos a temperaturas maiores.

Mesmo que o ganho de umidade tenha sido maior nos corpos-de-prova termorretificados em relação à testemunha, podemos afirmar que a umidade de equilíbrio comporta-se de maneira contrária, ou seja, quando os corpos-de-prova entram em equilíbrio na sala de climatização a 18% (26 °C e 85% UR), as testemunhas apresentam valores maiores em relação às amostras termo tratadas.

A análise de variância dos valores de umidade de equilíbrio após estabilização em sala a 18% demonstrou que os fatores espécie e temperatura foram significativos ao nível de 1% de probabilidade, enquanto que o fator tempo foi significativo ao nível de 5% de probabilidade. Já a interação dos fatores não foram significativos para a umidade de equilíbrio (apêndice G).

A tabela 15 mostra os testes de comparação de médias para os três fatores de forma individual e observa-se que dentre as espécies, após entrarem em equilíbrio na sala de climatização a 18%, o pau-roxo apresentou maior umidade de equilíbrio (14,42%), diferindo estatisticamente da maçaranduba (11,43%) e da cupiúba (9,88%). No fator temperatura, observa-se que as testemunhas apresentaram maior umidade de equilíbrio que as amostras termorretificadas, tendo estas adquirido menor valor quando usadas temperaturas maiores. O tempo também influenciou na umidade de equilíbrio, os tratamentos realizados por um período de 3,0h proporcionaram menor valor da variável (tabela 15).

Tabela 15 - Teste de comparação de média para os fatores: espécie, temperatura e tempo, referente a umidade de equilíbrio (inclui testemunha).

| Espécie | Umidade de equilíbrio (%) | Temperatura | Umidade de equilíbrio (%) | Tempo | Umidade de equilíbrio (%) |
|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------|---------------------------|
| Pau-roxo | 14,42 a | Testemunha | 16,18 a | 1h30 | 12,61 a |
| Maçaranduba | 11,43 b | 140 °C | 13,01 b | 3 h | 11,21 b |
| Cupiúba | 9,88 b | 160 °C | 10,45 c | - | - |
| - | - | 180 °C | 8,00 d | - | - |

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey $\alpha = 5\%$).

A interação entre os fatores espécie x temperatura x tempo não apresentou interação significativa para a umidade de equilíbrio, porém através da tabela 16 é possível observar que os tratamentos de termorretificação permitiram a diminuição da higroscopicidade pela diminuição dos valores de umidade de equilíbrio.

Tabela 16 - Valores de umidade de equilíbrio da interação entre os três fatores: espécie, temperatura e tempo (Valores médios \pm Desvio Padrão).

| Interação – Espécies x Temperatura x Tempo | | | | |
|--|-------|--------------|--------------|--------------|
| Temperatura | Tempo | Espécie | | |
| | | Pau-roxo | Maçaranduba | Cupiúba |
| Testemunha | - | 17,14 (3,70) | 16,85 (1,45) | 14,32 (2,30) |
| 140 °C | 1h30 | 16,08 (3,03) | 14,30 (1,48) | 10,65 (2,74) |
| | 3,0h | 14,66 (4,24) | 12,47 (2,18) | 9,90 (2,17) |
| 160 °C | 1h30 | 13,59 (3,51) | 11,74 (1,68) | 8,91 (2,73) |
| | 3,0h | 12,02 (4,99) | 7,55 (3,06) | 8,86 (1,87) |
| 180 °C | 1h30 | 10,90 (4,47) | 7,00 (1,45) | 7,85 (1,23) |
| | 3,0h | 11,68 (3,98) | 4,82 (3,42) | 5,75 (1,91) |

Desta forma, podemos constatar que a higroscopicidade das três espécies diminuiu com o emprego da termorretificação, pois as amostras adquiriram umidade de equilíbrio menor que a testemunha no final do processo, sendo que essa diminuição foi maior para os corpos-de-prova submetidos a temperaturas maiores.

O fato está ligado à remoção da água livre e redução da água higroscópica, desta forma o equilíbrio higroscópico reduz proporcionalmente. Nos tratamentos a 180 °C com 3 horas de tempo, as amostras apresentaram maior redução do equilíbrio higroscópico do que os demais tratamentos, pois com a aplicação da temperatura ocorreu a perda de massa, reduzindo quantitativamente os extrativos e os elementos constituintes da madeira. Com a remoção dessas substâncias temos a diminuição da quantidade de pontes de hidrogênio que integram a parte química da madeira, essa perda traz menor ganho higroscópico, pois confere menor superfície de contato com a água, essa superfície é a parte hidrófila que está relacionada com o ganho de umidade.

Borges e Quirino (2004) afirmam que a baixa higroscopicidade pode ser comprovada quando as amostras de madeiras termorretificadas e as não termorretificadas são submetidas em mesmas condições de umidade, constatando que as amostras termorretificadas atingem umidade de equilíbrio menor que as sem tratamento térmico, indicando que houve diminuição da higroscopicidade, o que pôde ser ratificado nesta pesquisa dentre as três espécies.

Surini et al. (2012) retratam que o menor teor de umidade de equilíbrio da madeira após termorretificação é induzido pelas modificações sofridas em sua estrutura, principalmente porque ocorre a degradação dos componentes químicos e da formação de ligação cruzada da lignina que afeta na absorção de água.

Batista (2012) testou as temperaturas de 140, 160 e 180 °C em *Eucalyptus grandis*, e também verificou menor umidade de equilíbrio nas amostras tratadas, 7,59; 5,74 e 5,20% respectivamente contra 8,83% adquiridas pelas testemunhas, quando submetidas a condições de 11,5% de equilíbrio higroscópico.

Modes (2010) também avaliando *Eucalyptus grandis* termorretificados a 160° C por 3 horas, verificou a redução da higroscopicidade quando as amostras foram submetidas à condição de 12% de umidade de equilíbrio. Os valores obtidos pela autora foram de 9,94% para as amostras termorretificadas e 13,1% para as testemunhas, diferente do encontrado nesta pesquisa com 8,86% de umidade de equilíbrio nos corpos-de-prova termorretificados a 160° C e de 14,32% nas testemunhas.

Calonego (2009) quando submeteu amostras de *Eucalyptus grandis* em condição de 17,5% de teor de umidade de equilíbrio higroscópico após termorretificação, constatou teores de umidade de equilíbrio das madeiras em 12,1%; 11,5%; 10,5%; 9,2% e 6,8% nas amostras termorretificadas a 140, 160, 180, 200 e 220 °C e de 13,2% nas testemunhas.

As diferenças nos valores de umidade de equilíbrio encontrados neste trabalho com relação aos trabalhos comparados acima podem ser explicadas pela condição de 18% de

equilíbrio higroscópico em que os corpos-de-prova foram submetidos, além das características diferenciadas que as espécies madeireiras tendem a apresentar após a termorreificação.

7. CONCLUSÕES

A termorreificação proporcionou variação nas propriedades dimensionais e na higroscopicidade das espécies madeireiras em estudo. Contudo, os valores de inchamento volumétrico foram decrescentes com o aumento da temperatura para as três espécies.

As espécies termorreificadas adquiriram menor umidade de equilíbrio do que as testemunhas na reumificação em sala de climatização a 18% de equilíbrio higroscópico.

De acordo com Borges e Quirino (2004), o teor de umidade de equilíbrio em amostras tratadas termicamente é inferior aos valores encontrados em amostras não termo tratadas. Sob esse aspecto, o tratamento térmico pode ser utilizado para produzir produtos florestais de maior qualidade e valor no mercado, configurando-se como um possível incremento no beneficiamento de madeiras. Além de potencializar o uso de madeiras marginalizadas, preservando a utilização de madeiras intensamente exploradas.

No Brasil, estas espécies são bastante empregadas em plantios florestais e têm importante potencial para suprir a demanda da indústria madeireira nacional. Neste contexto, propõe-se o emprego da termorreificação como instrumento que possa contribuir para a agregação de valor a estas madeiras.

Mediante estas informações, torna-se relevante orientar o conhecimento dos processos de termorreificação para as indústrias, desenvolvendo padrões adequados de retificação térmica, principalmente no que diz respeito às espécies da Amazônia brasileira.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as espécies, a cupiúba foi a que melhor se comportou durante todo o experimento, desde o condicionamento higroscópico a 12% até o ciclo de mergulho. Não ocorreram defeitos visíveis, porém houve diminuição de seu volume, perda de cheiro

desagradável característico da espécie pela termorretificação e menor umidade de equilíbrio em sala de climatização a 18% de equilíbrio higroscópico.

O pau-roxo comportou-se de maneira satisfatória quando se aplicou temperaturas de 140 e 160 °C, na temperatura mais elevada (180 °C) houve pequenas rachaduras em alguns corpos-de-prova influenciando diretamente na reabsorção de água e em suas dimensões. Além disso, no ciclo de mergulho a espécie perdeu coloração.

A maçaranduba foi a espécie que apresentou defeitos visíveis como rachaduras no sentido tangencial e radial, inviabilizando a maioria das amostras termorretificadas, o que influenciou nos resultados de taxa de absorção de água e inchamento.

Foi possível observar a redução da higroscopicidade e maior estabilidade dimensional das espécies quando se aplicou a termorretificação, sendo que estas características foram mais consideráveis nas temperaturas mais elevadas.

Em vista disso, torna-se necessário o avanço de estudos em espécies de madeiras do Brasil, onde a demanda das pesquisas se restringe usualmente a trabalhos realizados em *Pinus taeda* e *Eucalyptus* sp.

As folhosas da Amazônia comportam-se de maneira diferenciada quando comparadas com as demais espécies estudadas nos trabalhos de termorretificação, por conta de suas características bastante peculiares.

Sugere-se a adoção de programas de normatização para os processos de termorretificação em diferentes espécies, como as da Amazônia, que estruturalmente apresentam anéis de crescimento diferenciados das demais regiões, pois variam de acordo com a precipitação pluvial e a sazonalidade específica da região.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, S. de O. **Propriedades de madeira termorretificadas**. 77 f. Originalmente apresentado como Tese de Doutorado em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Anexo B - Determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.
- BAL, B. C.; BEKTAS, I. The effects of heat treatment on the physical properties of juvenile wood and mature wood of *Eucalyptus grandis*. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5117-5127, 2012.
- BARBOSA, A. P.; VIANEZ, B. F.; VAREJÃO, M. J.; ABREU, R. L. S. Considerações Sobre o Perfil Tecnológico do Setor Madeireiro na Amazônia Central. **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 42-64, Set. 2001. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/177/171>. Acesso em: 24 Out. de 2013.
- BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de Eucalyptus grandis em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 339f. Originalmente apresentado como Tese de Doutorado em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- BATISTA, D. C.; TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. Efeito do tempo e da temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 533-540, jul.-set. 2011.
- BORGES, M. B.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa e Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004. Disponível em: <http://www.funtec.org.br/arquivos/higroscopicidade.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2013.
- BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P. P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz Roh Werkst.*, v. 66, p. 63-69, 2008.
- BRITO, F. M. S. **Efeito da termorretificação nas propriedades tecnológicas do bambu**. 2013. Originalmente apresentado como dissertação de Mestrado em Ciências Florestais – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES, 2013.
- BRITO, J. O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São Paulo: SBS/SBEF, 1993. p.774.
- BRITO, O. T.; GARCIA, J. N.; JUNIOR, G. B.; PESSOA, A. M. das C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Revista cerne**, Lavras, MG, v.12, n.2, p. 182-188, 2006.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

CADEMARTORI, P. H. G. de. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretrificada de três espécies de *Eucalyptus***. 2012. 132f. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STANGERLIN, D. M. Modification of Static Bending Strength Properties of *Eucalyptus grandis* Heat-Treated Wood. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 922-927, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000136>>. Acesso em: 25 de dez. de 2013.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorretrificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. Ex. Maiden**. 2009, 149 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2009.

CANADA'S WOOD FOREST PRODUCTS INSTITUTE (FORINTEK). Thermally Modified Wood. Quebec/Vancouver, 2003. Technology Profile TP-03-01E. Disponível em: <www.valuetowood.ca>. Acesso em: 26 de ago. de 2013.

CARVALHO, W. ; CANILHA, L. ; FERRAZ, A. L. ; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2191-2195, 2009.

CHARANI, P. R.; MOHAMMADI ROVSHANDEH, J.; MOHEBBY, B.; RAMEZANI, O. Influence of hydrothermal treatment on the dimensional stability of beech wood. **Caspian Journal of Environmental Sciences**. v. 5, n. 2, p. 125-131, 2007.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.1, p.50-55, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Curitiba, 2004. 226f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais/Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Universidade Federal do Paraná.

EMBRAPA. Embrapa Amazônia Oriental. **Espécies arbóreas da Amazônia. Nº 4: Maçaranduba, *Manilkara huberi***. 2004. Disponível em: <<http://dendro.cnptia.embrapa.br/Agencia1/AG01/Abertura.html>>. Acesso em: 03 Dez 2013.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. L.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioResources**, Raleigh, v. 3, n. 1, p. 142-154, 2008.

ESTEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, Raleigh, v. 1, n. 4, p. 370-404, 2009.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Polyoses (hemicelluloses)**. In: Wood – chemistry, ultrastructure, reactions. Kessel Verlag. 2003. p. 106 – 131.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. New York: Walter De Gruyter, 1989.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. ThermoWood[®] Handbook. Helsink, 2003. Disponível em: <http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faanyag/segedanyag/faanyagok_modifikasi_kalasa/thermowood_kezikonyv_EN.pdf>. Acesso em: 10 mai 2013.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 4-1 – 4-19.

GRIEBELER, C. G. de O. **Colorimetria da Madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden modificada termicamente**. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado – Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa State University Press/AMES, 1996. 484p.

HILL, C. **Wood modification: chemical thermal and processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Disponível em: <<http://www.ipt.br/>> Acesso em: 30 out 2013

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. **Revista da Madeira**, v. 21, p. 58-64, 2010.

JEFFRIES, T. W. Biodegradation of lignin-carbohydrate complexes, **Biodegradation**, v. 1, n. 2-3, p. 163-176, 1990.

KORKUT, S.; ARGÜL, M.; DÜNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Bioresource technology**, Amsterdam, v. 99, n. 6, p. 1861-1868, 2008b.

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA E PRODUTOS FLORESTAIS (LTPF). Software para a determinação dos parâmetros físicos do ar relacionados a secagem da madeira: *Air Humide Et Équilibre Du Bois*. Disponível em: <<http://www.ltpf.ufra.edu.br/extra.php?id=22>> Acesso em: 23 ago 2013.

LIBERA, L. D. **Influência do tratamento térmico na estabilidade dimensional e resistência à deterioração da madeira de amescla**. Mato Grosso, 2013. 39p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Mato Grosso, Sinop, 2013.

MARCELO, C. R. **Determinação da relação siringila/guaiacila em ligninas de eucalyptus SSP. por pirólise associada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas**. 2007. 63p. Originalmente apresentado como dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, 2007.

MILLER, R.B. Structure of Wood. In: **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**, Forest Service US Department of Agriculture (Ed.). Forest Products Research, Madison, USA, 1999.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico- mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, 2010. 99p.

MOHEBBY, B. **Biological attack of acetylated wood**; Ph.D. Thesis submitted to Georg-August University, Goettingen, Germany, 2003.

MOHEBBY, B.; SANAEI, I. Influences of the hydrothermal treatment on physical properties of beech Wood (*Fagus orientalis*). In: ANNUAL MEETING BANGALORE, 36., 2005, India. **Anais...** India: Tarbiat Modarress University, 2005.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A. do; MELO, D. C. de. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 145-155, 2005.

MOREY, P. **O crescimento das árvores**. São Paulo: E. P. U, 1980. 72 p.

NAHUZ, A. R. (Coord.). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil** - São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013.

NUNES, C. S. **Estabilidade dimensional e modificações químicas da madeira termorretificada de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**. 2009. 32 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

OLIVEIRA, J. T. S. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIELDLER, N.C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória: Aquárium, 2007. cap. 5, p.129-163.

PESSOA, A. M. C.; BRITO FILHO, E.; BRITO, J. O. **Avaliação da madeira termorretificada 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 termorretificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1999. 115 f. Originalmente apresentado como Dissertação de Mestrado em Tecnologia da Madeira, ESALQ-USP, Piracicaba, 1999.

POLBEL, D. da S. **Efeito da termorretificação nas propriedades tecnológicas da madeira normal e de compressão de *pinus caribaea* morelet**. Seropédica: UFRRJ, 2011. 29f. Originalmente apresentado como Monografia (Conclusão de curso de Engenharia Florestal) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

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 [online]. 2013, vol.19, n.3, pp. 391-398. ISSN 0104-7760. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602013000300005&script=sci_arttext > Acesso em: 26 out 2013.

RIBOLDI, J. Análise Estatística. **Caderno de Matemática e Estatística**, Serie B: Trabalho de Apoio didático. Instituto de Matemática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Serie B, n. 56, 2001.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da Temperatura e Velocidade do Ar Sobre a Taxa de Secagem da Madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, 2002, p. 99-106.

SCHWENGBER, D.R. SMIDERLE, O.J. **Informativo Técnico Rede de Sementes da Amazônia**. N° 7, 2005. Disponível em: <https://www.inpa.gov.br/sementes/iT/7_Cupiuba.pdf>. Acesso: 03 Dez 2013.

SEVERO, E, T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, v.10, n.1, pag. 109-124, 2000.

SILVA, M. M. E. **Efeito da Termorreificação na Resistência Biológica da Madeira De Bracatinga-Comum (*Mimosa Scabrella*)**. Originalmente apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati. 2011. 31p.

SILVA, M. R. (2012). **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda*** 223p. Originalmente apresentado como tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.

SOARES, A. K.; CADEMARTORI, P. H. G.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. G. **Propriedades físicas da madeira termorreificada de *Eucalyptus grandis***. In: XXII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 2013, Pelotas. **Anais...** Rio Grane do Sul, 2013.

SORATTO, D. N. **Efeito das variáveis do tratamento térmico nas propriedades da madeira de *Eucalyptus sp.*** 2012. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado em Ciência Florestal – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 63f.

STAMM, A. J.; BURR, H. K.; KLINE, A. A. Staywood...heat-stabilized wood. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 38, n. 6, p. 630-634, 1946.

SURINI, T.; CHARRIER, F.; MALVESTIO, J.; CHARRIER, B.; MOUBARIK, A.; CASTÉRA, P.; GRELIER, S. Physical properties and termite durability of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) heat-treated under vacuum pressure. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 487-501, 2012.

SYRJANEN, T. Production and classification of heat-treated wood in Finland, review of heat

treatments of wood. In: PROCEEDINGS OF SPECIAL SEMINAR, 2001, Antibes. **Anais...** Antibes, 2001.

TAKESHITA. **Redução na higroscopicidade e na movimentação dimensional da madeira de folhosas submetida a tratamentos térmicos.** Originalmente apresentado como dissertação de mestrado em recursos florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo. 2011. 106p.

THIAM, M.; MILOTA, M. R.; LEICHTI, R. J. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of Western Hemlock lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v.52, n.4, p.64-68, 2002.

TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization.** New York: Chapman & Hall, 1991.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito do aquecimento na estabilidade dimensional e na higroscopicidade da madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.6, n.2, p.150-161, 1982.

WIEDENHOEFT, A. Structure and function of wood. In: **Wood handbook: wood as an engineering material.** Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p.62-79.

WINDEISEN; E.; STROBEL; C.; WEGNER, G. Chemical changes during the production of thermo-treated *beech* wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, p. 523-536, 2007.

XAVIER, G. da S. **Influência de Tratamentos Térmicos em duas Propriedades Mecânicas das Madeiras de *Pinus sp.* e *Eucalyptus grandis.*** Originalmente apresentado como Trabalho Final de Curso. Universidade de Brasília, 2013.

XIE,Y.; LIU,Y. Heat treated wood and its development. **Journal of Forest Research**, Berlin, v. 13, n. 3, p. 224-230, 2002.

APÊNDICE

Apêndice A - Análise de variância para a perda de massa dos fatores em estudo.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------------|----|-----------|----------|------------|
| Espécie (F1) | 2 | 168,18691 | 84,09345 | 280,7488** |
| Temperatura (F2) | 2 | 197,25129 | 98,62564 | 329,2649** |
| Tempo (F3) | 1 | 48,79681 | 48,79681 | 162,9098** |
| Int, F1xF2 | 4 | 97,52323 | 24,38081 | 81,3961** |
| Int, F1xF3 | 2 | 14,22771 | 7,11385 | 23,7498** |
| Int, F2xF3 | 2 | 0,61142 | 0,30571 | 1,0206 ns |
| Int, F1xF2xF3 | 4 | 6,57453 | 1,64363 | 5,4873** |
| Tratamentos | 17 | 533,17189 | 31,36305 | 104,7066** |
| Resíduo | 72 | 21,56636 | 0,29953 | |
| Total | 89 | 544,73825 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)

Apêndice B - Análise de variância para massa específica aparente dos corpos-de-prova em sala climatizada a 18% de equilíbrio higroscópico.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------------|-----|---------|---------|------------|
| Espécie (F1) | 2 | 0,76261 | 0,38130 | 387,7661** |
| Temperatura (F2) | 3 | 0,0111 | 0,02704 | 27,4946** |
| Tempo (F3) | 1 | 0,00061 | 0,00061 | 0,6178ns |
| Int, F1xF2 | 6 | 0,04259 | 0,00710 | 7,2192** |
| Int, F1xF3 | 2 | 0,00056 | 0,00028 | 0,2847ns |
| Int, F2xF3 | 3 | 0,00082 | 0,00027 | 0,2788ns |
| Int, F1xF2xF3 | 6 | 0,00320 | 0,00053 | 0,5424ns |
| Tratamentos | 23 | 0,89150 | 0,03876 | 39,4178** |
| Resíduo | 96 | 0,09440 | 0,00098 | |
| Total | 119 | 0,98590 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)

Apêndice C - Análise de variância para taxa de absorção de água entre os tratamentos.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------------|-----|-------------|------------|------------|
| Espécie (F1) | 2 | 17415,24630 | 8707,62315 | 631,8054** |
| Temperatura (F2) | 3 | 202,56045 | 67,52015 | 4,8991** |
| Tempo (F3) | 1 | 13,91964 | 13,91964 | 1,0100ns |
| Int, F1xF2 | 6 | 439,64060 | 73,27343 | 5,3166** |
| Int, F1xF3 | 2 | 52,49542 | 26,24771 | 1,9045ns |
| Int, F2xF3 | 3 | 21,54956 | 7,18319 | 0,5212ns |
| Int, F1xF2xF3 | 6 | 139,76570 | 23,29428 | 1,6902ns |
| Tratamentos | 23 | 18285,17768 | 795,00773 | 57,6840** |
| Resíduo | 96 | 1323,08440 | 13,78213 | |
| Total | 119 | 19608,26208 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)

Apêndice D - Análise de variância para o inchamento volumétrico, linear, radial e tangencial entre os tratamentos.

| FV | GL | Valor de F | | | |
|------------------|----|-------------|--------------|------------|------------|
| | | Volumétrico | Longitudinal | Tangencial | Radial |
| Espécie (F1) | 2 | 120,5493** | 2,4753ns | 75,2382** | 124,4705** |
| Temperatura (F2) | 3 | 32,2520** | 0,8898ns | 18,9565** | 24,5518** |
| Tempo (F3) | 1 | 0,5241ns | 0,4586ns | 0,0139ns | 1,1518ns |
| Int, F1xF2 | 6 | 4,7602** | 0,5085ns | 2,3736* | 5,9442** |
| Int, F1xF3 | 2 | 7,7616** | 0,9855ns | 5,3902** | 3,1240* |
| Int, F2xF3 | 3 | 2,5813ns | 0,8394ns | 1,5712ns | 3,4903* |
| Int, F1xF2xF3 | 6 | 2,1163ns | 0,7856ns | 1,7468ns | 1,6553ns |
| Tratamentos | 23 | 17,5176** | 0,8840ns | 10,7642** | 16,7854** |

| | | | | |
|---------|-----|--|--|--|
| Resíduo | 96 | | | |
| Total | 119 | | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)

Apêndice E - Análise de variância da perda de umidade entre as espécies em sala de climatização a 20° C e 65% de UR.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|-------------|-----|------------|------------|------------|
| Tratamentos | 2 | 2774,93613 | 1387,46806 | 103,9172** |
| Resíduo | 117 | 1562,14559 | 13,35167 | |
| Total | 119 | 4337,08172 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

Apêndice F - Análise de variância para o ganho de umidade entre os fatores em estudo.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------------|-----|------------|-----------|-------------|
| Espécie (F1) | 2 | 375,586550 | 187,79325 | 1572,4841** |
| Temperatura (F2) | 3 | 431,90950 | 143,96983 | 1205,5293** |
| Tempo (F3) | 1 | 3,34668 | 3,34668 | 28,0234** |
| Int, F1xF2 | 6 | 153,41435 | 25,56906 | 214,1021** |
| Int, F1xF3 | 2 | 4,15649 | 2,07824 | 17,4021** |
| Int, F2xF3 | 3 | 2,23441 | 0,74480 | 6,2366** |
| Int, F1xF2xF3 | 6 | 9,80665 | 1,63444 | 13,6860** |
| Tratamentos | 23 | 980,45457 | 42,62846 | 356,9488** |
| Resíduo | 96 | 11,46476 | 0,11942 | |
| Total | 119 | 991,91933 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)

Apêndice G - Análise de variância para a umidade de equilíbrio entre os fatores em estudo.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------------|-----|------------|-----------|-----------|
| Espécie (F1) | 2 | 425,19063 | 212,59532 | 20,9803** |
| Temperatura (F2) | 3 | 1105,73050 | 368,57683 | 36,3735** |
| Tempo (F3) | 1 | 58,53430 | 58,53430 | 5,7765* |
| Int, F1xF2 | 6 | 71,77548 | 11,96258 | 1,1805 ns |
| Int, F1xF3 | 2 | 5,58560 | 2,79280 | 0,2756 ns |
| Int, F2xF3 | 3 | 3,06625 | 1,02208 | 0,1009 ns |
| Int, F1xF2xF3 | 6 | 39,08624 | 6,51437 | 0,6429 ns |
| Tratamentos | 23 | 1708,96900 | 74,30300 | 7,3327** |
| Resíduo | 96 | 972,77908 | 10,13312 | |
| Total | 119 | 2681,74808 | | |

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$)

ns: Não significativo ($p \geq 0,05$)