



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

ALINE SANTOS DAS NEVES

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* TRATADA
TERMICAMENTE**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2017



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

ALINE SANTOS DAS NEVES

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* TRATADA
TERMICAMENTE**

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

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2017

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* TRATADA
TERMICAMENTE**

ALINE SANTOS DAS NEVES

Monografia aprovada em 13 de novembro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Henrique Trevisan– UFRRJ
Membro

Msc. Juliana de Oliveira Lopes – UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais André e Bernadete e aos meus irmãos Flávia e Lucas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e sabedoria quando precisei, além de proteção e saúde.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por ter me proporcionado uma experiência única de ser ruralina, trazendo grandes vivências através das diferenças, contribuindo não só com o meu crescimento profissional como, principalmente, cultural e pessoal.

Ao professor Alexandre Miguel do Nascimento, por ter sido o idealizador da monografia, pela orientação, paciência e pela amizade que foi construída ao longo desses anos através de estágios, iniciações científica, artigos e por fim a monografia ao longo desses anos.

Aos membros da banca, Professor Henrique Trevisan e Doutoranda Juliana de Oliveira Lopes, pela contribuição valiosa nesse trabalho.

Ao Programa Ciências Sem Fronteiras pela oportunidade de estudar no exterior, acrescentando fundamentalmente na minha formação acadêmica.

Ao departamento de Produtos Florestais, que me acolheu e me ajudou com seus laboratórios e aparelhos para pesquisa.

Aos meus pais André e Bernadete por serem o pilar da minha existência, sem eles nunca teria conseguido alcançar mais essa etapa da minha vida. Meu pai por ser um grande professor e incentivador dos meus estudos e minha maior influência pelo meio ambiental e inspiração. E minha mãe por ser minha base, nunca me deixando faltar nada, sendo meu maior porto seguro.

Aos meus irmãos, Flavia e Lucas por todo o apoio e amizade.

Ao Luciano Durante pelo seu incentivo, paciência e principalmente força por me ajudar a seguir a diante e não me fazer desistir.

Aos grandes amigos que construí na turma da Engenharia Florestal 20012-I, Jean Andrade, Jessica Souza, Gabriela Alves, Avner Vianna, João Gabriel Gomes, Tamires Louise, Heron Casati, Aloísio Werneck, Fabyana Barbosa e Marcos Vinicius sem eles meu caminho seria muito mais difícil.

E a todos os outros amigos que construí pela rural, e as amigas de república que tive o prazer de conhecer nessa etapa final da graduação.

RESUMO

No Brasil as espécies de eucaliptos vêm substituindo várias nativas nas indústrias de serraria, que mesmo com os defeitos naturais ocorridos pelo clima tropical, são plausíveis de serem modificadas e melhoradas para o seu uso. O presente trabalho teve como objetivo analisar a madeira natural e a madeira de *Corymbia citriodora* submetidas à ação do calor pelo processo denominado “tratamento térmico”, conduzido em estufa elétrica laboratorial, com temperaturas de 160°, 180° e 200°C, sendo que as amostras foram cortadas transversalmente e denominadas como corte radial, tangencial e diagonal. Foi estudado o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas (densidade, ângulo de contato, absorção de água e defeitos), na alteração da cor original da madeira e nas propriedades mecânicas (resistência ao cisalhamento da madeira colada e sólida e o módulo de elasticidade na flexão). A densidade da madeira foi determinada segundo a NBR-7190 e os ensaios de cisalhamento seguiram a ASTM D905, para madeira colada e ASTM D143, para madeira sólida. O ângulo de contato foi determinado através do aparelho goniômetro DAS 100S Standard. Na avaliação de cor foi utilizado sistema CIE-L*a*b* com auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d. Para a absorção de água foi calculado o teor de umidade antes e após a imersão em água. A rigidez foi medida através do módulo de elasticidade em ensaio de flexão e os defeitos foram observados através das rachaduras e fissuras existentes. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura reduziu a densidade aparente da madeira, devido à perda de massa, provocando também o acréscimo da quantidade de rachaduras e fissuras nas células de raios, acarretando em uma maior taxa de absorção de água e conseqüentemente, reduzindo a resistência da madeira sólida no cisalhamento. Houve diminuição da resistência ao cisalhamento da madeira colada com o aumento da temperatura de tratamento. Na madeira colada, quando o plano de cisalhamento foi paralelo às fissuras radiais, houve substancial redução da resistência e quando o plano de cisalhamento foi perpendicular às fissuras, a redução da resistência foi menor. Na madeira sólida, houve uma maior redução da resistência no plano que obteve fissuras paralelas ao corte. A cor tende ao escurecimento, com a diminuição da luminosidade (L*) e cor amarela (b*). O ângulo de contato não foi muito afetado pelo tratamento térmico, o qual apresentou redução apenas na temperatura de 160°C. O módulo de elasticidade não foi afetado pelo tratamento térmico e sim pelo efeito de rachaduras, ocorrendo uma redução no plano radial. Concluindo que o tratamento térmico pode proporcionar consideráveis ganhos de acordo com a utilização da madeira no mercado.

Palavras-chave: físicas, rigidez, temperatura, cisalhamento, rachaduras.

ABSTRACT

In Brazil, eucalyptus species have been replacing several natives in the sawmill industries, which, even with the natural defects caused by the tropical climate, are plausible to be modified and improved for their use. The aim of the present work was to analyze the natural wood and wood of *Corymbia citriodora* submitted to the action of heat by the process called "heat treatment", conducted in a laboratory electric oven, with temperatures of 160 °, 180 ° and 200 ° C. the samples were cut transversely and denominated as radial cut, tangential and diagonal. The effect of heat treatment on the physical properties (density, contact angle, water absorption and defects), the alteration of the original wood color and the mechanical properties (shear strength of the bonded and solid wood and the modulus of elasticity in the flexion). The wood density was determined according to NBR-7190 and the shear tests follow ASTM D905 for bonded wood and ASTM D143 for solid wood. The contact angle was determined using the DAS 100S Standard goniometer. In the color evaluation, the CIE-L * a * b * system was used with the help of the CM 2600d portable spectrophotometer. For water absorption, the moisture content was calculated before and after immersion in water. The stiffness was measured through the flexural modulus of elasticity and the defects were observed through the existing cracks and cracks. The results showed that the increase in temperature reduced the apparent density of the wood, due to the loss of mass, also causing the increase of cracks and cracks in lightning cells, resulting in a higher rate of water absorption and, consequently, reducing the resistance of the solid wood in the shear. There was a decrease in the shear strength of the bonded wood with the increase of the treatment temperature. In the bonded wood, when the shear plane was parallel to the radial cracks, there was a substantial reduction of the shear plane and when the shear plane was perpendicular to the cracks, the resistance reduction was lower. In the solid wood, there was a greater reduction of the resistance in the plane that obtained cracks parallel to the cut. The color tends to darken, with the decrease of luminosity (L *) and yellow color (b *). The contact angle was not much affected by the heat treatment, which presented reduction only in the temperature of 160 ° C. The modulus of elasticity was not affected by the heat treatment but by the effect of cracking, with a reduction in the radial plane. Concluding that the heat treatment can provide considerable gains according to the use of wood in the market.

Keywords: physical, stiffness, temperature, shear, cracks.

Sumário

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Propriedades físicas.....	2
2.1.1. Densidade.....	2
2.1.2. Colorimetria.....	3
2.1.3. Ângulo de contato.....	3
2.1.4. Absorção de água.....	4
2.1.5. Defeito de tratamento térmico – rachadura.....	4
2.2 Propriedades mecânicas.....	4
2.2.1. Resistência ao Cisalhamento da madeira colada e sólida.....	4
2.2.2. Módulo de elasticidade.....	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1. Determinação da densidade aparente.....	8
3.2. Determinação da cor pelo sistema CIE-L*a*b*.....	8
3.3. - Avaliação da molhabilidade da interface água-madeira – ângulo de contato.....	9
3.4. Absorção de água.....	10
3.5. Defeitos das amostras da madeira de <i>Corymbia citriodora</i>	11
3.6. Colagem da madeira e seu Cisalhamento.....	11
3.7. Ensaio de flexão - avaliação da rigidez da madeira.....	14
3.8. Análises estatística.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1. Densidade.....	15
4.2. Determinação da cor pelo sistema CIE-L*a*b*.....	16
4.3. Ângulo de contato - Valores médios do ângulo formado pela gota em contato com a superfície da madeira.....	18
4.4. Absorção de água.....	21
4.5. Defeitos das amostras da madeira – rachadura.....	23
4.6. Resistência ao Cisalhamento.....	26
4.7. Avaliação da rigidez na flexão (MOE).....	28

5. CONCLUSÕES.....	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

LISTA DE TABELAS

		Pag.
Tabela 1	Delineamento experimental para testar o efeito dos planos de adesão das diferentes temperaturas de tratamento da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> .	10
Tabela 2	Valores médios da densidade da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> antes e após tratamento térmico e sua variação de densidade (delta) categorizada pelo plano de corte.	19
Tabela 3	Valores de coordenadas cromáticas a* e b* e da luminosidade L* da madeira <i>Corymbia citriodora</i> após tratamento térmico categorizado pelo plano de corte.	21
Tabela 4	Valores médios das propriedades da gota séssil em contato com a madeira <i>Corymbia citriodora</i> após tratamento térmico categorizada pelo plano de corte.	22
Tabela 5	Valores médios das propriedades da gota no contato inicial e final (aos 10 segundos e aos 80 segundos) após seu contato com a superfície da madeira <i>Corymbia citriodora</i> após tratamento térmico categorizada pelo plano de corte.	24
Tabela 6	Valores médios percentuais dos teores de umidade da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> , antes e após a imersão em água em função da temperatura de tratamento térmico, do plano de corte, e a respectiva taxa de absorção de água.	25
Tabela 7	Valores médios de rachaduras longitudinais e transversais presentes da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função da temperatura de tratamento e do plano de corte	27
Tabela 8	Valores médios do comprimento total de rachaduras transversais e longitudinais da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função do tratamento térmico e do plano de corte.	28
Tabela 9	Valores médios de resistência ao cisalhamento (kgf.cm ⁻²) da madeira sólida (SO) e colada (CO) de <i>Corymbia citriodora</i> em função da temperatura termicamente tratada e do plano de corte	30
Tabela 10	Valores médios de módulo de elasticidade (MPa) da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função da temperatura tratada termicamente e do plano de corte	33

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Planos de corte: (A) radial, (B) tangencial e (C) diagonal.	9
Figura 2: Mufla elétrica laboratorial Linn Elektro Therm.	10
Figura 3: Espectrofotômetro portátil CM 2600d da Konica Minolta.	12
Figura 4: Aparelho goniômetro DAS 100S Standard	13
Figura 5: Adaptação feita à máquina universal de ensaios mecânicos, com capacidade de 30 toneladas, onde são prensadas as juntas.	15
Figura 6: Dimensões do corpo de prova para o teste de cisalhamento à compressão paralela às fibras na linha de cola segundo a norma ASTM D905 (1994).	16
Figura 7: Dimensões do corpo de prova para o teste de <i>cisalhamento</i> de madeira sólida segundo a norma ASTM D143 (1994)	17
Figura 8: Cisalhamento perpendicular à linha de cola dos planos de corte radial (A), tangencial (B) e diagonal (C).	17
Figura 9: Relação do ângulo de contato em contato com amostras de madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em diferentes temperaturas e planos de corte.	23
Figura10: Relação da umidade antes e após a imersão de água das amostras em relação à temperatura e o plano de corte	26
Figura11: Relação do comprimento total de rachaduras com a temperatura aplicadas nas amostras da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> .	28
Figura 12: Da esquerda para direita: Peças de madeiras não tratadas, tratadas a 160°, 180° e 200°C respectivamente da madeira de <i>C. citriodora</i> , no plano tangencial, radial e diagonal de cima para baixo na face transversal.	29
Figura 13: Relação da tensão da madeira sólida e colada de <i>Corymbia citriodora</i> ao entrar em contato com as temperaturas, em função do plano de cortes.	32
Figura 14: Valores médios dos módulos de elasticidade da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função da temperatura termicamente tratada e do plano de corte.	34

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as espécies de eucalipto vêm substituindo várias nativas nas indústrias de serraria, pois possuem um crescimento rápido e de boa aparência, com características físicas e mecânicas desejáveis e plausíveis de serem melhoradas, sendo uma ótima alternativa para o mercado madeireiro. (GONCALEZ, 2006).

O Brasil possui grandes ataques de fungos e insetos visto que é um país tropical, causando deterioração da madeira e perda de suas propriedades mecânicas. Um método de preservação da madeira são os biocidas que possuem um aumento no custo inicial, porém o mesmo precisa ser diluído para obter eficiência na durabilidade da madeira (REZENDE, NASCIMENTO E OLIVEIRA 1993).

Entretanto, vários trabalhos têm demonstrado as melhorias que o tratamento térmico agrega às propriedades da madeira, sendo elas, principalmente, a estabilidade dimensional e a durabilidade natural em relação ao ataque de agentes biológicos (GARCIA et al., 2012; ESTEVES et al., 2007; KAMDEM et al., 2002; VIITANIEMI; JÄMSÄ, 1994). A madeira tratada termicamente apresenta a vantagem de ser livre da utilização de materiais, os quais são potencialmente prejudiciais para seres humanos e animais domésticos (HILL, 2006).

Durante o tratamento térmico a madeira sofre alterações em suas estruturas devido a ação pelo qual se encontra em faixas de temperaturas inferiores a 280°C, temperatura na qual se inicia a combustão espontânea da madeira (BORGES; QUIRINO, 2004).

O tratamento térmico depende de diversos fatores que afetam as propriedades da madeira, tais como: temperatura, tempo, taxa de crescimento e do material, teor de umidade da madeira e da espécie em razão dos seus caracteres anatômicos específicos (KAMDEM e PIZZI, 2002). Madeiras tratadas com temperaturas superiores a 150°C sofrem alterações físicas permanentes (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007; YILDIZ; GEZER, 2006).

Esse tratamento melhora na qualidade da madeira, trazendo benefícios como a estabilidade dimensional, dureza superficial e ligação com adesivos hidrofóbicos, há redução do teor de umidade de equilíbrio melhorando as propriedades de inchamento, menor variação dimensional agregando valor ao produto comercial e aumento da atratividade em relação ao escurecimento da cor (MOURA; BRITO, 2011).

O tratamento térmico aplicado às temperaturas elevadas causam alterações na estrutura interna da madeira, ocasionando perda de resistência, há o aumento da fragilidade e da degradação, tornando-se mais quebradiças em relação às madeiras não tratadas. Contudo, dependendo da finalidade da madeira, os parâmetros do tratamento devem ser otimizados e balanceados para reduzir essa perda, enquanto melhoram outras propriedades (PONCSAK et al., 2006).

A madeira de Eucalipto pela grande variedade de espécies que o gênero apresenta, atende às mais variadas exigências quanto às propriedades mecânicas. De fato, existem diversos estudos realizados que mostram suas qualidades mecânicas (CRUZ et al., 2003). Mas Nunes (2009) relata que poucos são estudados no Brasil em relação ao tratamento térmico da madeira, mesmo com seus benefícios comprovados por pesquisadores na Europa.

Um dos estudos feitos por Pincelli et al (2002) mostra que, o grau de redução das propriedades mecânicas é dependente da madeira utilizada no tratamento, da temperatura máxima alcançada no processo, e do tempo exposição ao calor. Visto que quanto maior for a temperatura utilizada, maiores serão as variações nas propriedades da madeira.

Com isso, o objetivo desse estudo é analisar a densidade, a cor, ângulo de contato, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e defeitos da madeira de *Corymbia*

citriodora após o tratamento de diferentes ações térmicas referentes aos planos de corte radial, tangencial e diagonal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O tratamento térmico melhora o comportamento higroscópico, a estabilidade dimensional, alterações de cor e a resistência biológica da madeira (KORKUT, 2012; ALMEIDA et al., 2009; RATNASINGAM; IORAS, 2012; BAL & BEKTAS, 2012), em detrimento das propriedades mecânicas (GARCIA et al., 2012; DUNDAR et al., 2012; CADEMARTORI et al., 2012).

Segundo Wangaard (1950), a degradação da madeira ocorre por meio da temperatura e também mais facilmente na presença de água líquida e vapor, onde possui alta umidade relativa, isso ocorre porque a hemicelulose e celulose são despolimerizadas via hidrólise ácida, sendo esta a principal causa de perda da resistência à degradação por estes polímeros.

Na presença de alta taxa de umidade, os grupos acetilas são quebrados mais facilmente e formado o ácido acético, o qual é responsável pela degradação da madeira. Deve-se, no entanto, considerar que o excesso de água reduz a quantidade de oxigênio no ar, podendo retardar a reação da hidrólise (SEVERO; TOMASELLI, 2003).

Calonengo (2014), estudando propriedades físicas das madeiras juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis*, observou que a influência do tratamento térmico no lenho juvenil foi menor do que no lenho adulto e ocasionou uma maior uniformização nas propriedades físicas entre esses dois tipos de lenho da madeira.

2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas da madeira são também referidas por alguns autores como propriedades não-mecânicas – “non mechanical properties” (PANSHIN; De ZEEUW, 1980).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), todas as propriedades físicas da madeira são praticamente determinadas por fatores inerentes à sua organização estrutural tais como: a quantidade de matéria da parede celular por unidade de volume; a quantidade de água presente na parede celular; o arranjo dos componentes na parede celular e nos tecidos; o tipo e tamanho do arranjo das células presentes nos tecidos.

2.1.1. Densidade

A densidade é a propriedade mais usada para avaliar a qualidade da madeira e estimar análises de povoamento de florestas, visto que possui fácil determinação e tem uma relação próxima com a maioria das características da madeira. Ferreira (1968), utilizou a densidade básica da madeira em seus estudos sobre melhoramento como índice para selecionar árvores matrizes da espécie de *Eucalyptus*.

Apesar de sua importância, a densidade básica da madeira não pode ser considerada como um índice isolado de qualidade da madeira. Também devem ser levados em consideração fatores como as características anatômicas e a composição química (WENZL, 1970; BRASIL et al., 1977).

2.1.2. Colorimetria

Segundo Lucas et al. (1996), a cor e sua percepção são extremamente importantes na vida humana. É a impressão visual que as pessoas têm de um produto e que vai trazer sucesso ou não do mesmo. Tornando assim, necessário e importante saber a exatidão da cor.

A cor pode ser definida de várias formas devido ao seu caráter abstrato. É uma característica de objetos que refletem radiação na faixa visível. E, também, uma sensação criada pela radiação e interpretada ou lembrada pelo homem e alguns seres vivos (SILVA, 2004).

Para o ser humano, através de seu olho, a cor será percebida pela emissão, reflexão ou transmissão da radiação eletromagnética, na faixa visível de 380 a 780nm, de um objeto (REGULA, 2004). No espectro visível, destacam-se sete cores que refletem a luz em intervalos de comprimento de onda característicos conhecidos como domínios da cor.

De acordo com Mori et al. (2005), as características estéticas da madeira como o desenho e sua homogeneidade têm influenciado significativamente nos preços da madeira e na comercialização de diversos produtos, tais como móveis e laminados decorativos.

Segundo Ayadiet al. (2003), o processo de tratamento térmico pode alterar a cor da madeira de *Eucalyptus*, fazendo com que esta se aproxime das madeiras de maior valor de mercado. Este processo é muito utilizado no exterior, principalmente no EUA e na Europa, onde o tratamento térmico é utilizado para o escurecimento de madeiras claras, desvalorizadas comercialmente, tornando-as mais próximas da cor das madeiras tropicais, as quais são mais escuras e de alto valor comercial. Esse processo é denominado “tropicalização” e vem ganhando destaque em virtude do seu caráter pouco poluente.

2.1.3. Ângulo de contato

De acordo com Berg (1993), a molhabilidade pode ser definida como interações moleculares entre líquidos e sólidos em contato direto na interface. A molhabilidade em madeira tem sido estudada com finalidade de aperfeiçoar os processos que envolvem a aplicação de produtos de acabamento e a colagem de superfícies (ROWELL, 2005; AYRILMIS et al., 2009).

A molhabilidade pode ser avaliada pela medida do ângulo de contato (θ) da interação física entre a superfície da madeira e a água. Devido à existência da energia livre superficial dos átomos que compõem a madeira, a adesão de um material sobre outro será tanto maior quanto maiores forem as energias de superfícies envolvidas (FOWKES, 1964; WU, 1971; JOHNSON & DETTRE, 1993; GENNES et al., 2003; ROURA & FORT, 2004; BURKARTER, 2010).

A molhabilidade da madeira depende de vários fatores: espécies, teor e natureza dos extrativos, estrutura anatômica, teor de umidade, temperatura e rugosidade superficial (MALDAS; KANDEM, 1999).

Entre as mudanças químicas na madeira após o tratamento térmico, podemos destacar a degradação das hemiceluloses, mudanças na estrutura da lignina tendo sua reticulação com os produtos da degradação térmica, modificações da celulose (degradação da região amorfa e aumento d cristalinidade) (BHUIYAN E HIRAI, 2000). Volatilização dos extrativos originais e formação dos novos compostos, como os compostos fenólicos (ESTEVEES et al, 2011). Portanto, várias reações químicas ocorrem durante o tratamento térmico, como hidrólise, oxidação (POPESCU E POPESCU, 2013), causando a redução de grupos hidroxilas livres e a

inativação da superfície. A inativação superficial afeta a molhabilidade que desempenha um papel importante nos processos de aderência e revestimento (tinta e vernizes).

2.1.4. Absorção de água

A madeira é um material higroscópico, que ganha e perde água de acordo com a umidade relativa do local que estará presente, com isso, ocorre alterações dimensionais que se tornam fatores limitantes para determinados fins de certas espécies. Tendo em vista, torna-se necessário os tratamentos físico-químicos que possam reduzir essas alterações dimensionais ocasionadas pelo inchamento e contração resultante da água presente na parede celular, ou seja, na perda ou ganho de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (Forest Products Society, 1999).

Syrjanen (2001) afirma que a propriedade mais importante da madeira tratada termicamente é o menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico, o que, conseqüentemente, reduz as variações dimensionais (contração e inchamento) do material, quando comparada a madeira não tratada.

O teor de umidade é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade de celulose, hemicelulose e lignina presente na madeira. (FOELKEL et al. 1971).

Segundo Esteves e Pereira (2009), a degradação das hemiceluloses, e a evaporação dos extrativos naturais são as principais razões para a redução da massa específica da madeira. Durante o tratamento térmico, há uma perda de umidade de aproximadamente 30% de massa constituída pelos subprodutos, provenientes da degradação da madeira e da umidade contida na mesma.

2.1.5. Defeito de tratamento térmico – rachadura

De acordo com Unsal e Ayrilmis (2005) e Pincelli, et al (2002), a redução das propriedades mecânicas dependem da espécie escolhida, da temperatura máxima usada no processo e no tempo de exposição ao calor. Com isso, quanto maior a temperatura de uso, menor será essa resistência e maior será a fragilidade do material, afetando sua característica física, causando rachaduras, visto que se tornam quebradiças em relação as madeiras não tratadas

Segundo Neves (2017), a queda brusca de resistência na madeira de *C. citriodora*, pode ocasionar danos anatômicos principalmente em altas temperaturas, dentre elas destacam-se as fissuras paralelas aos raios e teoricamente perpendicular ao plano de corte

2.2 Propriedades mecânicas

2.2.1. Resistência ao Cisalhamento da madeira colada e sólida

A espécie de *Corymbia* tem sido bastante procurada para uso de construções. Em São Paulo 81% das madeiras usadas para estrutura em construção civil, são provenientes de espécies de reflorestamento (WWF, 2011).

Segundo Nunes (2012), o tratamento térmico pode ser uma forma de se melhorar as propriedades adesivas em espécies de reflorestamento que possuem alta densidade, uma vez

que há o aumento da porosidade da madeira e conseqüentemente a facilitação da adesão por ancoramento, apesar da sensível redução de algumas propriedades mecânicas. Observou-se ainda que, o tratamento térmico reduziu a resistência ao cisalhamento da madeira juvenil sólida e colada de eucalipto. Foi observado que a madeira tratada é menos higroscópica, o que pode alterar a distribuição e a penetração do adesivo (SERNEK et al., 2008).

Tienne et al. (2008), contribuíram com informações de adesão com madeiras nativas e de reflorestamento quando expostas a serviço externo, sujeito a intempérie ambientais, usando adesivo estrutural (resorcinol) composto com tanino. Nascimento et al. (2013) focaram também seus estudos quanto a adesão de madeira de reflorestamento, espécies do gênero *Corymbia* e do gênero *Pinus*.

Moura et al. (2012), em estudo com madeira de reflorestamento observou que madeira de *Eucalyptus grandis*, quanto à resistência ao cisalhamento e na flexão, obteve maiores alterações de resistência e especificamente na compressão, foi pouco afetado pelo efeito de tratamentos térmicos.

As madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* apresentam altas densidades (DOMBRO, 2010; IPT, 1989) e teores de extrativos elevados (COSTA et al., 1997), que comprometem a penetração do adesivo, e por serem madeiras que apresentam instabilidade dimensional, comprometem a integridade da linha de cola com o passar do tempo (FPL, 2010; SERNEK ET AL. 2008). Sendo assim, madeiras mais estáveis, proporcionariam um melhor desempenho ao adesivo devido ao menor estresse causado pela maior estabilidade dimensional.

Dentre os componentes estruturais, o principal componente da parede celular é a celulose, um polímero linear de grau de polimerização elevado, responsável por grande parte das propriedades da madeira. As hemiceluloses são polímeros ramificados com grau de polimerização baixo e que funcionam como um material de enchimento na qual está imersa a celulose. O último componente estrutural é a lignina, uma substância amorfa com estrutura tridimensional que é responsável pela rigidez da parede celular e conseqüente resistência mecânica (MORAIS et al., 2005).

Entre os constituintes da madeira, as hemiceluloses têm demonstrado serem menos estáveis, por isso, podem ser facilmente degradadas nos estágios iniciais do aquecimento, resultando em perda direta da resistência da madeira. Essa perda de resistência das hemiceluloses na ação de temperaturas elevadas deve-se à ausência de cristalinidade, baixa massa molecular, configuração irregular e ramificada, o que facilita a absorção de água e, conseqüentemente, a degradação (SEVERO; TOMASELLI, 2003).

A degradação de hemicelulose também tem sido proposta como o principal fator para a perda de resistência mecânica da madeira, bem como a cristalinidade da celulose amorfa (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

O menor conteúdo de umidade de equilíbrio pode afetar positivamente as propriedades de resistência da madeira tratada, mas esse efeito é superado pela degradação dos componentes químicos da madeira (AZEVEDO; QUIRINO, 2006). Porém, os resultados demonstram que o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira é, até o momento, contraditório em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura, sendo essa divergência nos resultados relacionada principalmente às diferentes formas de condução dos tratamentos (AZEVEDO; QUIRINO, 2006).

2.2.2. Módulo de elasticidade

A caracterização elástica da madeira de *Corymbia citriodora* é apresentada por Ballarin e Nogueira (2003), onde são avaliados os módulos de elasticidade nas direções paralela e normal às fibras, bem como diversos coeficientes de Poisson da madeira. Para as demais espécies de eucalipto não foram encontrados registros científicos nacionais da determinação das características elásticas.

Segundo Neves (2015), o tratamento térmico não afeta o módulo de elasticidade nos planos de corte tangencial e diagonal, já no plano radial ocorreu a redução de elasticidade quando a madeira foi exposta a temperatura acima de 180°C.

Moura et al. (2012), em estudo com madeira de reflorestamento, observou que madeira de *Eucalyptus grandis* com 18 anos de idade teve alterações das propriedades mecânicas, quando submetidas a tratamento térmico, revelando uma melhoria da rigidez da madeira, na ausência de oxigênio, à medida que se aumentava a temperatura em 200°C.

De acordo com Unsal, et al. (2003), em relação às propriedades de resistência, ao se considerar a utilização de tratamentos prolongados manifesta-se um menor efeito sobre o módulo de elasticidade e, maior sobre a resistência ao impacto e à flexão estática (MOR).

Segundo Silva et al (2008) as mudanças ocorridas na estrutura da madeira a temperaturas inferiores a 160°C são desprezíveis. Vernois (2000) explica que, dependendo da espécie, as propriedades mecânicas com a utilização de tratamentos a temperaturas de até 210°C permanecem próximas das originais, no entanto, na temperatura de 230°C são observados decréscimos nos módulos de ruptura (MOR), que podem chegar perto de 40%, tornando a madeira mais frágil e quebradiça. Em espécies de maiores massa específicas, essa redução é mais acentuada devido à tendência do tratamento térmico induzir a formação de rachaduras nas peças.

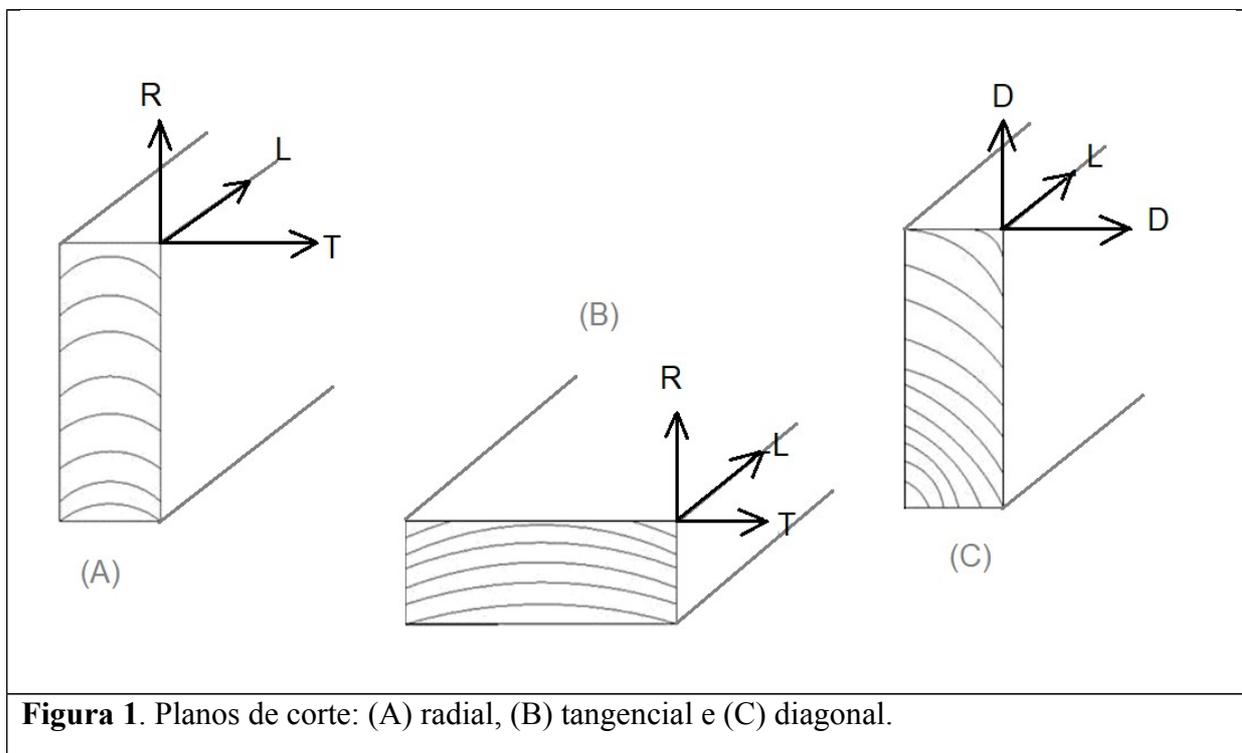
3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas árvores de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson com aproximadamente 60 anos de idade provenientes de plantios localizados no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica-RJ. As toras obtidas foram desdobradas em pranchões com 3,6m x 0,07 x 0,40 m, e armazenadas em ambiente climatizado, devidamente tabicadas, com umidade relativa média de 65% e temperatura média de 20°C. Depois de climatizado o material, foram produzidas amostras com dimensões de 350 x 60 x 21 mm (comprimento x largura x espessura), cortadas transversalmente com planos denominados de radial, tangencial e não ordenado (diagonal). Após a confecção das amostras, as mesmas foram novamente climatizadas em ambiente com umidade e temperatura controlada. Após o equilíbrio, foram pesadas e medidas as suas dimensões e calculada a densidade aparente. Com isto foi escolhido as amostras de forma sistemática, garantindo que os grupos de amostram tivessem a densidade aparente média equivalente e assim evitar a densidade como covariável.

O delineamento experimental foi estabelecido de modo a avaliar o efeito de diferentes temperaturas de tratamento térmico associado a diferentes planos de corte (radial, tangencial e diagonal) da madeira de *Corymbia citriodora* (ver Figura 1 e Tabela 1) nas suas propriedades físicas.

As amostras denominadas Radiais (A) foram aquelas que tiveram os raios paralelos a maior dimensão da sessão transversal, as tangenciais (B) tiveram os raios perpendiculares a

maior dimensão da sessão transversal, as diagonais (C) os raios tiveram angulação oblíqua entre as duas dimensões da seção transversal.



A madeira de citriodora foi tratada termicamente a 160°, 180° e 200°C e um lote não tratado destinado a controle. Para cada tratamento foram utilizadas 4 amostras, gerando um total de 48 amostras, combinação entre as temperaturas de tratamento e os diferentes cortes transversais da madeira, foram usadas quatro amostras.

Tabela 1 – Delineamento experimental para testar o efeito dos planos de adesão das diferentes temperaturas de tratamento da madeira de *Corymbia citriodora*.

Tratamento Térmico	Plano radial	Plano tangencial	Plano diagonal
Não tratada	T1	T2	T3
160°C	T4	T5	T6
180°C	T7	T8	T9
200°C	T10	T11	T12

O tratamento térmico foi realizado em um forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, com as seguintes dimensões 60 x 60 x 70 cm e equipado com um sistema de controle de temperatura e tempo (Figura 2).



Figura 2. Mufla elétrica laboratorial Linn Elektro Therm.

O tratamento térmico foi realizado em quatro etapas, sendo elas: 1) aquecimento do material até 100°C para eliminação completa da água durante 120 minutos; 2) aumento da temperatura de 100°C até a temperatura de tratamento térmico desejado (160, 180 ou 200°C) durante 60 minutos; 3) tempo de permanência na temperatura de tratamento térmico (90 minutos); e 4) resfriamento do material.

Após o tratamento térmico, as amostras foram recondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% UR até atingirem o teor de umidade de equilíbrio e utilizadas para a determinação das propriedades e avaliações.

Após o tratamento térmico todas as amostras foram reprocessadas, redimensionadas e padronizadas em dimensão final de 320 x 55 x 19 mm (comprimento x largura x espessura). E foram novamente medidas e pesadas para que a densidade aparente fosse recalculada.

3.1. Determinação da densidade aparente

A densidade aparente foi determinada segundo a norma NBR- 7190. Foram tomadas as dimensões e pesos das amostras para a determinação das densidades aparentes antes e após o tratamento térmico. As amostras foram deixadas em ambiente climatizado com temperatura de 20°C +/- 2°C e umidade relativa média de 65°.

$$d = \frac{m}{v}$$

Onde: M= massa (peso); V= volume da amostra.

3.2. Determinação da cor pelo sistema CIE-L*a*b*

As análises volumétricas foram realizadas com o auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d versão 1.41, da Konica Minolta Sensing, isso no espaço de cor L*a*b* CIE 1976 segundo a norma ISO 11664-4:2008. O sistema L*a*b* CIE 1976 é caracterizado por três

coordenadas ($L^*a^*b^*$) em um espaço de cor tridimensional em que a L^* representa a luminosidade, a qual varia de zero (preto) à 100 (branco) enquanto que a^* e b^* representam as coordenadas cromáticas, ambas variando entre -60 e +60. No diagrama de cromaticidade, os sinais positivos e negativos significam aumento na tonalidade vermelha ($+a^*$), aumento na tonalidade verde ($-a^*$), aumento na tonalidade amarela ($+b^*$) e aumento na tonalidade azul ($-b^*$) (KONICA MINOLTA, 1998).

As medições de cor foram feitas através do contato direto entre a superfície selecionada da amostra, em pontos pré-determinados, e a área de iluminação do aparelho. As amostras foram divididas em 5 partes, com 4 pontos de medições por parte, totalizando 20 observações por amostra. Os parâmetros utilizados foram iluminante padrão D65, ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. O aparelho foi calibrado com o padrão preto e branco, sendo que para a calibração do branco, utiliza a placa CM-A145.

Amostras denominadas radiais, tiveram cor determinada na face radial-longitudinal, as denominadas tangenciais, tiveram cor determinada na face tangencial-longitudinal e as denominadas diagonais, tiveram a cor determinada na face dia diagonal-longitudinal (figura 1).

Os dados coletados pelo espectrofotômetro foram então transferidos para o software Spectra Magic NX™ (Konica Minolta) e então exportados para o software Microsoft Office EXCEL para análise posterior.



3.3. - Avaliação da molhabilidade da interface água-madeira – ângulo de contato

A molhabilidade e a higroscopicidade das superfícies da madeira e não tratada foi avaliada pela determinação da taxa de absorção e do ângulo de contato utilizando um sistema de análise de formato da gota Drop Shape Analysis DAS 100, versão 1.92 da KRÜSS GmbH (Hamburg, Alemanha). O sistema de análise é composto por três componentes: (1) uma mesa de suporte para fixação da amostra; (2) um sistema de vídeo com câmera, um sistema óptico, um prisma padrão de formato para determinação do ângulo de contato e uma fonte de iluminação e abertura; e (3) um sistema dosador que pode ser controlado manualmente ou com o auxílio do software DSA1. O software DSA1 permite gravar as imagens de vídeo e

determinar a taxa de absorção e o ângulo de contato, o qual é definido como uma medição quantitativa da molhabilidade da superfície do material. Quanto menor o ângulo de contato maior foi a molhabilidade da superfície e a energia superficial do material analisado, superfícies com ângulos de contato de 0° apresentam uma molhabilidade completa enquanto que uma superfície completamente hidrofóbica apresenta um ângulo de 180° . A molhabilidade é explicada pelas forças de coesão (líquido-líquido) e adesão (sólido-líquido). Uma forte adesão e fraca coesão diminuem o ângulo de contato e promovem a molhabilidade completa da superfície do material sólido e vice-versa.

As análises foram realizadas em ambientes climatizado em que se utilizou água destilada como líquido teste, uma seringa dosadora de 100 ml, agulha com 0,5 mm de diâmetro e distância entre a ponta da agulha e a superfície do material de 25 ml. Foram efetuadas medições a cada 10 segundos durante 80 segundos, totalizando as leituras de ângulo de contato para cada gota depositada na superfície. Esse procedimento foi feito em 10 pontos distintos e pré-definidos da amostra, o que resultou em 10 observações de ângulo de contato por amostra. Foram utilizadas 4 amostras para cada tratamento. A partir desses dados, foram consideradas três variáveis: ângulo de contato inicial = 10s, ângulo de contato final = 80s e ângulo de contato médio = media das leituras efetuadas em cada ponto de amostra ao longo de 80 segundos.

A superfície usada para aplicação da gota foi em face longitudinal-tangencial para planos de corte radiais, longitudinal-radial para plano de corte tangenciais e longitudinais-diagonais para plano de corte diagonais (Figura 1).

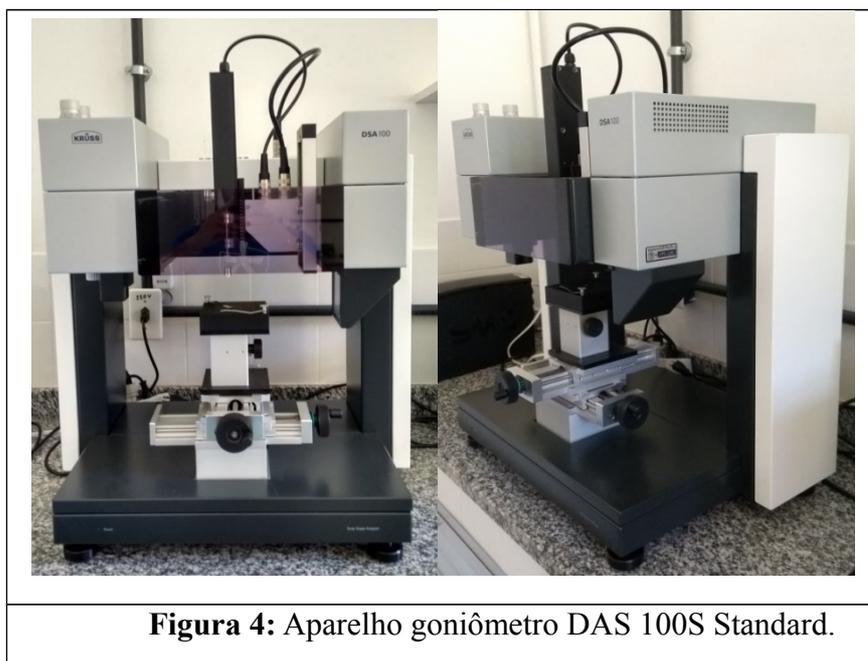


Figura 4: Aparelho goniômetro DAS 100S Standard.

3.4. Absorção de água

As amostras foram todas pesadas antes da imersão em água, logo após isso foram imersas em água para saturação completa e pesadas novamente. A seguir, as amostras foram secas em estufa a temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ aproximadamente, onde foram armazenadas

até a massa permanecer constante e retomadas para pesagem para a determinação da massa seca (PS). O teor de umidade máximo (TU) foi calculado em relação à base seca:

$$TU(\%) = \frac{PF - PS}{PS}$$

Onde: Tu: teor de umidade; PF: massa saturada; PS: massa seca.

Assim, pode-se calcular o teor de umidade das amostras antes e após imersão em água. Deste modo pode-se calcular a taxa de absorção (TA) de água que madeira tratada em diferentes temperaturas pode conter.

$$TA (\%) = TU_{\text{apos}} (\%) - TU_{\text{antes}} (\%)$$

3.5. Defeitos das amostras da madeira de *Corymbia citriodora*

Após a retirada das amostras da mufla foram avaliadas a rachaduras decorrentes do tratamento térmico assim como da secagem da madeira em estufa e foram determinadas através do valor médio da frequência de rachaduras e fissuras presentes nas faces transversais e longitudinais pelo número de amostras denominadas radial, tangencial e diagonal.

Também foram avaliadas o valor médio do comprimento das rachaduras, tanto transversais como longitudinais, que é a razão entre a soma do comprimento das rachaduras pelo número de amostras radiais, tangenciais e diagonais.

3.6. Colagem da madeira e seu Cisalhamento

Antes da colagem das juntas de madeira, realizou-se uma classificação visual das amostras, sendo selecionadas aquelas livres de defeitos tais como rachaduras, empenamentos e superfícies contaminadas por extrativos (bolsões de resina). Em seguida, as amostras foram desempenadas e aplainadas.

Após a seleção de amostras, foram feitas as combinações dos pares de amostras através da densidade do corpo de prova de cada amostra, pareando aquelas com densidades mais próximas possíveis.

Para a colagem das juntas das amostras de madeira não tratadas termicamente e tratadas termicamente à 160°, 180° e 200°C, foi utilizado o adesivo PVA, o qual foi aplicado à temperatura ambiente de 22°C, com o auxílio de um rolo de espuma, onde utilizou-se uma taxa de espalhamento de 250 g/m², a mesma foi aferida através da pesagem, antes e após a disposição do adesivo.

A prensagem foi realizada através de uma adaptação feita à máquina universal de ensaios mecânicos da CONTENCO, com capacidade de 30 toneladas, disponível no Laboratório de ensaios Físicos-Mecânicos da Madeira (DPF, IF, UFRRJ). Para efetuar a prensagem das juntas, foram utilizadas duas peças de madeira livre de defeitos como empenamentos e/ou rachaduras, cujas dimensões foram de 6,5 x 20 x 45 cm (espessura x largura x comprimento) (Figura 5). As peças de madeira foram ligadas através de quatro eixos rosqueados dispostos nas extremidades. A pressão aplicada foi de 10 kgf.cm⁻². Em seguida, as

juntas foram armazenadas em um ambiente à 20°C e umidade relativa por um período de 24 horas.



Figura 5 - Adaptação feita à máquina universal de ensaios mecânicos, com capacidade de 30 toneladas, onde são prensadas as juntas.

No total foram colocados 24 pares de juntas de madeira. Para a prensagem, as juntas de madeira foram dispostas da seguinte forma: entre a primeira e a segunda peça de madeira foram colocados 12 pares de juntas e, esse procedimento foi repetido duas vezes.

A qualidade de adesão das madeiras não tratada e tratada termicamente à 160, 180 e 200°C foi avaliada através da resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola e na madeira sólida.

As amostras de madeira colada foram preparadas de acordo com as dimensões estipuladas pela norma ASTM D905 (1994) tal como apresentada na Figura 6. E também foram comparadas com amostras de madeira sólida não tratadas e tratadas termicamente à 160, 180 e 200°C. Os testes mecânicos foram realizados em máquina de ensaio universal com capacidade de 300 kN.

Quanto à madeira sólida, as mesmas foram coladas e compostas por duas peças radial-radial, tangencial-tangencial e diagonal-diagonal. E após coladas foram cisalhadas sempre perpendicular o plano de colagem (figura 8), para avaliar a resistência da madeira sólida tratadas e não tratadas termicamente a 160, 180 e 200°C. As dimensões das amostras de madeira sólida foram definidas segundo a norma ASTM D143 (1994), apresentada na figura 7.

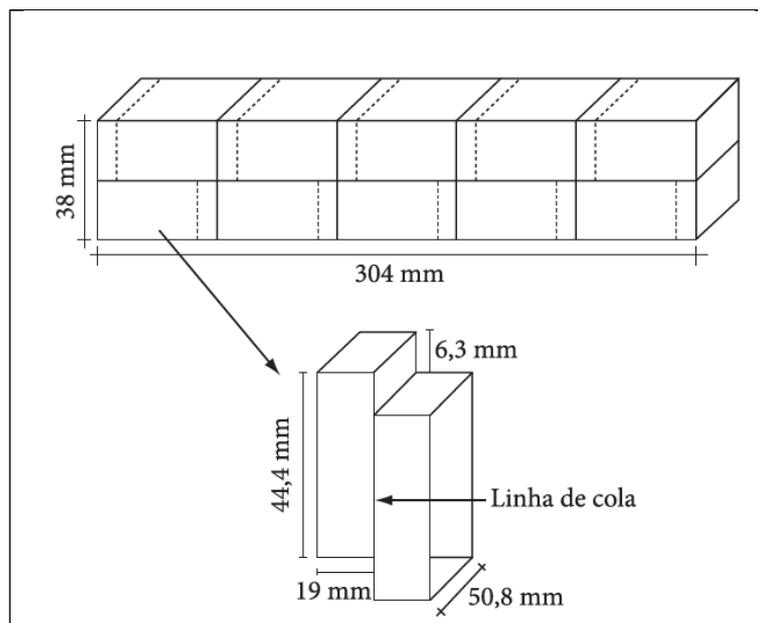


Figura 6- Dimensões do corpo de prova para o teste de cisalhamento à compressão paralela às fibras na linha de cola segundo a norma ASTM D905 (1994).

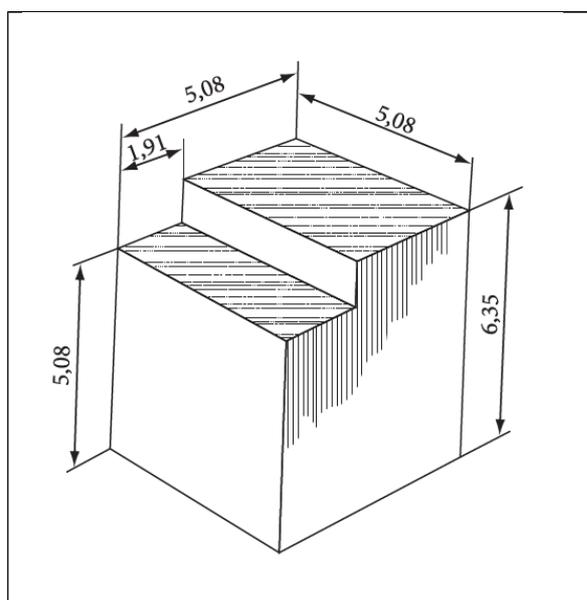
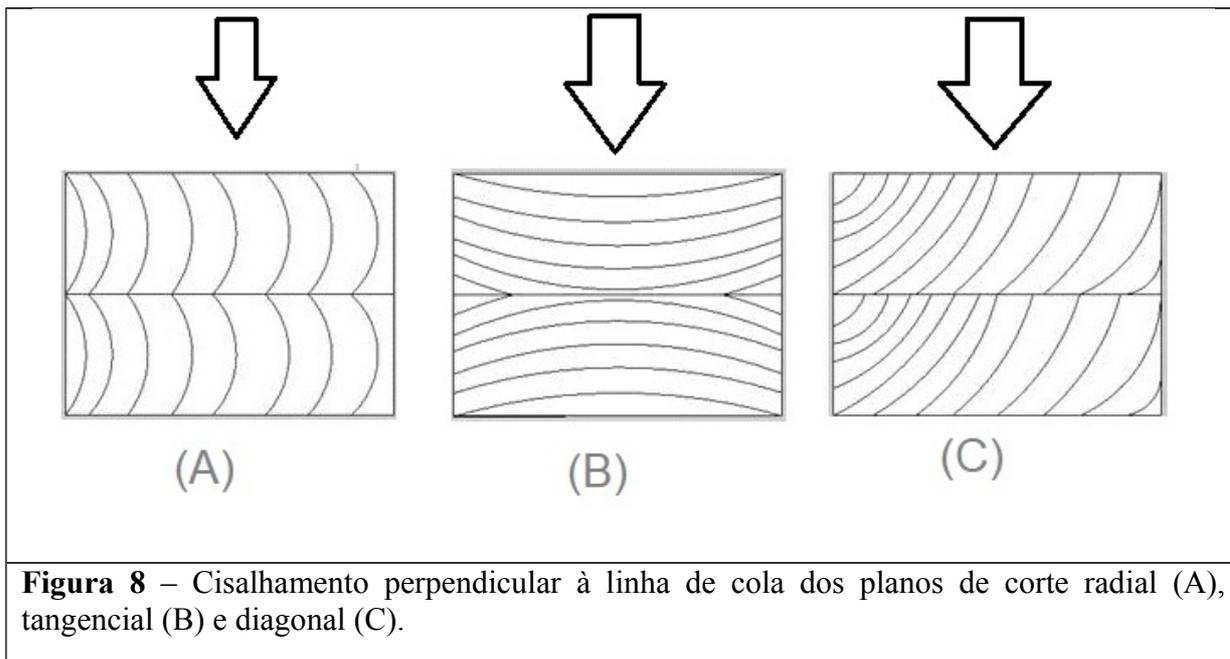


Figura 7- Dimensões do corpo de prova para o teste de cisalhamento de madeira sólida segundo a norma ASTM D143 (1994).



A determinação da tensão resistente ao cisalhamento foi estabelecida pela equação, a seguir, tanto para madeira colada, ou denominada sólida. :

$$f_v = \frac{P_{\text{máxima}}}{A}$$

onde: f_v = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa); $P_{\text{máxima}}$ = carga máxima aplicada até ruptura (N); e A = área da seção cisalhante (mm²).

3.7. Ensaio de flexão - avaliação da rigidez da madeira

As amostras com dimensões finais de 19 x 54 x 315 mm (espessura x largura x comprimento), antes de serem prensadas e coladas, foram avaliadas segundo a rigidez. Na determinação da rigidez, foi medido o módulo de elasticidade em ensaio de flexão, ensaio a 3 pontos, a um ponto de aplicação de carga e dois pontos de apoio (reação). As amostras foram testadas, com a menor inércia, com vão de 350 mm e relação h/l igual a aproximadamente 15 vezes. Devido relação h/L menor que 21 vezes e conseqüentemente a influência significava das forças cortantes no deslocamento das amostras, foi então utilizada a equação abaixo para determinar o módulo de elasticidade.

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} + 1,2 \frac{PL}{4Gbh}$$

Onde: P é a carga aplicada para gerar um deslocamento (δ) de 1,75mm. L é o vão da viga ou distância entre os apoios; G é o módulo de rigidez, E é o módulo de elasticidade e I é a inércia da seção transversal; h é espessura da amostra e b é a largura.

3.8. Análises estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa STATISTICA 7.0, sendo todos os testes analisados à 95% de probabilidade. A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias através do teste de Levene.

As coordenadas de cor (L^* , a^* e b^*) e os ângulos de contato e volumes entre 10s e 80s foram analisadas através do teste de sinais, a fim de identificar as diferenças significativas entre as médias de cada tratamento antes e após a o tratamento térmico. Para verificar as diferenças significativas entre as médias das variações de ângulo de contato e volume das variações das coordenadas colorimétricas (ΔL^* , Δa^* , Δb^*), aplicou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, já que estas variáveis não apresentaram distribuição normal, mesmo após a transformação dos dados.

Para avaliar a densidade e o modulo de elasticidade, as quais apresentaram uma distribuição normal dos dados, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) e aplicou-se o teste de Tukey, em nível de 5% de significância para verificar as diferenças significativas entre as médias dos tratamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade

O tratamento térmico não apresentou efeito na densidade da madeira de citriodora. Apesar disso, em todos os planos a densidade mostrou-se decrescente com o aumento da temperatura. Entretanto, no plano diagonal, o tratamento térmico foi significativo, causando redução na densidade, essa redução foi representativa de 5,5%. Esses resultados já eram esperados segundo Brito et al (2006) que diz que a densidade da madeira tratada termicamente tende a diminuir ao comparar com a densidade da madeira não tratada.

Notou-se que quanto maior a temperatura tratada, maior foi à variação da densidade, se tornando significativamente diferentes em relação a cada temperatura, visto que em média a 160°C foi 1,63%, 180°C foi 6,43% e a 200°C foi 11,23%. Segundo Nunes (2012) as variações de densidade ($\Delta DENS$) aumentaram com a temperatura usada no tratamento, onde a 180°C houve redução de 8,6% e a 200°C a redução foi 11,6%.

Comparando os planos de corte em cada faixa de temperatura, no radial a 160°C ocorreu maior variação com 2,6%, na temperatura de 200°C a maior variação ocorreu no plano diagonal com 12,6%, porém não houve diferença significativa nessas temperaturas. Já na temperatura de 180°C as variações mesmo que semelhantes entre os planos houve uma redução significativa em relação ao plano diagonal com 6,3%.

Comparando a variação da densidade no material tratado, observou-se em todos os planos de corte, que os níveis de perda de massa foram distintos, em cada nível de

temperatura testada. Pela estatística, a redução da densidade com o tratamento térmico só foi significativa no plano diagonal.

Tabela 2- Valores médios da densidade da madeira de *Corymbia citriodora* antes e após o tratamento térmico e sua variação de densidade (delta) categorizada pelo plano de corte.

Tratamento	Radial			Tangencial			Diagonal		
	Antes (g/cm ³)	Depois (g/cm ³)	Delta %	Antes (g/cm ³)	Depois (g/cm ³)	Delta %	Antes (g/cm ³)	Depois (g/cm ³)	Delta %
Não tratada	1,04			1,03			1,05		
160°C	1,048	1,021	2,6aA	1,037	1,022	1,5aA	1,039	1,031	0,8aA
180°C	1,042	0,978	6,5bA	1,039	0,975	6,6bA	1,054	0,992	6,3bB
200°C	1,05	0,945	11,1c A	1,059	0,963	10,0c A	1,058	0,94	12,6c A
Média	1,045	0,996	6,8	1,041	0,998	6,0	1,05	1,004	6,5

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, mostram diferenças significativas entre temperaturas de tratamentos e letras maiúsculas, entre diferentes planos, na mesma temperatura, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Analisando o gênero *Eucalyptus*, Hillis (2006), Barrichello & Brito (1976) sugeriram cautela no uso da densidade básica da madeira como critério de qualidade para caracterização de espécies em razão das diferenças anatômicas existentes entre as mesmas. Silva (2002), estudando árvores de *E. grandis* com idades de 25 anos constatou que a densidade básica média madeira foi de 0,55 g/cm³. Estudando a espécie de citriodora, notou-se uma densidade média alta de 1,045 g/cm³, comparada as demais espécies de eucalipto. O tratamento térmico facilitou o manuseio dessa madeira potencializando sua utilidade.

4.2. Determinação da cor pelo sistema CIE-L*a*b*

Os resultados obtidos para as variáveis colorimétricas no espaço L* a* b* da madeira tratada termicamente e controle de *Corymbia citriodora* foram apresentados na Tabela 3.

Em relação à luminosidade, notou-se que, quanto maior a temperatura usada no tratamento térmico, menor foi o grau de luminosidade na madeira (tabela 3). Em relação ao plano tangencial, a luminosidade se tornou significativamente menor nas temperaturas mais elevadas, a 180°C e a 200°C, já nos planos radial e diagonal, a redução ocorreu a partir da temperatura a 160°C. Observou-se que o plano tangencial foi mais resistente a alteração de luminosidade. A maior redução da luminosidade ocorreu no plano diagonal na temperatura de 200°C, portanto esse plano tornou-se mais escuro. Segundo Chen et al. (2012), a descoloração da madeira durante o tratamento térmico foi decorrente das reações de condensação e oxidação, principalmente.

Não ocorreu um padrão de comportamento entre os diferentes planos e houve pequenas variações entre os valores médios, com a temperatura. Observou-se que a coordenada a* no plano radial apresentou aumento da pigmentação vermelha a partir da temperatura de 180°C, já nos planos tangencial e diagonal não houve um padrão de

comportamento, com o aumento da temperatura. Ao analisar todas as temperaturas, notou-se que o plano diagonal manteve a média mais baixa em relação à cor vermelha.

Já a coordenada cromática b^* (amarelo-azul) possuiu valores altos dentro da sua faixa, visto que a madeira foi mais amarelada, entretanto a mesma foi perdendo sua pigmentação ao entrar em contato com temperaturas mais altas, ocorrendo a perda de padrão “amarelado”. No plano tangencial houve uma diminuição significativa a partir da temperatura de 180°C, nos planos radial e diagonal a mudança já ocorreu na temperatura de 160°C. Em relação aos planos, o plano diagonal foi o que teve queda significativa em relação a cor amarela, e portanto, esse plano tende a ser mais escuro.

Para a madeira de citriodora original, a coordenada L^* apresentou valores entre 70,32 e 70,80, enquanto que para as madeiras tratadas termicamente a 180°C e 200°C, os valores de L^* foram de 54,14 e 40,59, respectivamente, correspondendo à decréscimos de 23 e 43% na luminosidade (NUNES, 2012). Observou-se que o trabalho a redução de L^* foi de 26,15%; 31,69% e 30,34% nas temperaturas de 180°C nos respectivos planos tangencial, radial e diagonal. Já na temperatura de 200°C, essas reduções foram representativas de 32,9%; 32,40% e 45,9%, respectivamente nos planos tangencial, radial e diagonal.

A redução no valor da coordenada L^* após os tratamentos térmicos indica o escurecimento da madeira, comportamento esse observado por vários autores para madeiras de diferentes espécies (ESTEVES et al, 2007; PONKSAC et al, 2006)

Houve reduções de 15,17%; 16,52% e 22,33% na coordenada b^* a 180°C nos respectivos planos, tangencial, radial e diagonal. Na temperatura a 200°C houve reduções de 19,61%; 18,7% e 45,69% nos respectivos planos de corte, tangencial, radial e diagonal. No trabalho de Nunes (2012) encontrou valores entre 20,76 e 22,12. Após os tratamentos térmicos a 180°C e 200°C, os valores de b^* foram de 22,52 e 17,43, respectivamente. Esses valores mostram um aumento de 8,5% na tonalidade amarela da madeira quando tratada a 180°C e um decréscimo de 21% quando tratada a 200°C.

Houve também os fenômenos que levam a alteração de cor, tais como: formação de grupos cromóforos, formação de produtos oxidativos (quinonas), volatilização ou migração dos extrativos em direção à superfície da madeira. (FENGEL E WEGENER, 1984).

Tabela 3 - Valores das coordenadas cromáticas a* e b* e da luminosidade L* da madeira *Corymbia citriodora* após tratamento térmico categorizado pelos planos de corte.

Tratamento	Luminosidade – L*							
	tangencial		radial		diagonal			
NT	63,12 ^(438,27)	a B	65,02 ^(400,44)	a A	64,99 ^(400,50)	a A		
160°C	52,15 ^(299,41)	a A	53,13 ^(279,58)	b A	46,2 ^(227,93)	b B		
180°C	46,61 ^(178,19)	b A	44,41 ^(137,62)	c B	45,27 ^(220,22)	b B		
200°C	42,32 ^(98,19)	b B	43,95 ^(124,34)	c A	35,15 ^(71,64)	c C		

Tratamento	Coordenada cromática – a*							
	tangencial		radial		diagonal			
NT	9,18 ^(152,47)	c A	8,72 ^(106,43)	b A	8,14 ^(176,38)	b A		
160°C	10,49 ^(313,34)	a A	9,08 ^(147,81)	b B	8,77 ^(280,75)	a B		
180°C	9,68 ^(220,37)	b B	10,95 ^(313,69)	a A	8,81 ^(286,74)	a B		
200°C	10,68 ^(320,83)	a A	10,45 ^(279,05)	a A	8,05 ^(187,50)	b B		

Tratamento	Coordenada cromática – b*							
	tangencial		radial		diagonal			
NT	23,65 ^(347,57)	a A	23,97 ^(355,70)	a A	23,24 ^(394,01)	a A		
160°C	23,49 ^(337,08)	a A	21,23 ^(224,45)	b B	18,49 ^(234,70)	b C		
180°C	20,06 ^(178,03)	b A	20,01 ^(192,96)	bc A	18,05 ^(214,01)	b B		
200°C	19,01 ^(151,40)	b A	19,48 ^(153,95)	c A	12,62 ^(76,53)	c B		

Valores entre parêntesis são as médias dos postos calculados pelo método de Kruskal-Wallis. As letras minúsculas distintas mostram diferenças estatísticas entre diferentes tratamentos, no mesmo plano de corte e letras maiúsculas distintas entre diferentes planos de corte na mesma temperatura de tratamento, pelo teste de média de Dunn, ao nível de 5% de significância. NT são amostras controle ou não tratadas.

4.3. Ângulo de contato - Valores médios do ângulo formado pela gota em contato com a superfície da madeira

Notou-se que no plano radial, o ângulo de contato da madeira não tratada foi maior que a madeira tratada e tende a diminuir ao entrar em contato com superfícies que foram tratadas a temperaturas mais elevadas. O que pode explicar a tendência dos resultados sobre a redução do ângulo foi a maior quantidade de rachaduras ocorridas com o aumento da temperatura, que fez com que a gota escoasse rapidamente para a parte interna da madeira.

Já nos planos tangencial e diagonal, houve uma queda no valor dos ângulos de contato nas amostras que foram tratadas à temperatura de 160° em relação às amostras não tratadas, e que ao entrar em contato com as temperaturas de 180° e 200° os ângulos tornam-se ainda

maiores. Ao observarmos a média total, notou-se que os ângulos são maiores no plano diagonal. O que pode explicar o comportamento diferenciado nos diferentes planos é a porosidade, pois a mesma varia com a direção da grã, sendo maior no sentido paralelo a grã (direção longitudinal) que no sentido perpendicular a grã (direção tangencial e radial).

Tabela 4 - Valores médios das propriedades da gota séssil em contato com a madeira *Corymbia citriodora* após tratamento térmico categorizado pelo plano de corte.

Plano de corte	Temperatura	Angulo	Volume	Área	Diâmetro
		(°)	(ul)	(mm ²)	(mm)
		Medi a	Medi a	Media	Medi a
Radial	Ambiente – NT	73,62	11,00	19,68	4,02
	160°	70,83	11,31	20,17	4,18
	180°	71,95	12,98	22,01	4,33
	200°	72,75	12,23	20,94	4,16
Tangencial	Ambiente – NT	71,16	10,94	19,70	4,12
	160°	69,73	13,84	23,17	4,51
	180°	74,71	14,26	23,18	4,37
	200°	76,56	14,17	22,96	4,30
Diagonal	Ambiente – NT	76,10	10,76	19,06	3,92
	160°	75,70	14,39	23,31	4,36
	180°	75,05	14,43	23,64	4,36
	200°	79,75	14,33	23,01	4,22

Na figura 9, pôde-se observar a interação entre o ângulo de contato com a superfície da madeira tratada em diferentes temperaturas e planos de corte. Sendo que no plano diagonal, observou-se que o ângulo tende a diminuir conforme o aumento de temperatura, elevando se apenas ao entrar em contato com a temperatura de 200°C. No plano tangencial observou-se que o ângulo de contato tende a cair quando a madeira é exposta a temperatura de 160°C e tende a aumentar bruscamente em temperaturas mais elevadas. Já no plano radial, houve uma queda do ângulo de contato ao entrar em contato com amostras a 160°C e tende a aumentar gradativamente em maiores temperaturas.

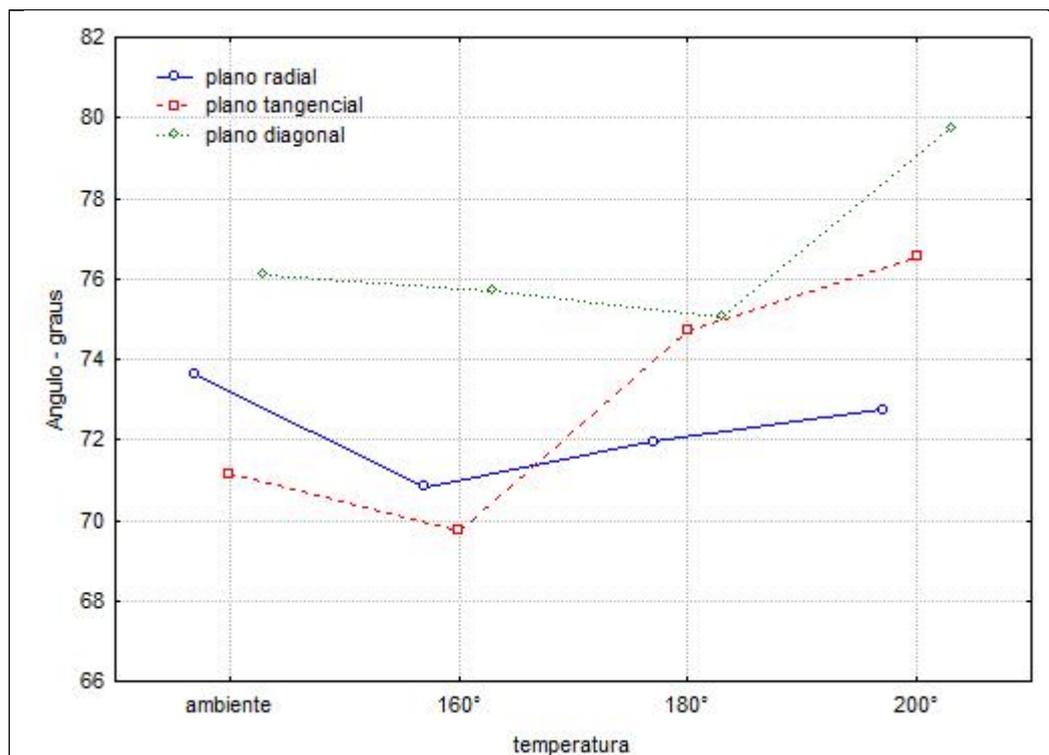


Figura 9 – Relação do ângulo de contato em contato com amostras de madeira de *Corymbia citriodora* em diferentes temperaturas e planos de corte.

Na tabela 5 foi estudado o comportamento do ângulo de contato aos 10 segundos e notou-se que não houve diferença significativa entre os planos de corte radial e diagonal quando expostos a temperaturas diferentes, já no plano tangencial, houve diferença na temperatura de 160°C, apresentando relativamente um ângulo menor que as demais. Já em relação às temperaturas, não houve muita diferença significativa entre os planos de corte, se destacando somente na temperatura de 200°C em que o plano diagonal teve um maior ângulo em relação aos outros planos de corte.

Observou-se no comportamento do ângulo de contato aos 80 segundos e constatou-se que não houve significância em relação aos planos de corte radial e diagonal quando exposto a diferentes temperaturas, já no plano tangencial houve uma significância na temperatura de 200°C, apresentando um valor maior em relação as demais temperaturas.

Nota-se que não houve muita diferença entre o volume da gota aos 10s e a gota aos 80s, sendo algumas até constantes. Sendo que para este intervalo, o volume foi significativamente maior no plano diagonal.

Tabela 5 - Valores médios das propriedades da gota no contato inicial e final (aos 10 segundos e aos 80 segundos) após seu contato com a superfície da madeira *Corymbia citriodora* após tratamento térmico categorizada pelo plano de corte.

Tratamento	angulo 10								
	Radial			Tangencial			Diagonal		
Ambiente - NT	79,99 ^(4,38)	a	A	76,85 ^(4,34)	ab	A	81,34 ^(4,40)	a	A
160°	75,71 ^(4,33)	a	AB	74,11 ^(4,30)	b	A	81,43 ^(4,40)	a	B
180°	77,2 ^(4,34)	a	A	81,45 ^(4,39)	a	A	79,87 ^(4,38)	a	A
200°	76,93 ^(4,34)	a	A	81,25 ^(4,40)	a	AB	84,5 ^(4,43)	a	B

tratamento	volume 10								
	Radial			Tangencial			Diagonal		
Ambiente - NT	11,27	a	A	10,83	a	A	10,87	a	A
160°	11,32	ac	B	13,94	b	A	14,39	b	A
180°	13,32	b	A	14,43	b	A	14,17	b	A
200°	12,94	bc	A	14,15	b	A	14,22	b	A

Tratamento	angulo 80								
	Radial			Tangencial			Diagonal		
Ambiente - NT	69,95	a	AB	68,18	a	A	73,68	a	B
160°	67,94	a	AB	67,31	a	B	72,76	a	A
180°	68,89	a	A	71,75	ab	A	72,46	a	A
200°	70,39	a	A	74,15	b	AB	77,12	a	B

Tratamento	volume 80								
	Radial			Tangencial			Diagonal		
Ambiente - NT	10,89	a	A	10,75	a	A	10,65	a	A
160°	11,22	ac	B	13,69	b	A	14,36	b	A
180°	12,74	bc	B	14,05	b	AB	14,35	b	A
200°	12,78	bc	B	14,15	b	AB	14,26	b	A

Obs. Valores entre parêntesis são as médias dos postos calculados pelo método de Kruskal-Wallis. As letras minúsculas mostram entre diferentes tratamentos, no mesmo plano de corte e letras maiúsculas entre diferentes planos de corte na mesma temperatura de tratamento, pelo teste de Dunn, ao nível de 5% de significância. NT são amostras controle ou não tratadas.

4.4. Absorção de água

A Tabela 6 mostrou a relação da umidade das amostras antes e após a imersão por 24 horas, assim como a taxa de absorção de água, após este período. Antes da imersão das amostras a umidade de equilíbrio foi determinada à temperatura de 20°C e a umidade relativa

a 65%. A umidade de equilíbrio diminuiu gradativamente com o aumento da temperatura de tratamento, para todos os planos de corte.

As amostras após o contato da água possuíram bem mais umidade que as amostras medidas antes dessa imersão, não havendo interferência das temperaturas e planos de corte.

Os resultados mostraram que houve uma queda da taxa de absorção de umidade nas madeiras tratadas a 160°C, nos planos diagonal e radial, já que quando a madeira é exposta ao calor há a degradação da celulose e/ou hemicelulose, e conseqüentemente menor fixação de moléculas de água na parede celular.

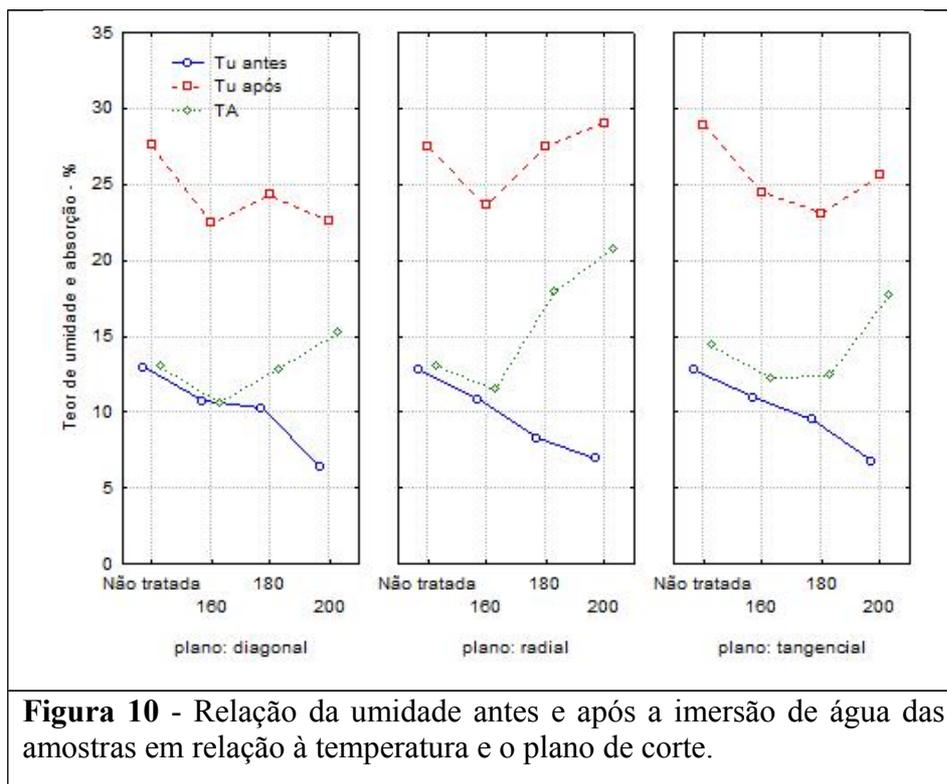
Nas temperaturas de 180°C e 200°C, observou-se um aumento na taxa de absorção de umidade em relação aos planos de corte, fato este pode ser explicado pela maior quantidade e intensidade de rachaduras apresentadas nesta faixa de temperaturas, principalmente no plano radial, o que permitiu que a água tivesse acesso, em 24 horas, a tecidos localizados em maior profundidade da madeira e não apenas na superfície (ver Figura 9).

Awoyemi & Jones (2011) e Boonstra et al (2006) retratam que após o tratamento térmico a parede dos traqueídeos, tecido dos raios e as pontuações areoladas aspiradas foram degradadas. A degradação das pontuações ampliou as aberturas nas paredes celulares. Esses fatores contribuíram para o aumento do volume de vazios ou porosidade e conseqüentemente para a redução da densidade da madeira.

Tabela 6 - Valores médios percentuais dos teores de umidade da madeira de *Corymbia citriodora*, antes e após a imersão em água em função da temperatura de tratamento térmico, dos planos de corte, e a respectiva taxa de absorção de água.

Plano de corte	Temperatura de tratamento (°C)											
	Ambiente - NT			160°			180°			200°		
	Após	Ante	TA	Após	Ante	TA	Após	Ante	TA	Após	Ante	TA
Diagonal	27,6	12,9	14,7	22,4	10,7	11,7	24,3	10,3	14,0	22,5	6,4	16,1
Radial	27,5	12,8	14,7	23,6	10,9	12,7	27,5	8,3	19,2	29,1	6,9	22,2
Tangencia l	28,9	12,7	16,2	24,5	10,9	13,6	23,1	9,5	13,6	25,6	7,1	18,5

O teor de umidade antes da imersão em água tende a diminuir com o aumento de temperatura. Não sendo proporcional a tendência ocorrida no teor de umidade após a imersão em água, onde mostrou-se um maior teor à temperatura de 200°C. Com isso a taxa de absorção tende a ser maior em amostras com temperaturas maiores visto que teve maior entrada de água, sendo menor apenas na temperatura de 160°C. Essa tendência analisada ocorreu nos três planos de cortes estudados.



Apesar das vantagens estéticas, a madeira termicamente tratada apresentou perda de massa, a qual afetou a sua densidade e, conseqüentemente, as suas propriedades mecânicas. Vários trabalhos estudados por Hakkowet al. (2005) e Garcia et al. (2012) mostraram que ocorreu uma perda de massa progressiva, com o aumento do tempo e da temperatura de aquecimento. Entretanto, a perda de massa e a redução da densidade e da resistência mecânica da madeira também dependem da espécie e do teor de umidade.

4.5. Defeitos das amostras da madeira – rachadura

Pôde-se analisar a presença de rachaduras nas amostras estudadas. Onde em todos os planos, houve maiores quantidades de rachaduras transversais, especialmente sobre os raios da madeira.

No plano diagonal, houve pouca quantidade de rachaduras, possuindo praticamente a mesma quantidade de rachaduras transversais nas diferentes temperaturas. Nas amostras não tratadas não ocorreram rachaduras longitudinais, e conforme a temperatura aumenta, elas tendem a aumentar sua frequência.

Já no plano radial os dois tipos de rachaduras aumentaram conforme o aumento da temperatura, sendo que na transversal tende a ser maior que a longitudinal. Devendo-se provavelmente à dificuldade de penetração do adesivo na estrutura das madeiras, as quais apresentaram altas densidades e, conseqüentemente, baixa porosidade.

No plano tangencial apresentou pouca rachadura longitudinal nas amostras não tratadas termicamente e essas rachaduras foram aumentando conforme o aumento da temperatura, sendo proporcionais às rachaduras longitudinais as quais foram aumentando com

o acréscimo da temperatura. Em relação a todos os tratamentos, o plano tangencial a 200°C foi o que mais apresentou rachadura.

Enfatizando as amostras não tratadas foram colocadas em estufa, assim como as demais amostras, com teor de umidade bem próximo ao ponto de saturação das fibras e foram secas plenamente em estufa. As rachaduras das amostras não tratadas surgiram neste momento de secagem em estufa, sendo que no plano radial as amostras foram propensas às rachaduras nas células de raio. Destaca-se ainda que, as rachaduras tangenciais do material não tratado apresentam pequena dimensão em comprimento e em profundidade.

De acordo com Unsal e Ayırmis (2005) e Pincelli et al (2002), quanto maior a temperatura utilizada, menor será a resistência mecânica da madeira e maior a sua fragilidade, tornando-se quebradiças em relação às testemunhas. Verificou-se que a resistência não depende somente da temperatura, mas também do tipo de rachadura referente ao plano de corte das amostras.

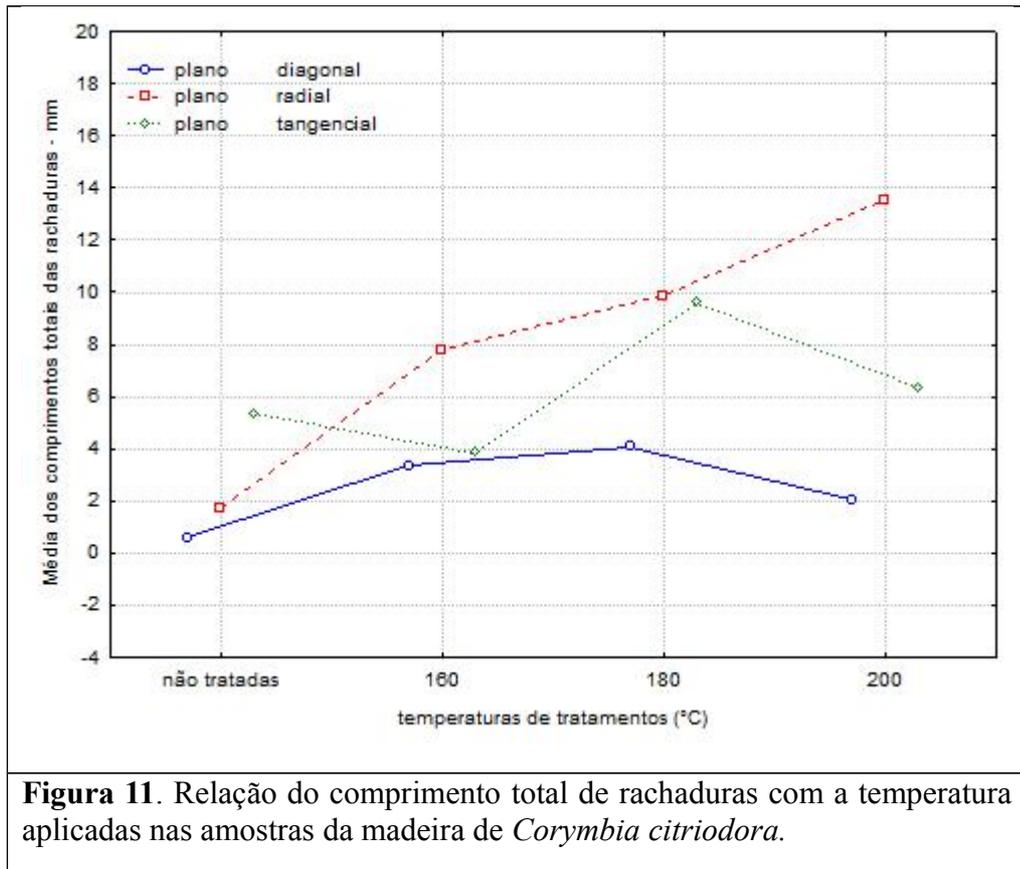
Tabela 7- Valores médios de rachaduras longitudinais e transversais presentes da madeira de *Corymbia citriodora* em função da temperatura de tratamento e do plano de corte

Plano de Corte	Temperatura (°C)							
	Ambiente		160		180		200	
	T	L	T	L	T	L	T	L
Diagonal	0,92	0,08	1,60	0,50	1,83	0,83	1,58	0,75
Radial	2,40	0,50	2,33	1,56	3,25	2,25	3,60	3,00
Tangencial	1,58	0,67	4,40	0,80	3,75	2,50	10,00	1,83

As amostras com plano radial possuíram maior comprimento de rachaduras, e elas aumentaram conforme a elevação de temperatura, sendo os maiores comprimentos em 200°C. Já as amostras diagonais quase não tiveram rachaduras, tendo menor quantidade em relação aos demais planos de corte, havendo uma quando exposta a 200°C. E por fim, as amostras tangenciais tiveram um nivelamento de rachaduras, apresentando diminuições e aumentos em relação a cada temperatura (Figura 11 e 12).

Tabela 8 - Valores médios do comprimento total de rachaduras transversais e longitudinais da madeira de *Corymbia citriodora* em função do tratamento térmico e do plano de corte

Plano de Corte	Temperatura (°C)			
	Não tratada	160	180	200
Diagonal	0,58	3,34	4,08	2,05
Radial	1,72	7,78	9,85	13,54
Tangencial	5,33	3,85	9,59	6,33



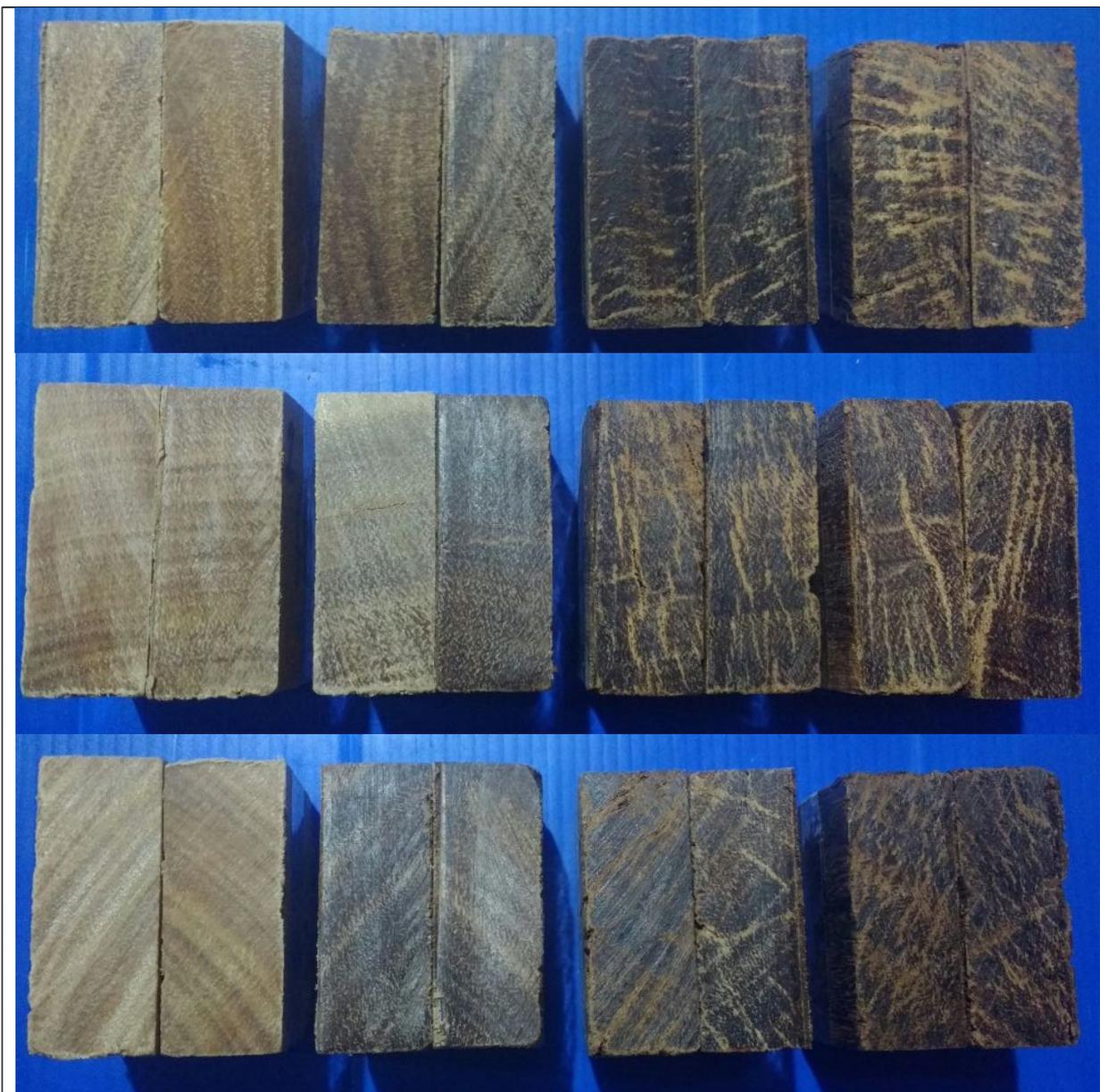


Figura 12. Da esquerda para direita: Peças de madeiras não tratadas, tratadas a 160°, 180° e 200 °C respectivamente da madeira de *C. citriodora*, no plano de corte tangencial, radial e diagonal de cima para baixo na face transversal.

4.6. Resistência ao Cisalhamento

Observou-se que na madeira colada houve queda de tensão resistente quando a mesma foi tratada a 160 °C, e após esta temperatura, houve pouca variação na resistência, esse fato foi verificado em todos os planos de corte. Os resultados permitem afirmar que a madeira tratada teve sua resistência ao cisalhamento da linha de cola reduzida à metade quando comparada à madeira não tratada.

Já na madeira sólida, analisou-se uma queda gradativa na resistência conforme o aumento da temperatura, sendo que a resistência ao cisalhamento foi maior nos planos radial e

tangencial. No plano diagonal, a resistência ao cisalhamento da madeira de citriodora diminuiu gradativamente conforme o aumento da temperatura, tendo início a partir de 160 °C.

Observou-se que no plano radial houve redução de 50,6% e de 62,1% a 180°C e 200°C respectivamente. No plano tangencial a redução foi de 64,3% e de 76,52% a 180°C e 200°C, respectivamente. Estes resultados são diferentes aqueles citados pela FTA (2003), o qual cita que a resistência ao cisalhamento da madeira tratada termicamente pode apresentar reduções de até 25% na direção radial e 40% na direção tangencial para madeiras tratadas à altas temperaturas (230 °C por 4 horas) e de até 20% nas direções radial e tangencial para madeiras tratadas à temperaturas mais baixa (190 °C). logo, as reduções dos valores foram maiores do que os citados pela FTA, nas temperaturas mais elevadas (180° e 200°C).

Tabela 9 - Valores médios de resistência ao cisalhamento (kgf.cm⁻²) da madeira sólida (SO) e colada (CO) de *Corymbia citriodora* em função da temperatura termicamente tratada e do plano de corte

Plano de Corte	Temperatura de tratamento (°C)							
	Não tratada		160		180		200	
	SO	CO	SO	CO	SO	CO	SO	CO
Diagonal	145,25	40,14	116,15	12,99	96,59	14,25	68,32	15,47
Radial	203,96	42,57	175,58	20,78	102,35	19,29	77,18	17,80
Tangencial	162,40	44,13	59,82	19,97	57,92	20,31	38,13	14,66

No plano radial, o tratamento a 160°C não reduziu a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, entretanto, para aquelas tratadas a 180°C e 200°C houve uma redução significativa da resistência. No plano tangencial e com tratamento de 160°C houve uma tendência à redução da resistência, sendo observadas as maiores reduções de resistência ao cisalhamento.

Estes resultados corroboram com aqueles citados pela FTA (2003), o qual afirma que a resistência ao cisalhamento da madeira tratada termicamente pode apresentar reduções de até 20% na direção radial, sendo que a redução chegou a 13,9%. Já na direção tangencial para madeiras tratadas à temperaturas inferiores a 190°C não foram válidas, visto que as reduções citadas variam de até 20%, e as reduções apresentadas chegaram até 63,16%.

Nas temperaturas mais baixas (190 °C), foram citadas pela FTA (2003) reduções de até 20% nas direções radial e tangencial. O que tornou os resultados apresentados neste trabalho foram superiores, visto que chegaram a mais de 30%. Os planos radial e diagonal se encontram na faixa de 13,9% a 20%.

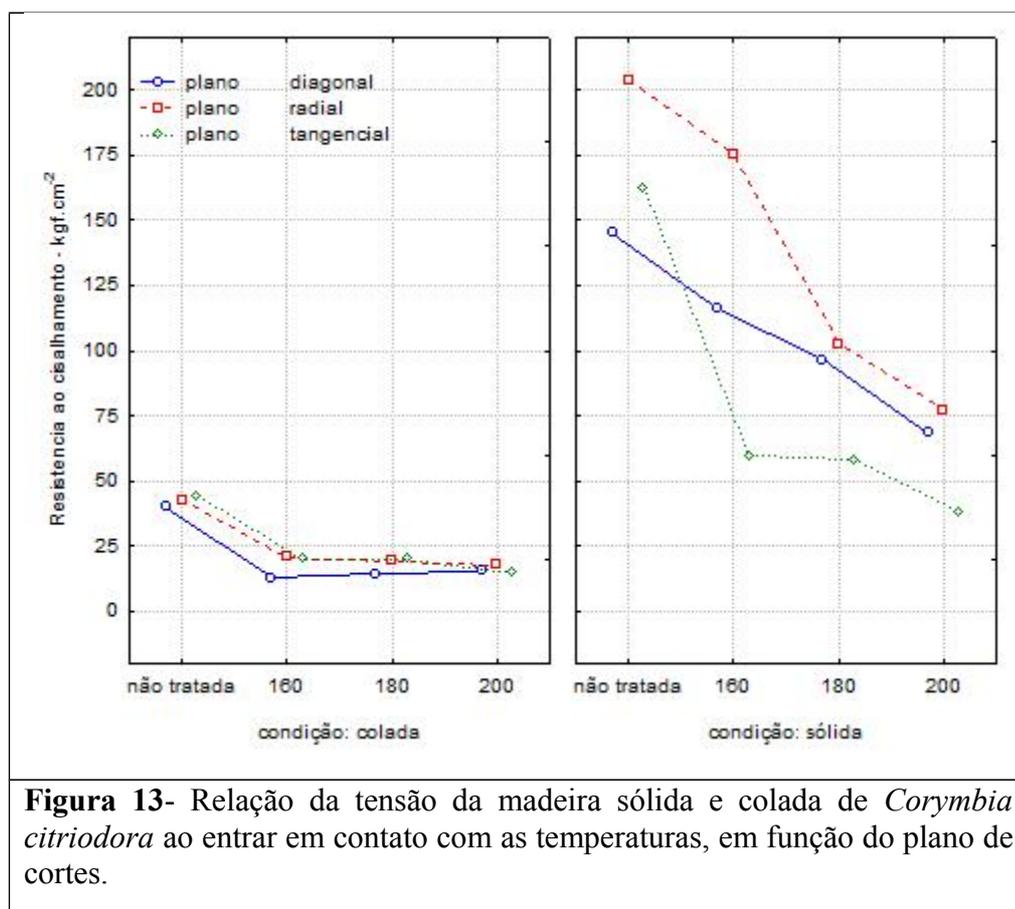
As amostras, quando ensaiadas, tiveram plano de corte paralelo às células de raio, as mesmas células possuem formato de paliça e com paredes celulares mais delgadas, e não possuem boa resistência mecânica. Por apresentarem paredes celulares mais delgadas são mais afetadas mecanicamente pelo tratamento térmico.

Pôde-se observar a diferença entre a resistência ao cisalhamento da madeira colada e da madeira sólida, em função da temperatura de tratamento e dos planos de corte. Verificou-se que a madeira colada não tratada perdeu mais de 50% de resistência em relação a madeira sólida não tratada independente do plano de corte, visto que a citriodora por ser uma madeira de alta densidade, impede a absorção da cola, não sendo eficiente para a mesma.

A madeira colada, ao entrar em contato com a temperatura 160°C, foi observado uma queda de 50% em seus valores, sendo que os mesmos se tornaram constantes após entrar em contanto com temperaturas de 180°C e 200°C.

Já a madeira na madeira sólida, houve uma queda gradativa conforme o aumento da temperatura.

As madeiras coladas não tratadas apresentaram reduções na ordem de 72,36%; 79,82% e 72,82%, respectivamente nos planos diagonal, radial e tangencial.



O tratamento térmico favoreceu o aparecimento de fendas ao longo da peça de madeira, gerando espaços vazios dentro do corpo de prova, proporcionando redução na área a ser cisalhada e, como consequência, a redução no módulo de resistência à flexão.

Nunes (2012), estudando o efeito do tratamento térmico em madeira de eucaliptos, observou uma redução da resistência ao cisalhamento da madeira sólida e colada (com resorcinol puro e com adesivo misto resorcinol-tanino), fato esse observado com a madeira de citriodora colada com PVA, em que foi observada a redução da resistência após o tratamento térmico nesse estudo.

4.7. Avaliação da rigidez na flexão (MOE)

Na madeira não tratada e tratada a 160°C, o módulo de elasticidade não mostrou diferenças significativas entre os três planos de corte (tabela 10). Entretanto, nas madeiras tratadas a 180°C e 200°C, o módulo de elasticidade no plano radial foi menor que nos planos

tangencial e diagonal. Esteves & Pereira (2009) afirmam que essa redução se deve à degradação das hemiceluloses, bem como à evaporação de extrativos que ocorrem durante o tratamento térmico.

O tratamento térmico não afetou os módulos de elasticidade da madeira nos planos tangencial e diagonal. Entretanto, no plano radial a madeira teve o módulo de elasticidade reduzido, quando tratada a temperaturas acima de 160 °C. O plano radial apresentou maior comprimento de rachadura, portanto houve uma correlação com a resistência apresentada (Figura 12).

Tabela 10 – Valores médios de módulo de elasticidade (MPa) da madeira de *Corymbia citriodora* em função da temperatura tratada termicamente e do plano de corte

Plano de Corte	Temperatura (°C)							
	Não tratada		160		180		200	
Diagonal	20.252 ^(10,37)	aA	19.554 ^(8,07)	aA	20.068 ^(9,38)	aA	18.239 ^(8,73)	aA
Radial	23.125 ^(8,37)	aA	23.190 ^(9,36)	aA	13.995 ^(14,29)	bB	12.522 ^(11,88)	bB
Tangencial	23.906 ^(13,15)	aA	22.931 ^(8,91)	aA	23.304 ^(6,49)	aA	19.760 ^(13,67)	aA

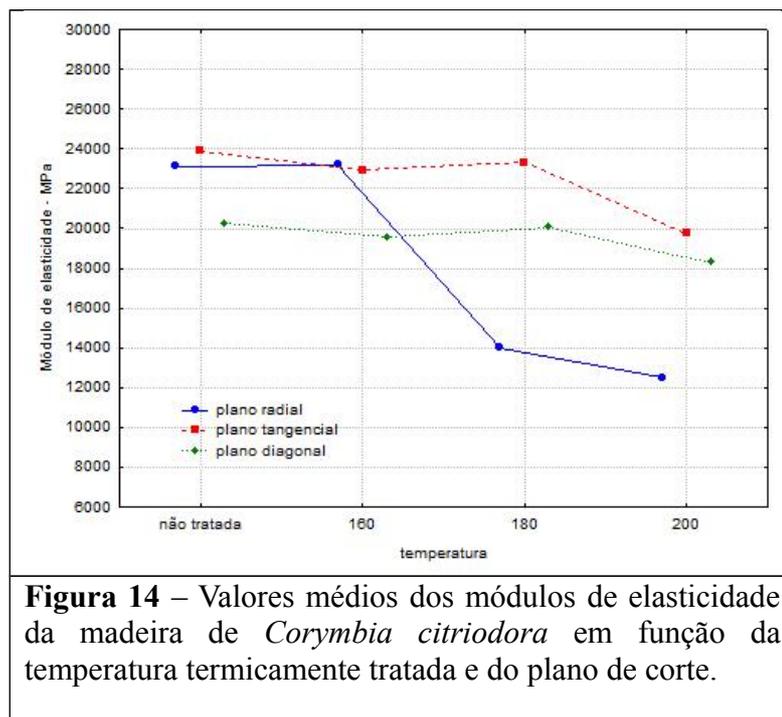
Médias com a mesma letra não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Letras minúsculas = comparação entre os planos. Letras maiúsculas = comparação entre as temperaturas. Valores entre parênteses = coeficiente de variação experimental (%).

Moura et al. (2012), em estudo com madeira de reflorestamento, observou que madeira de *Eucalyptus grandis* teve uma melhoria da rigidez da madeira, na ausência de oxigênio, à medida que se aumentava a temperatura em 200 °C. Ao contrário da madeira de citriodora, que com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade diminuiu proporcionando a redução da rigidez.

Nos resultados de Moura et al. (2012), o plano radial apresentou reduções de 39,4% e de 46,14% respectivamente nas temperaturas, a 180°C e 200°C. no trabalho do Calonego (2014) ele afirma que o incremento na temperatura tratada, de 180°C para até 220°C, promoveu decréscimos significativos e na ordem 24,0% a 52,3% nas resistências em flexão estática no eucalipto grandis. Os valores obtidos encontram-se nessa faixa.

Nos outros planos de corte, diagonal e tangencial, a rigidez na flexão não foi alterada significativamente pelo tratamento térmico. Dentro os motivos que podem explicar esse fato destacam-se o rearranjoamento ou reticulação dos componentes químicos presentes após o tratamento térmico da madeira e/ ou o provável aumento da região cristalina da celulose e a consequente aproximação das micelas como descritos por Bryiyan et al. (2001) e Wikberg e Maunu (2004).

A Figura 14 apresentou os valores médios dos módulos de elasticidade para madeira de *Corymbia citriodora* em função da temperatura tratada termicamente e do plano de corte.



5. CONCLUSÕES

O tratamento térmico diminui a densidade aparente da madeira de citriodora causando perda de massa, sendo crescente com o aumento da temperatura.

O tratamento térmico altera a cor original da madeira de citriodora, causando o escurecimento da mesma. Os menores valores de L^* foram observados para os tratamentos mais severos (menor luminosidade), apresentando uma cor marrom-escura.

O plano de corte diagonal apresenta os maiores valores de ângulo de contato. As temperaturas a 180°C e 200°C causaram aumento no ângulo de contato.

As temperaturas à 180°C e à 200°C causam o aumento da taxa de absorção de umidade em todos planos de corte, o qual foi acompanhado pelo aumento de rachaduras.

Em relação ao cisalhamento, a madeira sólida mesmo tendo uma maior variação entre as diferentes temperaturas e os planos de corte possuem uma tensão maior do que as madeiras coladas, onde o tratamento térmico reduziu pela metade a resistência da linha de cola, diminuindo-a.

O tratamento térmico afeta negativamente a resistência ao cisalhamento da madeira sólida e principalmente a de juntas coladas com PVA da espécie de citriodora. O adesivo não apresenta desempenho eficiente para as madeiras tratadas.

O módulo de elasticidade é afetado pelo tratamento térmico apenas no plano de corte radial da madeira e à temperatura a 180°C e 200°C, onde houve maior comprimento total de rachaduras.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho mostrou que o tratamento térmico pode proporcionar consideráveis ganhos de acordo com a utilização da madeira de *Corymbia citriodora*. A possibilidade de balancear os resultados, de acordo com o objetivo, poderá viabilizar maior beleza externa e propriedades internas eficientes para uma melhor eficácia do material no mercado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWOYEMI, L.; JONES, I. P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. **Wood Science and Technology**, New York, v. 45, n. 2, p. 261-267, 2011.

AYADI, N. et al. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Rohstoff**, v.61, p.221-226, 2003.

AYRILMIS N., DUNDAR T., CANDAN Z., AKBULUT T. Wettability of fire retardant treated laminated veneer lumber (LVL) manufactured from veneers dried at different temperatures. **BioResources**; 4(4), p. 1536-1544, 2009.

AZEVEDO, A. C. S.; QUIRINO, W. F. Aumento da estabilidade na madeira de eucalipto através de tratamento térmico. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 16, n. 98, p. 50-58, ago. 2006.

BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Revista Cerne**, Lavras, v.9, n.1, p.69-83, 2003.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Madeira de *Eucalyptus* como matéria prima para indústria de celulose e papel. **PRODEPEF**, v. 13, 145p.1976.

BERG JC. Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena. **Wettability**. New York: Marcel Dekker; p. 75-148, 1993.

BRASIL, M.A.M.; VEIGA, R.A.A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seções transversais do caule, da base do tronco para a copa em *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v.15, p.73-82, 1977.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **Revista Cerne**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BOONSTRA, M. J.; RIJSDIJK, J. F.; SANDER, C.; KEGEL, E.; TJEERDSMA, B.; MILITZ, H. VAN ACKER, J.; STEVENS, M. Microstructural and physical aspects of heat treated wood; Part 2. Hardwoods. **Maderas, Ciencia y tecnología, Concepción**, v. 8, n. 3, p. 209-218, 2006.

BURKARTER E. Desenvolvimento de superfícies superhidrofóbicas de politetrafluoretileno [tese]. **Física no Setor de Ciências Exatas**, Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2010.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; LATORRACA, J. V.; Effect of Thermal Modification on the Physical Properties of Juvenile and Mature Woods of *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n.1, p.108-113, 2014.

CHEN, Y.; FAN, Y.; GAO, J.; LI, H. Coloring characteristics of in situ lignin during heat treatment. **Wood Science Technology**, New York, v. 46, n. 1, p. 33-40, 2012.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; FOELKEL, C. E. B. Avaliação preliminar do potencial de quatro madeiras de eucalipto na produção de polpa solúvel branqueada pela sequência OA(ZQ)P1. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 385-392, 1997.

CRUZ, C.R.; LIMA, J.T.; MUNIZ, G.I.B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Scientia Florestalis**, n. 64, p. 33-47, 2003.

DOMBRO, D. B. *Eucalyptus pellita*: Amazonia Reforestation's red mahogany. **Planeta Verde Reforestación S.A.**, 2010. 8 p.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C. **Forest Products Journal**, Madison, v. 57, n. 1/2, p. 47-52, 2007a.

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

FENGEL, D., WEGENER, G. Wood, chemistry, ultrastructure, reactions. **Waster & Grugter**. New York, p.613, 1984

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw e *Eucalyptus saligna* Smith. Piracicaba, USP, 1968. 72p. Tese (Doutoramento). – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1968.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, 2/3: 67-74, 1971.

FOREST PRODUCTS SOCIETY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Washington: US Department of Agriculture, 463 p.,1999.

FOWKES FM. Attractive forces at interfaces. **Industrial & Engineering Chemistry**; 56(12): 40-52, 1964.

FPL - FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** - Wood as an engineering material. **Madison: USDA Forest Service**, 2010. 508 p. (FPL General Technical Report, 190).

FTA - FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® Handbook**. Helsinki, 2003. 66 p.

GARCIA, R. A. et al. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, v.46, n.1, p.41-52, 2012.

GENNES P, Brochard-Wyart F, Quéré D. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. New York: **Springer-Verlag**; 2003

GONCALEZ, J.C.; BREDA, L.C.S.; BARROSM J.F.M.; MACEDO, D.G.; JANIN, G.; COSTA, A.F; VALE, A.T. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, dez. 2006.

HAKKOU M, PETRISSANS M, EL BAKALI I, GERARDIN P, ZOULALIAN A. Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood. **Holzforschung** 2005; 59(1): 35-37.

HILL, C. Wood modification: chemical, thermal and other processes. **West sussex**: John Wiley e Sons, 2006.

ISHIGURI, F.; MARUYAMA, S.; TAKAHASHI, K.; ABE, Z.; YOKOTA, S.; ANDOH, M.; YOSHIZAWA, N. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Cryptomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **Journal of Wood Science**, Kyoto, v. 49, p. 135-139, 2003.

JOHNSON RE, Dettre RH. **Wettability: wetting of low-energy surfaces**. New York: Marcel Dekker; 1993.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **HolzalsRoh-und Werkstoff**, Berlin, v. 60, n. 1, p. 1-6, 2002.

LUCAS, J. et al. Colour measurement: fundamentals. **Azurem: Eurotex**, 1996.

MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Importância da densidade e do teor de carboidratos totais da madeira de eucalipto no desempenho da linha de fibra. **In: Colóquio Internacional sobre celulose kraft de Eucalipto**. Viçosa, p. 15-38,2003.

MORI, C. L. S. O, LIMA, J. T., MORI, F. A., TRUGILHO, P. F., GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Revista Cerne**. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras. v. 11, n.2, p.137-146, 2005.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Floresta, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 305 - 314, abr./jun. 2012.

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

NASCIMENTO, A.M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R.M.; Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 593-601, out./dez. 2013.

NUNES, C. S. **Propriedades tecnológicas e qualidade de adesão de madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* termorretificadas**. 2012. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**. 4. Ed. New York: McGraw-Hill. 1980.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, 2002.

PONCSAK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, Vancouver, v. 1, n. 40, p. 647–663, 2006.

REGULA, L. M. **Padrões virtuais e tolerâncias colorimétricas no controle instrumental das cores**. 2004. 135 f. Dissertação (mestrado em Metrologia) – Curso de pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ROURA P., FORT J. Local thermodynamic derivation of young's equation. **Journal of Colloid and Interface Science** 2004; 272(2): 420-429. PMID:15028507.

ROWELL RM. Wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press; 2005.

SERNEK, M.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; DESPRES, A.; GÉRARDIN, P. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 66, n. 3, p. 173-180, 2008.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 3, p. 37-51, 2003.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. Curitiba, UFPR, 2002. 159p. Tese (Doutoramento). – Universidade Federal do Paraná, 2002.

SILVA, G. B. **Colorimetria - Propagação de erros e calculo da incerteza de medição nos resultados espectrofotométricos**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; GOMES JUNIOR, C. C. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de *Pinus elliotti*. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: UEL - EBRAMEM, 2008.

SYRJANEN T. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Rapp AO. Review on heat treatments of wood. In: **Special Seminar: Environmental Optimization of Wood Protection**; 2001; Antibes, France. Antibes, COST Action E22; 2001.p.11-20.

TIENNE, D. L. C.; NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; SILVA, D. B. Adhesion quality of quaruba cedar wood glued joints under internal and external service conditions. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 15, n. 1, p. 20-33, 2008.

UNSAI, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 51, n. 4,p. 405-409, 2005.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France: stat of the art. **Paris: Centre Technique du Bois et del'Ameublement**, 2000. 6 p.4.

VIITANIEMI, P.; JÄMSÄ, S. Modification of wood with heat treatment. **VTT Research Report Publications** 814, Espoo, Finland, 1994.

WANGAARD, F. F. The mechanical properties of wood. London: **Chapman & Hall**, 1950. 377 p.

WENZL, H.F.J. The chemical technology of wood. New York, **Academic Press**. 692 p. 1970.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. Produção sustentável – Aquisição responsável de madeira na construção civil – guia prático para as construtoras. São Paulo, 2011. 71p.

WU SJ. Calculation of interfacial tension in polymer systems. **Journal of Polymer Science: Polymer Symposia** 1971; 34(1): 19-30.