

UFRRJ

INSTITUTO DE FLORESTAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**ADESÃO DE PEÇAS DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO
COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Caterina Carvalho Buratta

2019



UFRRJ

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

**ADESÃO DE PEÇAS DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO
COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

CATERINA CARVALHAL BURATTA

Sob a orientação do Professor
Alexandre Miguel do Nascimento

e Co-orientação dos Professores
Natália Dias de Souza
Roberto Carlos Costa Lelis

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra** em Ciências Ambientais e Florestais, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ

Fevereiro de 2019

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B945a Buratta, Caterina Carvalhal, 1991-
Adesão de peças de madeira de reflorestamento
coladas com adesivo estrutural / Caterina Carvalhal
Buratta. - 2019.
73 f. : il.

Orientador: Alexandre Miguel do Nascimento.
Coorientadora: Natália Dias de Souza.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2019.

1. tecnologia da madeira. 2. eucalipto. 3. colagem
de madeira. 4. poliuretano. 5. molhabilidade. I.
Miguel do Nascimento, Alexandre, 1961-, orient. II.
Souza, Natália Dias de, -, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
graduação em Ciências Ambientais e Florestais. IV.
Título.

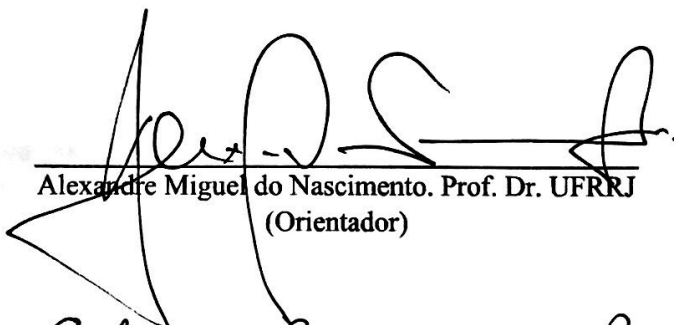
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

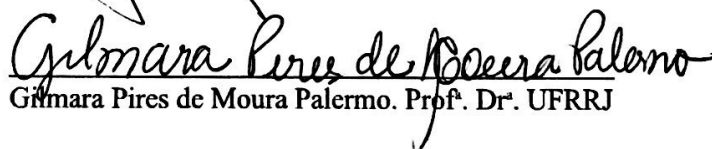
CATERINA CARVALHAL BURATTA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Ciências Ambientais e Florestais, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

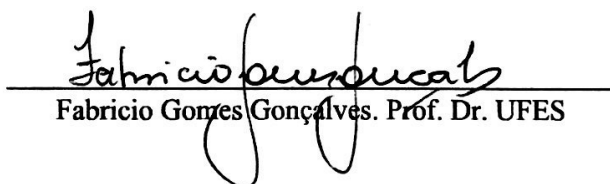
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2019



Alexandre Miguel do Nascimento. Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)



Gilmaria Pires de Moura Palermo. Prof. Dr. UFRRJ



Fabricio Gomes Gonçalves. Prof. Dr. UFES

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que me acolheu durante 10 anos desde a graduação, e que me ensinou muito sobre a vida dentro e fora da universidade.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais e a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Às empresas Hexion Química do Brasil Ltda e Imperveg® Polímeros Indústria e Comércio Ltda pela doação dos adesivos utilizados neste trabalho.

À minha família de sangue; meus pais Aurea e Mario, minha irmã Giulia e minha vó Eudirce, por todo o amor e compreensão durante todos os meus anos de vida, e em especial neste momento.

Ao Bruno Scher, que aturou tantas vezes as minhas variações de humor e o conhecido desespero de um aluno da pós-graduação. Obrigada pela compreensão.

À família que eu pude escolher, meus amigos, em especial: Edna, Pereti, Marcelo, Daniel, Christina, Guilherme, e Rafael, que me acompanharam de perto desde o início.

Ao meu amigo Lucas Avellar, que esteve sempre comigo me incentivando a nunca desistir, e que sem ele teria sido ainda mais difícil este processo.

Aos meus amigos Ramon, Fernando, Juliana, Felipe e Gustavo, pela paciência e pelos dias em que não me dediquei ao convívio da casa.

Ao meu orientador, que depois de tantos anos de trabalho juntos se tornou um pai acadêmico, sempre me ensinando, aconselhando e trabalhando incessantemente para que o resultado tenha sido o melhor possível. Vou levar seus ensinamentos para a vida toda.

Aos meus co-orientadores tão queridos e amáveis, Natália Dias de Souza e Roberto Carlos Costa Lelis, que me auxiliaram nesta caminhada.

Ao técnico José Carlos da química, e o funcionário Mario da marcenaria, por me ajudarem tanto e serem tão prestativos e atenciosos, facilitando todo o processo.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma nessa etapa recém-concluída da minha vida.

RESUMO GERAL

BURATTA, Caterina Carvalhal. **Adesão de peças de madeira de reflorestamento coladas com adesivo estrutural**. 2019. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2019.

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o efeito do tratamento térmico, do envelhecimento acelerado e da molhabilidade na qualidade da adesão de juntas coladas de madeira das espécies *Corymbia citriodora* com 17 e 60 anos de idade, e *Eucalyptus pellita* com 17 anos, utilizando os adesivos resorcinol e poliuretano vegetal à base de óleo de mamona. O trabalho foi realizado em três capítulos, a saber: O Capítulo 1, onde se comparou as espécies citriodora e pellita com 17 anos de idade e o Capítulo 2, onde se comparou a espécie citriodora com 17 e 60 anos de idade, sendo avaliado em ambos, o efeito do tratamento térmico das temperaturas de 160, 180 e 200°C, assim como do envelhecimento acelerado, na qualidade da adesão das juntas por meio da resistência ao cisalhamento e porcentagem de falhas na madeira, juntamente com os resultados de propriedades físicas como densidade e teor de umidade, assim como da composição química das espécies e valores de resistência ao cisalhamento na madeira sólida. Já o Capítulo 3 avaliou o efeito do tratamento térmico com as mesmas temperaturas, na molhabilidade da superfície da madeira recém aplainada, e oxidada por 1 (um) ano, das espécies anteriormente citadas, com suas respectivas idades, mediante a análise do ângulo de contato da gota com a superfície. Para a obtenção dos resultados, testes de resistência ao cisalhamento foram realizados na máquina universal de ensaio mecânico, enquanto que a densidade aparente das juntas, o teor de umidade de equilíbrio e a porcentagem de falha na madeira, foram determinados através de normas técnicas, assim como o teor de holocelulose, lignina e extrativos. Ainda, os adesivos foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas, e uma parte das juntas destinadas à simulação de envelhecimento acelerado para avaliação da qualidade de adesão em peças expostas ao clima e o ângulo de contato foi aferido por um goniômetro. Os resultados mostram que houve uma queda de resistência mecânica ao se tratar termicamente a madeira tanto nas juntas quanto na madeira sólida, porém, a resistência da ligação superou a da madeira sólida em quase todos os tratamentos e adesivos e ainda, houve redução da resistência mecânica nas juntas em todos os tratamentos após ciclo de envelhecimento. O adesivo resorcinol apresentou um melhor desempenho geral em comparação ao poliuretano nas juntas não envelhecidas e envelhecidas em laboratório, porém, o desempenho do mesmo não foi satisfatório para a espécie citriodora com 60 anos na madeira não tratada, e no tratamento de 160°C. Já o desempenho do poliuretano não foi satisfatório para todos os tratamentos da espécie citriodora com 60 anos e na idade de 17 anos para madeira não tratada e no tratamento de 160°C. A espécie pellita mostrou maior resistência nas juntas em uma média geral, enquanto que para o citriodora, a idade de 17 anos apresentou maior resistência nas juntas. O teor de umidade de equilíbrio das juntas reduziu com o aumento da temperatura do tratamento. O teor de lignina aumentou com o tratamento térmico, enquanto que o teor de holocelulose reduziu, e o teor de extrativos totais não apresentou relação direta com o tratamento térmico. A molhabilidade da superfície diminuiu com o tratamento térmico e a superfície aplainada apresentou melhor molhabilidade quando comparada com a oxidada.

Palavras-chave: resistência ao cisalhamento, mamona, molhabilidade.

GENERAL ABSTRACT

BURATTA, Caterina Carvalhal. **Adhesion of reforestation wood pieces bonded with structural adhesive**. 2019. 73 p. Dissertation (Masters in Forest and Environmental Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2019.

The aim of this study was to evaluate the effect of heat treatment, aging and wettability on the bonding quality of wood joints, of the species *C. citriodora*, aged 17 and 60 years, and *E. pellita*, aged 17 years, using the adhesives resorcinol and vegetable polyurethane based on castor oil. The work was performed in three chapters, as follows: Chapter 1, comparing citriodora and pellita species with 17 years of age and Chapter 2, which citriodora specie with 17 and 60 years of age was compared, being evaluated in both chapters, the effect of heat treatment of the temperatures of 160, 180 and 200 ° C, as well as of the accelerated aging, in the quality of joints adhesion through shear strength and percentage of wood failure, with the results of physical properties such as density and moisture content, as well as the chemical composition of the species and values of shear strength in solid wood. Chapter 3 evaluated the effect of heat treatment with the same temperatures of the surface wettability on freshly planed and one-year oxidized wood of the aforementioned species, with their respective ages, by analyzing the contact angle of the drop with the surface. To obtain the results, tests of shear strength were performed in the universal mechanical test machine, while the apparent density of the joints, the equilibrium moisture content and the percentage of failure in the wood were determined by technical standards, as the content of holocellulose, lignin and extractives. Furthermore, the adhesives were characterized as to their physical properties, and a part of the joints were separated for the accelerated aging simulation to evaluate the quality of adhesion in parts exposed to the climate, and the contact angle was measured by a goniometer. The results show a decreasing in mechanical strength when the wood was heat treated both in the joints and in the solid wood, however, the bond strength exceeded that of the solid wood in almost all treatments and adhesives, and there was a reduction in mechanical resistance in all treatments after aging cycle. The resorcinol adhesive presented a better overall performance compared to polyurethane in the unaged and aged joints, however, its performance was not satisfactory for the 60-year-old citriodora species in the untreated wood, and in the treatment of 160 ° C. However, the performance of polyurethane was not satisfactory for all treatments of the citriodora specie at 60 years and at the age of 17 years for untreated wood and at the treatment of 160 ° C. The pellita specie showed greater joint strength at a general mean, whereas for citriodora, the age of 17 years presented greater joint strength. The equilibrium moisture content of the joints was reduced with increasing treatment temperature. The lignin content increased with the heat treatment, while the holocellulose content decreased, and the total extractive content was not directly related to the heat treatment. The wettability of the surface decreased with the heat treatment and the planed surface showed better wettability when compared to the oxidized one.

Keywords: shear strength, castor oil, wettability

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de lamelas destinadas para a colagem para cada adesivo, separadas por espécie, idade e tratamento térmico.....	14
Tabela 2. Requisitos mínimos necessários para desempenho satisfatório do adesivo nas condições apresentadas.....	21
Tabela 3. Condições do teste escolhido da norma ASTM D1183-03 para simular envelhecimento acelerado em laboratório nas amostras de madeira <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i>	22
Tabela 4. Teor de sólido, viscosidade e densidade dos adesivos Cascophen RS 216 e AGT 1315, a 25°C.....	23
Tabela 5. Valores de resistência relativa (κ) e valores médios de resistência ao cisalhamento (f_v) na compressão paralela às fibras na madeira sólida, e na linha de cola nas juntas, das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> , para os diferentes tratamentos, adesivos e idades.....	24
Tabela 6. Valores de F e p da madeira sólida para as espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> de 17 anos.....	27
Tabela 7. Valores de F e p da madeira sólida da espécie <i>C. citriodora</i> de 17 e 60 anos.....	27
Tabela 8. Valores de F e p para as espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com idade de 17 anos.	28
Tabela 9. Valores de F e p para a espécie <i>C. citriodora</i> com idades de 17 e 60 anos.....	30
Tabela 10. Valores de densidade aparente para os respectivos teores de umidade de equilíbrio das juntas coladas, das espécies <i>C. citriodora</i> com 17 e 60 anos e <i>E. pellita</i> com idade de 17 anos.....	32
Tabela 11. Valores de correlação de Pearson da resistência ao cisalhamento com o tratamento, densidade e teor de umidade das juntas, para as espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com idade de 17 anos.....	32
Tabela 12. Valores de correlação de Pearson da resistência ao cisalhamento com o tratamento, densidade e teor de umidade das juntas, para a espécie <i>C. citriodora</i> com idade de 60 anos..	33
Tabela 13. Percentual de lignina insolúvel, holocelulose e extrativos totais da madeira de <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17, e <i>C. citriodora</i> com 60 anos.....	34
Tabela 14. Porcentagem de falha na madeira das juntas coladas com os adesivos poliuretano vegetal de mamona e resorcinol, em função do tipo de tratamento, das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17 anos e <i>C. citriodora</i> com 60 anos de idade.....	36
Tabela 15. Valores de resistência relativa, e valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola, nas juntas coladas das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> , para os diferentes tratamentos, adesivos e idades, após condições de envelhecimento acelerado.....	38

Tabela 16. Valores de F e p de resistência nas juntas, após envelhecimento em laboratório, das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17 anos de idade.....	39
Tabela 17. Porcentagem de falha na madeira das juntas coladas das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17 anos e <i>C. citriodora</i> com 60 anos de idade, em função do tipo de tratamento e do adesivo, após ciclo de envelhecimento acelerado.	41
Tabela 18. Valores médios do ângulo de contato entre a gota séssil e a superfície da madeira de <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17 anos de idade, na superfície aplainada e oxidada, em função dos tipos de tratamento.	48
Tabela 19. Valores médios do ângulo de contato entre a gota séssil e a superfície da madeira, na superfície aplainada e oxidada, em função da idade da madeira de <i>C. citriodora</i> , e os tratamentos térmicos.....	50

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema da mensuração da espessura da linha de cola. LP: linha de cola principal; LE: linha de cola estendida; 1: vaso preenchido com adesivo; 2: raios preenchidos com adesivo. As setas indicam onde foi mensurado a espessura da linha de cola. Adaptado de Tsoumis (1991). Fonte: Albino et al. (2010).4
- Figura 2.** Links imaginários das ligações dos adesivos entre duas peças de madeira usando o esquema de Marra (1980). Link 1: camada do adesivo; Links 2 e 3: camada de interface do adesivo; Links 4 e 5: interface madeira-adesivo; Links 6 e 7: camada de interface da madeira e Links 8 e 9: camadas da madeira. Fonte: Forest Products Laboratory - USDA (2010).5
- Figura 3.** Seções transversais de juntas coladas envolvendo superfície de Douglas-fir danificada e não danificada. A área escura no centro da micrografia é a linha de cola do adesivo. A imagem A envolve duas superfícies não danificadas pela plaina com uma lâmina extremamente afiada (120x) e mostra células abertas com suas distintas paredes celular. A imagem B mostra duas superfícies danificadas por uma lixa de grã 36, e suas células esmagadas com suas indistintas paredes celular. Fonte: The Wood Handbook (2010)5
- Figura 4.** Disposição das lamelas no interior do forno para realização de tratamento térmico 17
- Figura 5.** A: aplicação da cola em cima de uma balança de precisão; B: espalhamento da cola com uma espátula. 19
- Figura 6.** A: esquema para obtenção dos corpos-de-prova a partir da junta colada. B: corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo à linha de cola nas juntas. Fonte: ASTM (2013).20
- Figura 7.** Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na madeira sólida. Fonte: ASTM (2014).20
- Figura 8.** A: corpo-de-prova de cisalhamento após o ensaio, separado em duas partes, com a face colada voltada para cima onde se observa a linha de cola (indicada pela seta em vermelho) e partes de madeira após ruptura, e abaixo a grade quadriculada com área conhecida no papel transparente. B: a grade sendo utilizada como gabarito para a contagem da área de falha na madeira.20
- Figura 10.** Valores médios de resistência ao cisalhamento para as juntas coladas com os dois adesivos e para a madeira sólida, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* de idade 17 anos em função dos tratamentos. R: adesivo resorcinol; MM: adesivo poliuretano vegetal de mamona. Letras minúsculas iguais representam médias que não diferem entre si estatisticamente.25

Figura 11. Valores médios de resistência ao cisalhamento nas juntas e na madeira sólida da espécie <i>C. citriodora</i> com 17 e 60 anos de idade em função do tipo de tratamento e adesivo. R: adesivo resorcinol; MM: adesivo poliuretano vegetal de mamona. Letras minúsculas iguais representam médias que não diferem entre si estatisticamente.	26
Figura 12. Resistência ao cisalhamento nas juntas coladas, comparando as espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com idade de 17 anos, nos diferentes tratamentos e adesivos	29
Figura 13. Resistência das juntas coladas com madeira tratada e não tratada termicamente, com poliuretano vegetal de mamona e resorcinol para as madeiras da espécie <i>C. citriodora</i> com idades de 17 e 60 anos.	31
Figura 14. Teor de lignina e holocelulose da madeira das espécies <i>C. citriodora</i> com 17 e 60 anos e <i>E. pellita</i> com 17 anos, não tratada e tratada termicamente à diferentes temperaturas.	35
Figura 15. Valores de r (%) das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> em função do tratamento, idade e adesivo, onde o primeiro gráfico (superior) se refere às juntas coladas com o poliuretano vegetal e o segundo gráfico (inferior) ao adesivo resorcinol.....	40
Figura 16. A: imagem de uma lamela sendo gotejada no equipamento DSA 100 Drop Shape Analyzer. B: imagem gerada no software do equipamento, onde é calculado o ângulo de contato da gota.	47
Figura 17. Ângulo de contato em razão do tipo de superfície e tratamento, das idades de 17 e 60 anos para <i>C. citriodora</i>	50
Figura 18. Ângulo de contato das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. pellita</i> com 17 anos, em função do tempo de medição, para os diferentes tratamentos.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	As espécies <i>Eucalyptus pellita</i> e <i>Corymbia citriodora</i>	3
2.2.	Adesão e fatores que afetam a sua qualidade.....	3
2.3.	Adesivos	6
2.3.1.	Adesivo resorcinol (Resorcinol-formaldeído)	6
2.3.2.	Adesivo poliuretano vegetal à base de mamona	7
2.4.	Propriedades físicas da madeira.....	8
2.4.1.	Densidade	8
2.4.2.	Teor de umidade	8
2.5.	Tratamento térmico.....	8
	CAPÍTULO 1	10
	EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO E ENVELHECIMENTO, NAS JUNTAS COLADAS COM OS ADESIVOS RESORCINOL E POLIURETANO DE MAMONA.	10
	RESUMO	11
	ABSTRACT	12
1	INTRODUÇÃO	13
2	MATERIAIS E MÉTODOS	14
2.1.	Preparação do material e delineamento experimental.....	14
2.2.1	Teor de umidade de equilíbrio das lamelas	15
2.2.2	Densidade aparente das lamelas	15
2.3	Propriedades dos adesivos.....	16
2.3.1	Teor de sólidos.....	16
2.3.2	Viscosidade e densidade	16
2.4	Tratamento térmico da madeira.....	16
2.5	Análise da composição química da madeira.....	17
2.5.1	Determinação do teor de extrativos	17
2.5.2	Determinação do teor de holocelulose por cloração	18
2.5.3	Determinação do teor de lignina de Klason	18
2.6	Colagem das lamelas.....	18
2.7	Ensaio de cisalhamento das juntas e da madeira sólida.....	19
2.8	Porcentagem de falha na madeira na linha de cola	20

2.9	Determinação do teor de umidade e densidade das juntas	21
2.10	. Simulação de envelhecimento cíclico em laboratório	21
2.11	. Análise estatística	22
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1.	Propriedades físicas dos adesivos	23
3.2.	Resistência ao cisalhamento nas juntas coladas e na madeira sólida.....	23
3.2.1.	Resistência ao cisalhamento das juntas de madeira com 17 anos	27
3.2.2.	Resistência das juntas coladas de madeira de <i>C. citriodora</i> de diferentes idades	30
3.2.3.	Teor de umidade e densidade aparente das juntas de madeira tratadas e não tratadas termicamente	31
3.3.	Composição química das espécies	33
3.4.	Percentual de falha na madeira das juntas após ensaio mecânico	36
3.5.	Resistência das juntas após ciclo de envelhecimento acelerado	37
4	CONCLUSÕES	42
	CAPÍTULO 2	43
	MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA NATURAL E TRATADA TERMICAMENTE DE <i>C. citriodora</i> E <i>E. pellitta</i>	43
	RESUMO	44
	ABSTRACT	45
1	INTRODUÇÃO	46
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
2.1.	Equipamento utilizado e metodologia aplicada	47
2.2.	Material, delineamento experimental e análise estatística	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4	CONCLUSÃO	54
	CONCLUSÕES GERAIS.....	55
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	56

1 INTRODUÇÃO GERAL

De acordo com Angeli (2005), o eucalipto é a madeira mais utilizada para abastecer a maior parte da indústria florestal no Brasil, principalmente a de papel e celulose, seguida pela produção de energia e serraria. Devido a diversos problemas relacionados à madeira nativa, como irregularidades no seu manejo, corte ilegal e espécies proibidas de corte (que de uma certa forma, gera uma escassez dessa matéria-prima para processamento), a tendência é cada vez maior a utilização de madeira de reflorestamento para usos múltiplos, como por exemplo, produção de madeira laminada colada (MIOTTO; DIAS, 2009).

Ainda, para se agregar valor à madeira, muitos comerciantes a tratam termicamente, com preservativos e revestimentos, com o objetivo de aumentar sua durabilidade, proteger de agentes deterioradores da madeira ou modificar a sua cor para fins estéticos. Assim, o tratamento térmico da madeira à elevadas temperaturas, que se iniciou na Europa na década de trinta, ainda é um método novo no Brasil, mas é um processo que está ganhando espaço pois já sabe-se que ao tratar termicamente a madeira, há uma melhoria da sua estabilidade dimensional e durabilidade natural, agregando valor ao produto final (POUBEL et al., 2013), além de influenciar na molhabilidade da superfície, e conseqüentemente, na adesão de peças de madeira.

Quando se é considerado a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade no processo de fabricação de diversos produtos madeireiros, atrelado ao uso de madeiras de reflorestamento, se conclui que ao produzir peças de madeira coladas, para fins estruturais ou não, como por exemplo vigas estruturais ou compensados para uso interno, é importante que o adesivo utilizado também seja, de uma certa maneira, pensado para que sua utilização não seja prejudicial tanto para o meio ambiente, quanto para os seres vivos.

Entre os adesivos muito utilizados na indústria brasileira para produção de madeira laminada colada está o resorcinol (ZANGIÁCOMO, 2003), que possui excelentes resultados no que tange a qualidade da adesão final do material colado, mas que ainda é considerado uma substância tóxica e um químico forte. Em contrapartida, um adesivo que tem tido resultados satisfatórios no processo de colagem e na qualidade de adesão de peças de madeira, além de ter como vantagem o fato de ser um recurso natural renovável e abundante no território nacional, é o poliuretano à base de mamona, o qual possui um grande potencial para ser ainda mais utilizado e quem sabe até, substituir certos adesivos convencionais, abrindo caminhos para a pesquisa e a disseminação deste adesivo no comércio.

Porém, a colagem de madeiras de alta densidade é um processo difícil e muitas vezes custoso, ainda mais se tratando de eucalipto, pois sabe-se que é um gênero que naturalmente já apresenta dificuldade na colagem devido a sua anatomia, resultando numa baixa permeabilidade (LIMA et al., 2007). Por isso é preciso avaliar a decisão de se tratar termicamente a madeira antes da colagem, visto que o tratamento térmico aumenta a porosidade da superfície, reduzindo sua densidade (NUNES et al., 2016), ao mesmo tempo que esse processo pode gerar uma dificuldade de ancoragem do adesivo, sendo neste caso, importante a escolha da temperatura de tratamento (CARVALHO et al., 2015).

Considerando o que foi dito, o presente trabalho visa analisar o efeito do tratamento térmico no desempenho de dois adesivos estruturais, porém de naturezas distintas, o resorcinol e o poliuretano a base de óleo de mamona, em madeiras de duas espécies de eucalipto de alta densidade, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*, abatidos com idades de 17 e 60 anos. Além disso, foram analisados os efeitos da exposição à oscilações extremas de temperatura e umidade na qualidade da adesão das peças de madeira, com intuito de avaliar o processo de degradação da superfície exposta ao tempo.

Para isso, este trabalho foi dividido em dois capítulos, onde no primeiro avaliou-se a qualidade da adesão de lamelas das espécies citriodora e pellita da mesma idade, e citriodora com idades distintas, através da resistência ao cisalhamento, porcentagem de falhas, teor de umidade de equilíbrio, densidade das juntas e composição química da madeira, antes e após ciclo de envelhecimento simulado. No último capítulo foi discutido como o tratamento térmico afeta a molhabilidade na superfície recém aplainada e oxidada, fator este importante para o entendimento da penetração do adesivo na madeira.

Espera-se que o tratamento térmico resulte em uma maior penetração do adesivo em madeiras densas devido ao aumento da porosidade, gerando linhas de cola mais resistentes quando comparado a madeira sólida, além de reduzir a higroscopicidade e densidade da madeira. Ainda, é esperado que o adesivo poliuretano apresente um desempenho tão satisfatório quanto o resorcinol.

Com tais estudos, madeiras de eucalipto com densidades mais elevadas, poderiam ser destinadas a elementos estruturais, expandindo assim a sua aplicação na indústria de construção, e onde exista a necessidade ou possibilidade de colagem desta madeira, principalmente se o adesivo utilizado for atóxico e oriundo de fontes renováveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. As espécies *Eucalyptus pellita* e *Corymbia citriodora*

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família botânica Myrtaceae, é originária da Austrália e Oceania e possui mais de 500 espécies registradas divididas em 8 subgêneros, adaptadas a diversas condições climáticas, de solo e temperatura, além de possuir rápido crescimento, sendo assim, um gênero amplamente distribuído por diversos países (CIF, 2017; Embrapa, 2000). Há alguns anos que um destes subgêneros foi elevado a gênero, atualmente chamado de *Corymbia*, de acordo com os mesmos autores. Tanto as espécies do gênero *Eucalyptus* quanto *Corymbia*, são popularmente chamados de eucalipto.

De acordo com Angeli (2005), o eucalipto é a madeira mais utilizada para abastecer a maior parte da indústria florestal no Brasil, principalmente a de papel e celulose, seguida pela produção de energia e serraria. Esta madeira também é muito chamada de madeira de reflorestamento pois é plantada em larga escala para abastecer o mercado nacional e internacional.

A densidade básica do *E. pellita* varia de acordo com a literatura, sendo registrada de acordo com Júnior et al. (2013), em torno de 652 kg/m³ e 512 kg/m³ segundo Poubel et al. (2011) para madeira do cerne e 564 kg/m³ para alburno. Já o *C. citriodora* possui densidade básica variando entre 950 a 1010 kg/m³ segundo Reis et al. (2013). Tais espécies são classificadas como média (entre 550 a 720 kg/m³) e alta densidade (acima de 730 kg/m³), para *E. pellita* e *C. citriodora* respectivamente, de acordo com Silva et al. (2015).

Segundo Neto (2017), o uso da madeira de eucalipto destinado a serraria vem crescendo pois pesquisas de melhoramento genético, assim como melhorias no processamento da madeira vem se desenvolvendo, gerando melhores informações com relação ao uso destas madeiras. Ainda de acordo com o mesmo autor, citando Silva (2002), a idade da espécie influencia na usinagem, assim como nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, fatores estes muito importantes para um produto final de qualidade, indicando que árvores na idade de 10 anos não possuem valores ideais de resistência, massa específica, estabilidade dimensional e resistência natural, sugerindo que árvores de eucalipto com 20 e 25 anos, apresentaram comportamentos mais indicados para a serraria.

2.2. Adesão e fatores que afetam a sua qualidade

Segundo o Forest Products Laboratory (2010), a colagem entre peças de madeira tem um importante papel na indústria madeireira, visto que ela permite a confecção de diversos produtos como chapas de aglomerados, compensados, portas, móveis, esquadrias e janelas, entre tantos outros produtos que tem seu valor agregado ao final do processo. Além disso, com a colagem é possível a utilização de madeiras de densidades e qualidades inferiores, que antes não eram utilizadas como peças sólidas.

Ainda de acordo com os mesmos autores, os processos de adesão resultam em ligações mecânicas e químicas, e sendo a madeira um material poroso, a ligação mecânica é a primeira a acontecer, pois o adesivo penetra nas cavidades celulares, as vezes de duas à seis células de profundidade desde a superfície, gerando uma adesão forte e duradoura, principalmente quando este adesivo chega à penetrar até mesmo nas paredes celulares. As ligações químicas fornecem uma boa ancoragem devido às ligações covalentes, de hidrogênio e forças de Van der Waals.

Nunes (2012) cita a relevância da densidade da madeira ao se tratar de uma boa colagem, já que madeiras de alta densidade apresentam paredes celulares mais espessas e lúmen menores, resultando em problemas como a maior dificuldade de penetração do adesivo e a maior pressão requerida para aumentar o contato entre a madeira e o adesivo, além de possuírem quantidades maiores de extrativos, que além de causarem uma degradação física e química, ainda influenciam nos processos de molhabilidade, fluxo, penetração e cura do adesivo.

Os extrativos também influenciam muito em uma colagem eficiente, uma vez que são considerados um dos principais fatores que podem causar uma inativação da superfície, afetando a molhabilidade da mesma, assim como alteração do seu ph (ALBINO et al., 2012).

Albino et al. (2010) estudaram a interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden como apresentado no esquema da Figura 1.

Estes autores observaram que para se ter uma boa colagem, o adesivo deve ir além de somente contato com a superfície madeira-adesivo e sim, preencher as cavidades celulares adjacentes.

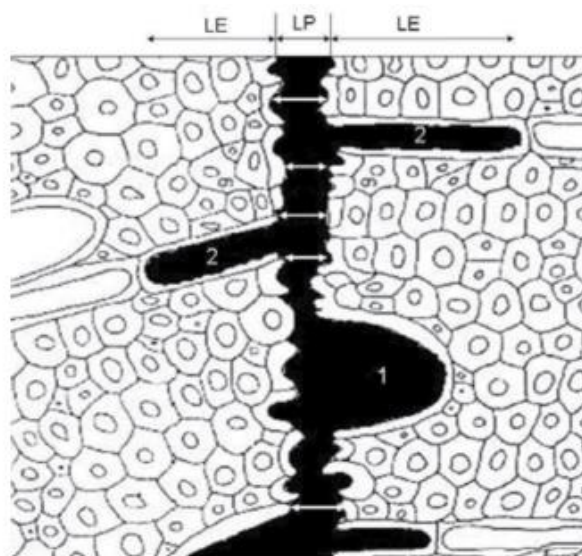


Figura 1. Esquema da mensuração da espessura da linha de cola. LP: linha de cola principal; LE: linha de cola estendida; 1: vaso preenchido com adesivo; 2: raios preenchidos com adesivo. As setas indicam onde foi mensurada a espessura da linha de cola. Adaptado de Tsoumis (1991). Fonte: Albino et al. (2010).

De acordo com Motta et al. (2014), para que também haja uma colagem adequada, o rompimento da madeira quando testada ao cisalhamento deve ser junto com o adesivo e que a resistência da junta colada seja superior ou igual a da madeira sólida, para que quando ocorra o rompimento este seja na madeira e não no adesivo.

Segundo Gonçalves et al. (2016), madeiras mais densas tem a ancoragem do adesivo prejudicado quando comparado a madeiras menos densas devido a menor penetração da cola, assim como uma maior perda de cola pelas bordas, gerando assim uma linha de cola de pior qualidade. Isso se dá principalmente com adesivos de baixa viscosidade como o tanino. De acordo com Brady; Kamke (1988), conforme citado por Gonçalves et al. (2016), a profundidade de penetração do adesivo está relacionada com o tamanho da região de interface madeira-adesivo (Figura 2), e que segundo Albino et al. (2010), depende de uma série de fatores como anatomia, química e física da madeira; propriedades químicas e físicas do adesivo; e do processo adotado durante a colagem. Alguns fatores como o ph do adesivo podem influenciar

muito no processo de colagem visto que a madeira tem caráter ácido, então um ph básico do adesivo pode resultar numa boa colagem.

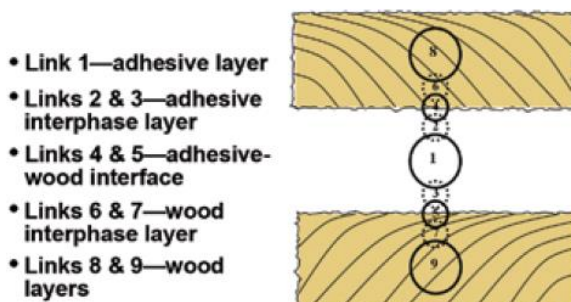


Figura 2. Links imaginários das ligações dos adesivos entre duas peças de madeira usando o esquema de Marra (1980). Link 1: camada do adesivo; Links 2 e 3: camada de interface do adesivo; Links 4 e 5: interface madeira-adesivo; Links 6 e 7: camada de interface da madeira e Links 8 e 9: camadas da madeira. Fonte: Forest Products Laboratory - USDA (2010).

Ainda de acordo com Gonçalves et al. (2016), apesar dos termorrígidos possuírem características boas de resistência, os adesivos termoplásticos quando sujeitos a tensões cisalhantes absorvem mais as deformações plásticas, alcançando melhores resultados de resistência mecânica.

O livro *The Wood Handbook*, do Forest Products Laboratory - USDA (2010), discorre sobre algumas características de superfície da madeira que devem ser consideradas quando no processo de colagem. Tal superfície deve ser lisa, não muito rugosa e livre de marcas de máquinas e irregularidades, assim como livre de óleos, resinas, sujeira e queimaduras (Figura 3).

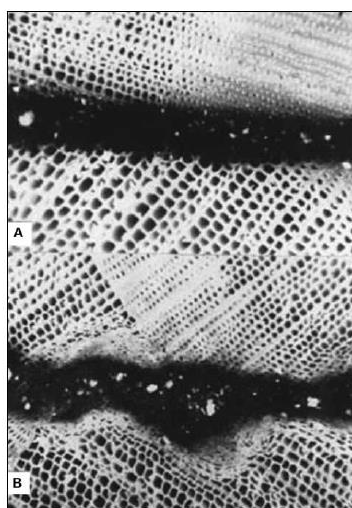


Figura 3. Seções transversais de juntas coladas envolvendo superfície de Douglas-fir danificada e não danificada. A área escura no centro da micrografia é a linha de cola do adesivo. A imagem A envolve duas superfícies não danificadas pela plaina com uma lâmina extremamente afiada (120x) e mostra células abertas com suas distintas paredes celulares. A imagem B mostra duas superfícies danificadas por uma lixa de grã 36, e suas células esmagadas com suas indistintas paredes celulares. Fonte: *The Wood Handbook* (2010)

Porém, Tienne (2006) afirma que uma penetração excessiva pode gerar ligações fracas visto que o adesivo penetra demais, ou muito rapidamente na madeira.

2.3. Adesivos

A função de um adesivo é gerar uma aderência entre dois substratos, fluindo e preenchendo espaços vazios, de forma que ocorra uma interação e aproximação destes substratos. Esta interação, chamada de adesão tem por mecanismos a adesão química como ligações covalentes, de hidrogênio e forças de Van der Waals, e adesão mecânica no qual o adesivo se solidifica entre os substratos formando uma espécie de gancho entre elas (BIANCHE et al., 2017).

Os adesivos termorrígidos começaram a ser produzidos em escala industrial por volta dos anos de 1930, principalmente o adesivo uréia-formaldeído (UF), juntamente com o fenol-formaldeído (FF), sendo o primeiro muito utilizado na colagem de móveis e madeira compensada para uso interno pois este adesivo apresentava menor resistência à umidade apesar de seu menor custo e sua cura ser processada a temperaturas mais baixas quando comparado ao FF (CAMPOS; LAHR, 2004).

Segundo os mesmos autores, em quase cem por cento dos painéis de madeira produzidos são utilizadas resinas derivadas de combustíveis fósseis, destacando-se os adesivos termorrígidos como o fenol-formaldeído, o resorcinol-formaldeído, a uréia-formaldeído e a melamina-formaldeído. A uréia, melamina e formaldeído são derivados do petróleo e se destacam principalmente pela sua resistência à umidade e ataque de xilófagos. A vantagem da UF é que ela pode ser formulada para cura a temperatura ambiente, aproximadamente 20°C, ou cura a quente por prensas, mas assim como outros adesivos que levam formaldeídos, após grande exposição a umidade, ocorre quebras das ligações na resina liberando formaldeído para o ambiente, sendo que esta é uma substância tóxica.

Quando comparada à FF, sua resistência a umidade não é tão boa, sendo utilizada mais para ambientes em que não há tanto contato da madeira com água (IWAKIRI et al. 2005).

Ainda de acordo com os mesmos autores supracitados, o fenol-formaldeído é muito utilizado em painéis OSB (*Oriented Strand Board*) voltados para fins estruturais por possuir uma maior resistência mecânica e alta resistência à umidade. Este adesivo necessita de altas temperaturas para a sua cura (130 a 160°C), sua linha de cola tem um tom escuro e possui um custo elevado (FIORELLI, 2002).

Já a resina melamina-formaldeído (MF), possui valores de resistência mecânica similar com o FF, porém sua resistência a umidade é ainda superior ao fenol. A MF tem sido utilizada na confecção de HDF (*High Densified Fibers*) exatamente pela resistência a umidade. De acordo Iwakiri et al. (2005), alguns fabricantes de resina estão disponibilizando no mercado resinas compostas dos tipos melamina-uréia-formaldeído e fenol-melamina-uréia-formaldeído, no sentido de buscar uma otimização na relação custo-benefício.

2.3.1. Adesivo resorcinol (Resorcinol-formaldeído)

O resorcinol é considerado um adesivo termorrígido e sintético pois é sintetizado a partir de derivados do petróleo, sendo sujeito à variações em seu custo de produção por depender do mercado petrolífero (CARVALHO et al., 2015). Já os adesivos termorrígidos são adesivos resistentes a umidade e calor pois endurecem através de reações químicas ativadas pela

temperatura e por determinados catalisadores, sendo os mais utilizados entre eles o fenol-formaldeído, uréia-formaldeído, resorcinol-formaldeído, melamina-formaldeído e os poliuretanos (BIANCHE et al., 2017).

O adesivo resorcinol-formaldeído é mais empregado em estruturas de uso externo pois tem uma boa resistência às variações de temperatura e umidade, sendo muito empregado em vigas laminadas e construções navais e sua prensagem pode ser a frio com uso de endurecedor (IWAKIRI et al., 2002).

De acordo com Tienne (2006), o resorcinol tem uma grande aplicação em estruturas de madeira pois atinge uma boa ligação além de possuir alta resistência à ação do tempo e alta resistência mecânica. Porém, seu custo é muito elevado, atingindo até 30% do custo total da madeira laminada colada. Sendo assim, este composto está sendo muito utilizado juntamente com outras substâncias como forma de viabilizar sua aplicação.

Ainda segundo a mesma autora, o resorcinol é mais reativo que o fenol-formaldeído (FF) devido a sua composição química, que apesar de ser semelhante ao FF, tem seu peso molecular menor e uma diferença no anel benzeno, o que confere uma reatividade até 15 vezes maior.

2.3.2. Adesivo poliuretano vegetal à base de mamona

O adesivo poliuretano vegetal de mamona, foi desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (MIOTTO; DIAS, 2009, PAES et al., 2011), e tem sido cada vez mais estudado com relação as suas aplicações, visto que a tendência mundial é a busca por substâncias menos agressivas e menos tóxicas ao meio ambiente, fatores estes presentes em grande parte dos adesivos comercialmente utilizados na colagem de madeira.

Tal adesivo é um polímero bi-componente, biodegradável, composto por um pré-polímero e um polioliol, o qual é extraído do óleo da mamona (*Ricinus communis*) e que possui alta capacidade de adesão, além de características hidrofóbicas (MARINHO et al., 2013).

De acordo com a literatura, este adesivo tem mostrado bons resultados na colagem, e vem sendo utilizado em madeira laminada colada, painéis de MDF e de partículas aglomerada, pois ele é altamente resistente à água além de ser oriundo de fontes renováveis (NASCIMENTO et al., 2015). Por exemplo, os autores Azambuja; Dias (2002) estudando o desempenho do poliuretano de mamona em pinus, observaram um bom desempenho nos ensaios de tração paralela às fibras, de tração normal às fibras e de cisalhamento, em madeira laminada colada natural e tratada com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado).

Segundo Moi et al. (2016) ao estudarem juntas estruturais em madeira laminada colada de eucalipto, concluíram que independentemente do adesivo utilizado, os resultados de resistência encontrados estavam conforme os níveis de segurança da normatização.

Os poliuretanos apresentam em sua estrutura grupos funcionais NCO/OH, os quais afetam a estrutura, organização e flexibilidade do polímero, e os poliuretanos extraídos do óleo de mamona, apresentam alta flexibilidade devido ao ácido gordo de cadeia longa na sua estrutura e resultam em polímeros com boa resistência à abrasão e estabilidade térmica. Porém, podem possuir algumas desvantagens como baixa resistência ao rasgo baixa resistência à oxidação e a tratamentos de elevadas temperaturas (VALERO et al., 2008).

2.4. Propriedades físicas da madeira

2.4.1. Densidade

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

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

De acordo com Dias; Lahr (2004), a densidade da madeira também está relacionada à diversas propriedades de resistência e rigidez, afirmando que a partir do estudo destas relações é possível conhecer uma através da outra, sendo possível se ter uma noção do comportamento da madeira sob determinadas situações de estresse mecânico, se avaliando somente a densidade. Segundo os autores, diversos estudos mundiais apontam uma relação em sua maioria linear, entre a resistência à compressão paralela às fibras, dureza, resistência à tração paralela às fibras e resistência ao cisalhamento da madeira e a densidade da madeira (HELLMEISTER, 1983; CORDOVIL E ALMEIDA, 1995; GIORDANO, 1951; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; MENDES, 1984; MELO; SIQUEIRA, 1992; TANAAMI, 1986).

2.4.2. Teor de umidade

O teor de umidade está relacionado com a presença de água no interior da madeira, que por ser um material altamente higroscópico, sofrendo influência da umidade do meio em que se encontra (BURATTA et al., 2018).

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

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

2.5. Tratamento térmico

O tratamento térmico pode ser definido como um tratamento ao qual a madeira é submetida, e que varia em função da temperatura final do processo, tempo de permanência, taxa de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira (VARGAS et al., 2015), com objetivo de melhorar a estabilidade dimensional e durabilidade natural como afirma Lopes et al. (2014).

E em alguns casos, até mesmo mudar sua cor de forma intencional para agregar maior valor econômico (ZANUNCIO et al., 2014)

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

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

O tratamento térmico da madeira modifica o índice de cristalinidade da celulose, reduz seu grau de polimerização e degrada parte da hemicelulose, (BRITO et al., 2008; ZANUNCIO et al., 2014 apud CARVALHO et al., 2015). Sabe-se ainda, que as microfibrilas de celulose são envoltas por este componente, e juntamente com a lignina formam uma matriz hidroreativa, presente na parede celular. Tal matriz possui boa higroscopicidade, influenciando no processo de expansão dimensional da madeira quando esta absorve umidade. Por isso, durante o processo de tratamento térmico, há uma redução da higroscopicidade da madeira à medida que a hemicelulose é degradada, sendo esta uma das vantagens deste tratamento, pois assim se cria certa estabilidade dimensional da peça (GOUVEIA, 2008). O mesmo autor afirma que conforme há o aquecimento da madeira, grupos de hidroxilas hidrofílicos diminuem enquanto são substituídos por grupos hidrofóbicos gerando ligações cruzadas entre as fibras da madeira, o que diminui consideravelmente a capacidade da água de penetrar na mesma, proporcionando também certa estabilidade dimensional.

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

CAPÍTULO 1

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO E ENVELHECIMENTO, NAS JUNTAS COLADAS COM OS ADESIVOS RESORCINOL E POLIURETANO DE MAMONA.

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi avaliar o efeito do tratamento térmico nas temperaturas de 160, 180 e 200°C, assim como o efeito do envelhecimento acelerado, na qualidade de adesão das juntas de madeira das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 e 60 anos de idade, coladas com os adesivos resorcinol e poliuretano vegetal de mamona. A análise dos dados foi realizada separadamente, onde em um grupo comparou-se as duas espécies com a mesma idade (17 anos), e em um segundo grupo, comparou-se a espécie *C. citriodora* com 17 e 60 anos. Para tal, foi avaliado a resistência ao cisalhamento nas juntas coladas e na madeira sólida, densidade aparente e o teor de umidade de equilíbrio das juntas, assim como a porcentagem de falha na madeira, além de realizada a caracterização química quanto ao seu teor de holocelulose, lignina e extrativos totais, e uma caracterização dos adesivos quanto ao seu teor de sólidos e viscosidade. Para o teste de resistência ao cisalhamento foi utilizada uma máquina de ensaio universal e sua metodologia seguiu normas técnicas americanas, assim como para a determinação da densidade, teor de umidade, porcentagem de falha na madeira e ciclo de envelhecimento. Os resultados mostram que houve uma redução da resistência mecânica ao se tratar termicamente a madeira, inclusive após ciclo de envelhecimento, porém, observa-se que a resistência da ligação após tratamento térmico superou a da madeira sólida. Quando comparadas as duas espécies com a mesma idade, o *E. pellita* apresentou maior resistência nas juntas, enquanto que o adesivo resorcinol apresentou um melhor desempenho geral em comparação ao poliuretano nas juntas não envelhecidas, e envelhecidas em laboratório. A resistência das juntas coladas com o poliuretano não apresentou diferenças significativas quando comparadas às juntas coladas com resorcinol, a partir da temperatura de 180°C. O poliuretano não obteve um desempenho satisfatório para a madeira não tratada, e na temperatura de 160°C, para a espécie *C. citriodora*. Já quando se avaliou somente o *C. citriodora* com idades diferentes, a idade de 17 anos apresentou maior resistência nas juntas enquanto que na idade de 60 anos, a resistência da junta não tratada, colada com poliuretano, não apresentou diferença estatística com o resorcinol no tratamento de 180°C. Ainda na mesma idade, o adesivo resorcinol não obteve bom desempenho para a madeira não tratada e no tratamento de 160°C, assim como o poliuretano para todos os tratamentos da espécie *C. citriodora* com 60 anos, e na idade de 17 anos para madeira não tratada, e no tratamento de 160°C. Com relação as propriedades físicas das juntas, a densidade aparente foi de 0,73, 0,80 g/cm³ e 1,02 g/cm³ para *E. pellita* (17 anos) e *C. citriodora* com 17 e 60 anos, respectivamente, e o teor de umidade de equilíbrio reduziu gradativamente com o aumento da temperatura. O teor de lignina aumentou com o tratamento térmico, enquanto que o teor de holocelulose reduziu, e o teor de extrativos totais não apresentou relação direta com o tratamento térmico.

Palavras-chave: resistência ao cisalhamento, poliuretano de mamona, tratamento térmico.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to evaluate the effect of heat treatment at temperatures of 160, 180 and 200° C, as well as the effect of accelerated aging on the bonding quality of wood joints of the species *C. citriodora* and *E. pellita* with 17 years old, bonded with resorcinol and castor oil polyurethane adhesives. For this purpose, it was evaluated the shear strength in the bonded joints and solid wood, bulk density and equilibrium moisture content of the joints, as well as the percentage of failure in the wood. Furthermore, the chemical composition of wood as holocellulose, lignin and total extractives content were analyzed, likewise the characterization of the adhesives as to their solids content and viscosity. For the shear strength test, a universal test machine was used, and its methodology followed US technical standards, as well as for determination of density, moisture content, percentage of failure in wood and aging cycle. The results show that there was a reduction in mechanical strength when the wood was heat treated, inclusive of after aging cycle. However, it was observed that the bond strength after heat treatment exceeded that of solid wood. Analyzing the two species with the same age, the *E. pellita* specie presented higher resistance at the joints, while the resorcinol adhesive showed a better overall performance compared to polyurethane in the unaged and aged laboratory joints. The strength of the bonded joints with the polyurethane did not present significant differences when compared to the joints bonded with resorcinol at the temperature of 180° C. The polyurethane did not perform satisfactorily for the untreated wood, and at the temperature of 160° C, for the *C. citriodora* specie. Considering the *C. citriodora* specie with different ages, the age of 17 years presented greater resistance in the joints, whereas at the age of 60 years, the resistance of the untreated joint, bonded with polyurethane, did not present statistical difference from resorcinol in the 180°C temperature. Furthermore, resorcinol adhesive did not perform well for untreated wood and heat treated at 160°C, as well as polyurethane for all treatments of *C. citriodora* at age 60, and also at the age of 17 years for untreated wood, and in the temperature of 160°C. Regarding the physical properties of the joints, the bulk density was 0,73, 0,80 and 1,02 g/cm³ for *E. pellita* (17 years old) and *C. citriodora* with 17 and 60 years, respectively, and the equilibrium moisture content gradually decreased with increasing temperature. The lignin content increased with the heat treatment, while the holocellulose content decreased, and the total extractive content was not directly related to the heat treatment.

Keywords: shear strength, castor oil polyurethane, heat treatment.

1 INTRODUÇÃO

Madeiras de reflorestamento tomam conta do mercado de produtos madeireiros para fabricação de painéis de compensados e aglomerados, no uso de madeira laminada colada para fins estruturais, produção de papel e celulose, entre outros, pois estas madeiras têm em sua forma de exploração alta produtividade e baixo custo comparado às nativas, sendo que dentre elas, as madeiras de eucalipto e pinus são as mais utilizadas no Brasil (LIMA et al., 2008, MATTOS et al., 2008, SEGUNDINHO et al., 2017).

No que tange aos produtos de madeira colada, é importante se avaliar o comportamento da madeira de eucalipto em diversas formas de aplicação e com diversos tipos de adesivos, de maneira que possa se obter uma gama de informações para melhor auxiliar na tomada de decisão pelo fabricante ou profissional. De maneira geral, madeiras com densidades elevadas não correspondem bem à colagem, devido a sua baixa porosidade e teor de extrativos elevados, além da sua maior instabilidade dimensional (NUNES et al., 2016).

Sendo assim, alguns processos podem ser realizados para melhorar a colagem em madeiras densas, e dentre eles está o tratamento térmico. Tratar a madeira à altas temperaturas melhora a sua estabilidade dimensional, devido principalmente a degradação da hemicelulose, reduz açúcares disponíveis à agentes xilófagos, retardando a sua deterioração e ainda, reduz a higroscopicidade da madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Um adesivo muito utilizado comercialmente e que gera resultados satisfatórios para estruturas coladas de madeira submetidas a grandes esforços, é o resorcinol. Ele é um composto fenólico muito usado na indústria de solventes, porém altamente tóxico (SUBRAMANYAM; MISHRA, 2008). Por isso, pesquisas relacionadas a adesivos menos poluentes são cada vez mais frequentes, resultando no desenvolvimento de novos compostos, sendo um deles o poliuretano a base de óleo de mamona, adesivo oriundo de fontes renováveis e não tóxico.

Desta forma, este capítulo tem como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico na qualidade da adesão das juntas de madeira de reflorestamento, naturais e tratadas termicamente, coladas com o resorcinol e poliuretano de mamona, onde foi avaliada a resistência ao cisalhamento nas juntas, assim como na madeira sólida, e analisada a correlação da densidade, teor de umidade de equilíbrio e a temperatura de tratamento, assim como parâmetros de desempenho do adesivo como porcentagem de falha na madeira. Estas avaliações foram realizadas também em uma parte das juntas que foi separada para simulação de envelhecimento, onde foi avaliada a qualidade de adesão após as juntas terem sido expostas à condições de alta variação de temperatura e umidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Preparação do material e delineamento experimental

A madeira utilizada no projeto foi obtida a partir de 3 árvores de 17 anos da espécie *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson, 3 árvores de 17 anos de *Eucalyptus pellita* F. Muell, e 3 árvores de 60 anos da primeira espécie citada, oriundas de um plantio localizado dentro do campus da UFRRJ. Estas árvores foram abatidas e desdobradas em pranchas, que após secas ao ar livre ficaram estocadas na câmara climática do Laboratório de Propriedades Físico-mecânicas da Madeira, do Departamento de Produtos Florestais pertencente ao Instituto de Florestas da UFRRJ, a 20°C e 65% de umidade relativa (UR) até atingir o teor de umidade de equilíbrio, para serem novamente desdobradas em lamelas de 35 × 5,5 × 2,5 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Estas lamelas permaneceram na câmara climática até atingirem o teor de umidade de equilíbrio, de aproximadamente 13%. Nesta fase, antes de serem tratadas termicamente, foi determinado o volume e peso para cálculo de densidade aparente.

Em seguida, as lamelas foram levadas ao tratamento térmico e após este processo, foram novamente climatizadas, e ao atingirem a umidade de equilíbrio, foram desempenadas, aplainadas e tiveram suas dimensões padronizadas, chegando assim às dimensões finais da peça para a junta de 31 × 5 × 1,9 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente.

A quantidade de lamelas disponíveis para a colagem e fabricação das juntas de *Corymbia citriodora*, 17 e 60 anos, foi de 96 lamelas, divididas em dois grupos: 48 lamelas para fabricação de juntas coladas com o adesivo poliuretano de mamona, e 48 lamelas para colagem com o resorcinol, sendo a metade de cada grupo, de *C. citriodora* 17 anos (24 lamelas) e a outra metade, 60 anos (24 lamelas). Já para a espécie *Eucalyptus pellita*, a quantidade foi menor devido à escassez de material, e por isso, foram destinadas 32 lamelas para o experimento, sendo 16 para colagem com resorcinol e 16 para colagem com o poliuretano. O delineamento experimental pode ser conferido na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de lamelas destinadas para a colagem para cada adesivo, separadas por espécie, idade e tratamento térmico.

Tratamento Térmico	Resorcinol			Poliuretano de mamona		
	<i>C. citriodora</i>	<i>E. pellita</i>		<i>C. citriodora</i>	<i>E. pellita</i>	
	17*	60*	17*	17*	60*	17*
NT	6	6	4	6	6	4
160°C	6	6	4	6	6	4
180°C	6	6	4	6	6	4
200°C	6	6	4	6	6	4
Total	24	24	16	24	24	16

Obs: (*) representa a idade de cada espécie. NT: não tratadas.

Antes da colagem ser realizada, cada lamela foi unida ao seu par para a fabricação das juntas. Tomou-se o cuidado no momento da junção das lamelas, que a densidade delas fosse semelhante. Para isso foi calculado a média e desvio padrão das densidades por tratamento para evitar que lamelas de densidades muito diferentes fossem coladas juntas, de forma a homogeneizar a média das densidades de cada tratamento, e de cada junta.

Definido então os pares a serem colados, foi realizada uma última avaliação da superfície antes da colagem, de forma que elas estivessem lisas, livres de defeitos como nós e rachaduras.

Com objetivo de avaliar o comportamento dos adesivos antes e a após terem passado por uma simulação de envelhecimento acelerado em laboratório, 1/3 (um terço) das amostras produzidas para cada tratamento foram destinados a passarem pelo processo de envelhecimento e posteriormente, serem ensaiadas no cisalhamento por compressão. Após a realização dos ensaios de cisalhamento, foi avaliado porcentagem de falha na madeira, densidade e teor de umidade das juntas.

2.2. Determinação das propriedades físicas da madeira

2.2.1 Teor de umidade de equilíbrio das lamelas

Para a determinação do teor de umidade das amostras, foram utilizadas partes de algumas lamelas que sobraram após passarem pela serra de disco, no momento da padronização das dimensões das mesmas. Estas partes foram pesadas, levadas à estufa por $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até a estabilização do peso das mesmas. Logo em seguida foram novamente pesadas e as informações coletadas foram aplicadas na equação (1).

$$TUE = \frac{(Pu - Ps)}{Ps} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

TUE = Teor de umidade de equilíbrio (%)

Pu = Peso da amostra na câmara climatizada em 20°C e 65% UR (g)

Ps = Peso da amostra após secagem em estufa à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g)

2.2.2 Densidade aparente das lamelas

O valor da densidade aparente foi determinado quando houve a estabilização da umidade das lamelas, após estas atingirem teor de umidade médio em torno de 13%, e foi feito pela divisão do peso de cada amostra pelo seu respectivo volume, como mostra a Equação 2. Para determinação do peso foi usado balança com precisão em duas casas decimais e paquímetro digital para aferição do volume das lamelas.

$$\rho_{ap} = m/v \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm^3);

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

v = volume da amostra a 13% de umidade (cm^3).

2.3 Propriedades dos adesivos

O adesivo Cascophen RS 216, mais conhecido como resorcinol-formaldeído e o AGT 1315, um poliuretano vegetal à base de óleo de mamona, foram fornecidos pelas empresas Hexion Química do Brasil Ltda e Imperveg® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, respectivamente.

Algumas propriedades dos adesivos são apresentadas na ficha técnica dos mesmos, desta forma, foram avaliados somente o teor de sólidos e a viscosidade com a finalidade de obter informações importantes para a discussão dos resultados.

2.3.1 Teor de sólidos

Para o cálculo do teor de sólidos, foi pesado 5 gramas do adesivo em um cadinho, e levado à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por aproximadamente 24 horas. Após este período, o adesivo foi novamente pesado, e estas informações foram aplicadas na Equação 3.

$$TS = \left(\frac{Ps}{Pi}\right) \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

TS = Teor de sólidos (%);

Ps = Peso seco em gramas (após 24 horas na estufa);

Pi = Peso inicial em gramas (5 g)

2.3.2 Viscosidade e densidade

A viscosidade foi mensurada com o auxílio do copo Ford, onde foi disposto 130 ml do adesivo e registrado o tempo de escoamento do adesivo até a interrupção do fio formado pelo líquido. A informação do tempo, juntamente com a densidade foi aplicado na Equação 4.

$$V = (3,85 t - 17,28) \times d \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

V = Viscosidade (cP);

t = Tempo de escoamento (segundos);

d = densidade do líquido (g/cm^3)

Para o cálculo da densidade, foi adicionado 125 ml de adesivo em um béquer posicionado em cima de uma balança de precisão, e anotado o seu peso em gramas. A relação entre o peso do adesivo em 125 ml resultou na densidade em g/cm^3 .

2.4 Tratamento térmico da madeira

O tratamento térmico ocorreu às temperaturas de 160°C , 180°C e 200°C , totalizando 12 lamelas por temperatura, sendo que um lote não recebeu nenhum tipo de tratamento (controle).

Para este procedimento, foi utilizado um forno mufla do Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Produtos Florestais. Todas as lamelas foram pesadas antes do processo e empilhadas dentro da mufla de forma que o máximo de superfície de madeira estivesse exposta ao calor, como mostra a Figura 4.

Os tratamentos foram realizados em quatro etapas para cada temperatura: (1) as amostras foram aquecidas até a temperatura de 100°C em um período de 120 minutos; (2) a

temperatura foi de 100°C até a temperatura para cada tratamento em 40 minutos; (3) as amostras permaneceram na temperatura de tratamento por 90 minutos e (4) as amostras permaneceram no mínimo 120 minutos dentro da mufla, até o resfriamento do material.

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



Figura 4. Disposição das lamelas no interior do forno para realização de tratamento térmico

2.5 Análise da composição química da madeira

A análise química foi realizada para as madeiras das duas espécies e suas respectivas idades, assim como para cada tratamento (não tratada e tratadas à 160°, 180° e 200°C). Foi utilizada metodologia que segue a série técnica de Abreu et al. (2006). O material usado para a determinação de holocelulose, lignina e extrativos totais foi o topo das lamelas retirado antes da colagem, no momento da padronização dimensional das mesmas, e que foi moído no moinho de faca, resultando assim em uma serragem fina. Esta serragem foi passada na peneira granulométrica de número 16 e 24, onde foi utilizada a fração que atravessou a primeira e ficou retida na segunda. Após este procedimento, a madeira foi seca ao ar antes da realização das análises químicas.

2.5.1 Determinação do teor de extrativos

O preparo da madeira livre de extrativos é considerado a primeira etapa na determinação da composição química, pois é a partir deste material que as análises de holocelulose e lignina ocorrem. Foram utilizados 3 solventes para a extração, a qual ocorreu em um extrator do tipo Soxhlet, por um período de 24 horas para cada um, nesta ordem de polaridade: ciclohexano, acetato de etila e metanol. Após este período, os solventes foram recuperados com auxílio do rota-vapor, e o que sobrou no balão foi passado para um frasco de vidro, para evaporação completa dos solventes, até a estabilização do peso. A pesagem foi realizada para cada extrativo, e a soma dos três em relação ao peso da amostra inicial, resultou no teor de extrativos total em porcentagem.

2.5.2 Determinação do teor de holocelulose por cloração

Foram pesados 2,5 gramas de cada amostra (material previamente preparado como mencionado acima, seco e livre de extrativos) e adicionado 80 ml de água destilada, 0,5 ml de ácido acético e 1 g de clorito de sódio (80%) em um Erlenmeyer de 250 ml, e tampada. A mistura foi aquecida em banho-maria até atingir a temperatura de 70 °C a qual permaneceu durante todo o tempo do processo, em que a cada hora, eram adicionados mais 0,5 ml de ácido acético e 1 g de clorito de sódio (80%) até completar 5 horas de cloração.

Após este tempo, a mistura reacional permaneceu em repouso durante 24 horas sem adição de nenhum reagente, e então, foi filtrada sob vácuo em um funil de placa sinterizada, sendo lavada com água destilada até a cor amarela e o odor de cloro desaparecerem completamente. Ao final deste processo, a amostra foi lavada com 10 ml de acetona para retirada de qualquer resíduo que tenha ficado e então, levada a estufa para a 105°C até peso constante.

Pesa-se o funil antes e após (funil + amostra) a etapa de filtragem. O valor resultante da subtração do peso final menos o inicial, é dividido pelo peso inicial de 2,5 gramas, e multiplicado por cem. Foram realizadas 3 repetições para este procedimento.

2.5.3 Determinação do teor de lignina de Klason

Foram transferidos 0,3 gramas de amostra seca e livre de extrativos para um tubo de ensaio e adicionado lentamente 3 ml de ácido sulfúrico (72%). Esta mistura foi homogeneizada por agitação contínua durante 1 minuto, e conservada durante 1 hora entre 25 a 30°C, sendo agitada constantemente. Após este período, a mistura foi transferida para um balão de 250 ml e diluída com água destilada (84 ml). O material foi então levado ao refluxo por 4 horas e depois lavado com 500 ml de água destilada quente em um funil de placa sinterizada. O funil é levado à estufa a 105°C até peso constante.

Pesa-se o funil antes e após (funil + amostra) a etapa de filtragem. O valor resultante da subtração do peso final menos o inicial, é dividido pelo peso inicial de 0,3 gramas, e multiplicado por cem. Foram realizadas duplicatas para este procedimento.

2.6 Colagem das lamelas

Antes da colagem propriamente dita, foi estabelecida a gramatura de cola para os dois adesivos de forma que tal valor correspondesse ao mesmo para ambos, e sugerido na literatura. Optou-se então por utilizar 350 g/m² de adesivo por par de junta, ou linha de cola.

O adesivo de poliuretano de mamona é uma resina bi-componente, ou seja, é necessário a mistura de dois componentes (A+B) para resultar no adesivo que será utilizado para a colagem, onde o componente A é um pré-polímero e o componente B, um polioliol. A mistura se dá na proporção de 1:1,5 do componente A e B, respectivamente, sendo o tempo de trabalho após a homogeneização dos componentes de 15 minutos, onde após esse tempo o adesivo atinge o ponto de gel dificultando a aplicação.

Já o adesivo Cascophen RS 216 é uma resina de resorcinol-formol, a qual é misturada obrigatoriamente com um endurecedor (FM-60-M) fornecido pela mesma empresa, responsável por catalisar a resina e diminuir seu tempo de cura. A mistura da resina e do endurecedor se dá pela proporção 5:1 respectivamente. Foi também adicionado 5% de metanol à mistura, como sugerido na ficha técnica da resina, quando se está utilizando madeiras mais densas. Desta forma o álcool auxilia na penetração do adesivo na superfície da madeira, também tornando o

adesivo menos viscoso. O tempo de trabalho deste adesivo é de 60 minutos à uma temperatura de 20°C para montagem fechada (superfícies juntas).

Ambos os adesivos utilizados têm sua cura à frio, não necessitando assim de calor para a penetração e cura dos adesivos.

O espalhamento de ambos adesivos ocorreu da mesma forma, com o auxílio de uma espátula, onde tomou-se o cuidado de se ter um espalhamento uniforme em cada lamela que compunha a junta (Figura 5).

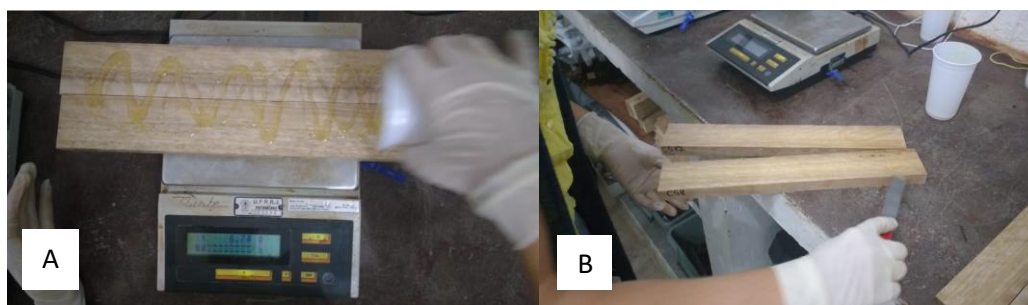


Figura 5. A: aplicação da cola em cima de uma balança de precisão; B: espalhamento da cola com uma espátula.

Após o espalhamento, as lamelas eram unidas para formar as juntas e empilhadas dentro da prensa onde eram deixadas uns minutos sem pressão, para favorecer a penetração da cola na madeira. Após estes minutos e prontas todas as juntas, a prensa era levada a máquina de ensaio para a aplicação da pressão escolhida para as juntas de 11 Kgf/cm², ou seja, 2.299 Kgf de carga. Após pressão constante, as porcas dos parafusos eram apertadas e deixadas sob pressão durante 24 horas.

2.7 Ensaio de cisalhamento das juntas e da madeira sólida

Os ensaios de cisalhamento para avaliar a resistência na linha de cola nas juntas, e na direção paralela às fibras na madeira sólida foram realizados seguindo a ASTM (American Standards for Testing and Materials) 905-08 e ASTM D143-14, respectivamente. Tais normas também especificam o procedimento e as dimensões para a produção dos corpos-de-prova utilizados nesse ensaio (Figuras 6 e 7).

Para a realização dos testes, foi utilizada a máquina de ensaio universal de 30 toneladas, vinculada ao software de análise. Foi utilizada a célula de carga de 10 toneladas, acoplada ao dispositivo para ensaios de cisalhamento.

A carga foi aplicada na velocidade de 5 mm/minuto e 0,6 mm/minuto para as juntas e madeira sólida respectivamente.

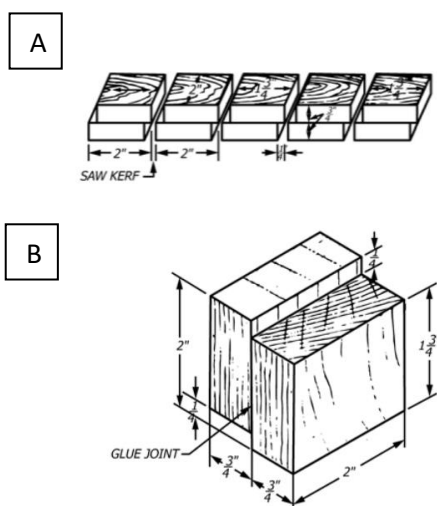


Figura 6. A: esquema para obtenção dos corpos-de-prova a partir da junta colada. B: corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo à linha de cola nas juntas. Fonte: ASTM (2013).

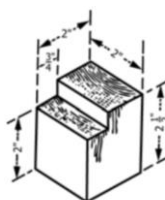


Figura 7. Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na madeira sólida. Fonte: ASTM (2014).

2.8 Porcentagem de falha na madeira na linha de cola

Para a estimativa de falha na madeira de cada corpo-de-prova utilizou-se a norma ASTM D5266-13 (2013). Foi elaborada uma grade milimetrada em um papel plástico transparente (Figura 8-A), de forma que esta grade tivesse a mesma área da face colada da junta, onde seria avaliado a falha na madeira, após o teste de cisalhamento.

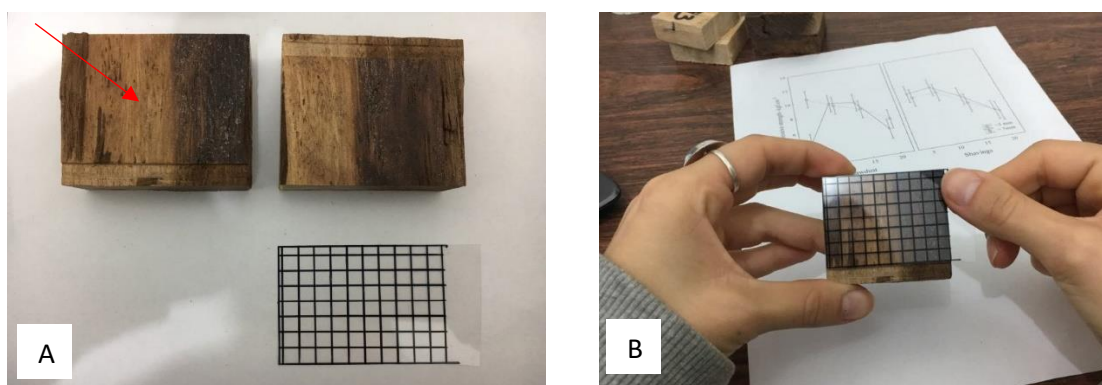


Figura 8. A: corpo-de-prova de cisalhamento após o ensaio, separado em duas partes, com a face colada voltada para cima onde se observa a linha de cola (indicada pela seta em vermelho) e partes de madeira após ruptura, e abaixo a grade quadriculada com área conhecida no papel transparente. B: a grade sendo utilizada como gabarito para a contagem da área de falha na madeira.

Adicionalmente, foi utilizada a ASTM D5751 – 99 (2012), para avaliar o desempenho dos adesivos por meio de parâmetros que estabelecem os requisitos mínimos necessários para um bom desempenho do adesivo, os quais são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Requisitos mínimos necessários para desempenho satisfatório do adesivo nas condições apresentadas.

Teste da junta no cisalhamento				
Classificação de performance e condições de exposição	Resistência		Falha na madeira (%)	
	Média do grupo (%)	Mínimo individual (%)	Média do grupo (%)	Mínimo individual (%)
Uso seco:			Folhosas	Folhosas
Cura a seco	60	30	30	15

Fonte: ASTM (2012), modificado pelo autor.

Para atingir aos parâmetros mínimos desejáveis para uma adesão satisfatória de acordo com a ASTM D5751 – 99 (2012), a porcentagem de falha na madeira no grupo analisado, deve ser de no mínimo 30% para as folhosas. Já quando se analisa individualmente cada amostra, esta porcentagem cai para 15%, sendo que este valor deve se apresentar em 90% das amostras testadas, não podendo haver nenhum valor igual a zero, o que neste caso, o teste é considerado não satisfatório para aquele adesivo.

2.9 Determinação do teor de umidade e densidade das juntas

O mesmo processo para determinação do teor de umidade de equilíbrio mencionado no item 2.2.1 foi realizado para as juntas, após os ensaios de cisalhamento, onde uma parte foi destinada ao teor de umidade e porcentagem de falha, enquanto a outra metade destinada para cálculo de densidade.

Já para o cálculo da densidade aparente das juntas, foi escolhido o método de imersão em água (*Mode II*), seguindo a norma ASTM D2395-17, a qual consiste na imersão do corpo-de-prova oriundo da junta em um béquer com volume conhecido cheio de água em cima de uma balança de precisão. Após atingir o equilíbrio, a leitura na balança é igual ao volume deslocado pela junta, e aplica-se na Equação 5.

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

D = Densidade da junta;

M = Peso na umidade de equilíbrio (g);

V = Volume da amostra de madeira obtido através do método de imersão em água (cm³)

2.10. Simulação de envelhecimento cíclico em laboratório

A simulação de intemperismo foi realizada segundo a norma ASTM D1183-03 da American Standards for Testing and Material (2011). Foi escolhido uma condição de teste

dentre quatro opções fornecidas, a cada qual com um tipo de condição interna e externa com somente 1 ciclo de envelhecimento (Tabela 3).

Para as condições de baixa umidade relativa e alta temperatura, as amostras eram colocadas em dessecador com sílica gel dentro da estufa pelo período determinado. Já para condições de alta umidade e temperatura alta, a sílica era substituída por água no fundo do dessecador, e colocadas na estufa. Para imersão em água, foi utilizado um tonel grande e cheio de água com temperatura do ambiente controlada, e por fim, para a condição de temperatura negativa, foi feita uma adaptação na norma, onde ao invés de as amostras estarem sujeitas à temperatura de -57°C , elas foram levadas à um freezer com temperatura de $-25\pm 2^{\circ}\text{C}$, pelo período estabelecido.

Tabela 3. Condições do teste escolhido da norma ASTM D1183-03 para simular envelhecimento acelerado em laboratório nas amostras de madeira *C. citriodora* e *E. pellita*

Teste	Nome	Período (h)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Umidade Relativa (UR%)
C	Exterior, terra e ar	48	71 ± 3	<10
		48	23 ± 1	imerso em água
		8	-57 ± 3	aproximadamente 100
		64	$38,5\pm 2$	aproximadamente 100

Após o término da simulação, as juntas ficaram na câmara climatizada durante 7 dias à temperatura de $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 2\%$ antes de serem ensaiadas no cisalhamento.

A mudança percentual na resistência à linha de cola como resultado da exposição às condições de intemperismo foi calculada através da equação 4.

$$r(\%) = \left[\frac{(Y-X)}{X} \right] \times 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

r (%) = mudança percentual na resistência como resultado da exposição às condições de intemperismo;

X = resistência inicial;

Y = resistência após exposição às condições de teste

2.11. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Statsoft 7, ao nível de 95% de confiança em todos os testes. Nos testes paramétricos foram realizados Brown-Forsythe de homogeneidade de variância, Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade dos dados, análise de variância para experimento fatorial e comparação de média (teste de Tukey) com correção para número de repetições desiguais. Os testes paramétricos foram aplicados nos valores de resistência ao cisalhamento nas juntas e na madeira sólida.

Para a estatística não-paramétrica como os dados de ângulo de contato, foi usado o Kruskal-Wallis para realização de análise de variância, e os testes de comparação de média de Dunn e Mann-Whitney.

Também foram realizadas análises de correlação de Pearson entre densidade, teor de umidade, temperatura de tratamento e resistência ao cisalhamento nas juntas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades físicas dos adesivos

Os resultados da análise de teor de sólidos, viscosidade e densidade dos adesivos são apresentados na Tabela 4. Os resultados encontrados conferem com os valores fornecidos pelas fichas técnicas de cada adesivo.

Foram encontrados valores de viscosidade, teor de sólidos e densidade mais altos para o poliuretano vegetal.

Tabela 4. Teor de sólido, viscosidade e densidade dos adesivos Cascophen RS 216 e AGT 1315, a 25°C.

	Teor de Sólidos (%)	Viscosidade (cP)	Densidade (g/cm ³)
Cascophen RS 216	58	493,20	0,90
AGT 1315	97	586,57	1,04

3.2. Resistência ao cisalhamento nas juntas coladas e na madeira sólida

Os valores médios de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na madeira sólida, resistência ao cisalhamento na linha de cola nas juntas coladas e resistência relativa são apresentados na Tabela 5. Nota-se que de uma forma geral, independente da espécie ou idade, que o tratamento térmico reduziu a resistência da madeira tanto nas juntas coladas quanto na madeira sólida. Esta redução é mais acentuada nas juntas coladas com resorcinol (R), onde se observa uma queda de resistência abrupta, principalmente da temperatura de 160 para 180°C.

A resistência relativa para a madeira sólida, indica a redução gradual da resistência em função do tratamento térmico. A madeira de *C. citriodora* com 17 anos foi a que apresentou esta maior redução, onde na temperatura de 200°C, o valor da resistência é apenas 22% do valor da madeira não tratada, enquanto que na idade de 60 anos e na segunda espécie com 17 anos, esta relação é de 40%.

Comparando as amostras não tratadas com as amostras tratadas a 200°C, com o uso do poliuretano vegetal de mamona (MM), houve uma redução da resistência aproximada de 33 e 25% para as espécies de *C. citriodora* e *E. pellita* com a idade de 17 anos, respectivamente, enquanto que com o R esta redução foi ainda maior, apresentando valores de 44 e 42%. Já para a madeira sólida, esta queda foi ainda mais acentuada (77 e 60%, aproximadamente), como é observado na Figura 9.

Tabela 5. Valores de resistência relativa (κ) e valores médios de resistência ao cisalhamento (f_v) na compressão paralela às fibras na madeira sólida, e na linha de cola nas juntas, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita*, para os diferentes tratamentos, adesivos e idades.

		<i>C. citriodora</i>				<i>E. pellita</i>		
Trat.	Adesivo	60 anos		17 anos		17 anos		
		f_v (MPa)	κ	f_v (MPa)	κ	f_v (MPa)	κ	
Juntas Coladas	NT	MM	9,4 ^{(0,82) CD}	0,55	10,22 ^{(0,94) e D}	0,71	8,9 ^{(0,48) cde}	0,66
		R	12,59 ^{(1,01) F}	0,74	12,24 ^{(1,40) f EF}	0,84	13,86 ^{(0,36) g}	1,03
	160°C	MM	6,84 ^{(1,24) AB}	0,58	9,49 ^{(1,13) de CD}	1,38	9,57 ^{(1,05) de}	1,04
		R	11,89 ^{(0,95) EF}	1,02	11,79 ^{(1,70) f EF}	1,71	12,84 ^{(0,54) fg}	1,40
	180°C	MM	7,38 ^{(1,06) AB}	0,96	8,02 ^{(0,64) bc ABC}	2,32	8,46 ^{(0,67) cd}	1,26
		R	10,72 ^{(1,66) DE}	1,39	6,68 ^{(0,95) ab A}	1,93	6,41 ^{(1,34) a}	0,95
	200°C	MM	7,04 ^{(0,96) AB}	1,01	6,76 ^{(0,55) ab AB}	2,10	6,63 ^{(0,70) ab}	1,24
		R	8,09 ^{(1,24) BC}	1,16	6,82 ^{(1,20) ab AB}	2,12	7,95 ^{(1,21) abcd}	1,48
	Madeira sólida	NT	17,1 ^{(4,52) J}	1,00	14,49 ^{(1,91) j JJ}	1,00	13,4 ^{(1,83) j}	1,00
		160°C	11,7 ^{(5,17) I}	0,68	6,89 ^{(0,83) g GH}	0,48	9,16 ^{(1,18) k}	0,68
		180°C	7,72 ^{(2,07) H}	0,45	3,46 ^{(1,44) hi G}	0,24	6,74 ^{(1,58) g}	0,50
		200°C	6,96 ^{(2,85) GH}	0,41	3,22 ^{(0,65) h G}	0,22	5,36 ^{(1,05) gi}	0,40

Onde: MM: poliuretano de mamona. R: resorcinol. NT: não tratadas (controle). f_v : resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na madeira sólida, e na linha de cola nas juntas coladas. Trat: tratamento. κ : resistência relativa nas juntas (f_v das juntas/ f_v da madeira sólida) e na madeira sólida (f_v (°C)/ f_v NT). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si estatisticamente, à um nível de 95% de confiança. Letras maiúsculas comparam médias entre diferentes idades e tratamentos para *C. citriodora* e letras minúsculas comparam médias entre as diferentes espécies e tratamentos, porém na mesma idade de 17 anos. Valores entre parênteses são o desvio-padrão.

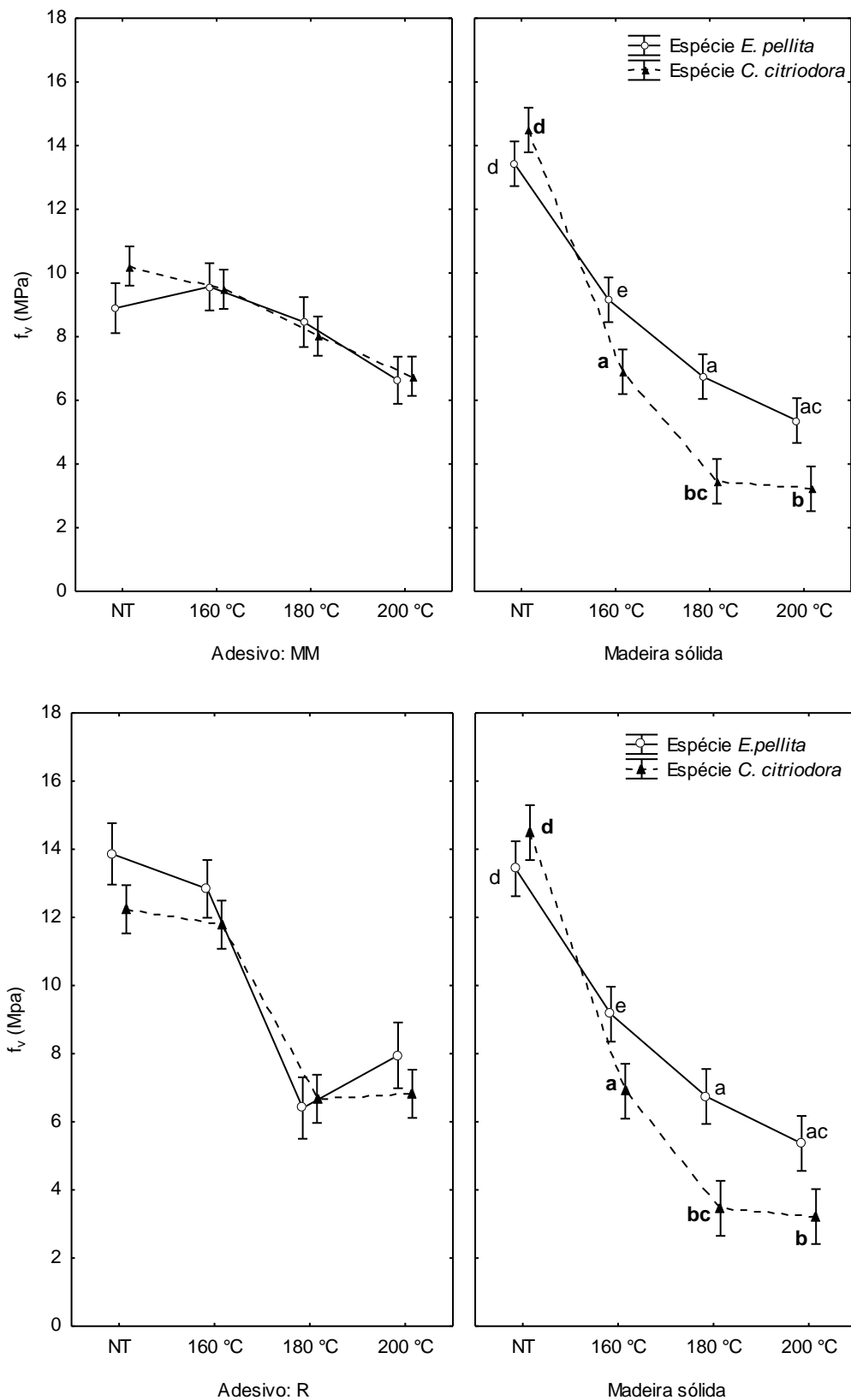


Figura 9. Valores médios de resistência ao cisalhamento para as juntas coladas com os dois adesivos e para a madeira sólida, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* de idade 17 anos em função dos tratamentos. R: adesivo resorcinol; MM: adesivo poliuretano vegetal de mamona. Letras minúsculas iguais representam médias que não diferem entre si estatisticamente.

Analisando a espécie *C. citriodora* com 17 anos, nota-se que os valores de resistência relativa na madeira colada não tratada são inferiores a 1, indicando que neste caso, a resistência da madeira sólida supera a das juntas. Porém, ao se tratar termicamente, a resistência da ligação se torna superior ao da madeira sólida. Já para a idade de 60 anos, a resistência ao cisalhamento das juntas é superior ao da madeira sólida em todas as temperaturas do tratamento térmico para o adesivo R, enquanto que para o MM há um aumento gradual, onde a resistência das juntas supera a da madeira sólida somente na temperatura de 200°C (Figura 10).

Tais resultados podem ser explicados pela fragilização da madeira ao ser tratada à altas temperaturas devido à degradação de componentes químicos, como a hemicelulose, resultando em uma perda de massa, e consequente redução da resistência da madeira, como sugerem os autores Menezes et al. (2014) e Moura et al. (2012). Ainda, os autores Carvalho, Amélia Guimarães et al. (2015), indicam que os mesmos sítios higroscópicos responsáveis pelo teor de umidade na madeira, os quais são degradados com o tratamento térmico, também são responsáveis pela interação química com o adesivo, resultando em menores valores de resistência. Aspectos qualitativos como o aspecto visual também foram observados, já que houve um aumento de fissuras ao longo dos raios, resultando em um ganho de resistência ao se utilizar os adesivos estudados neste trabalho, pois há uma maior penetração do adesivo na madeira, fator este que pode ser explicado pelas maiores porcentagens de falha na madeira em adesivos de baixa viscosidade como o resorcinol, como observado neste trabalho.

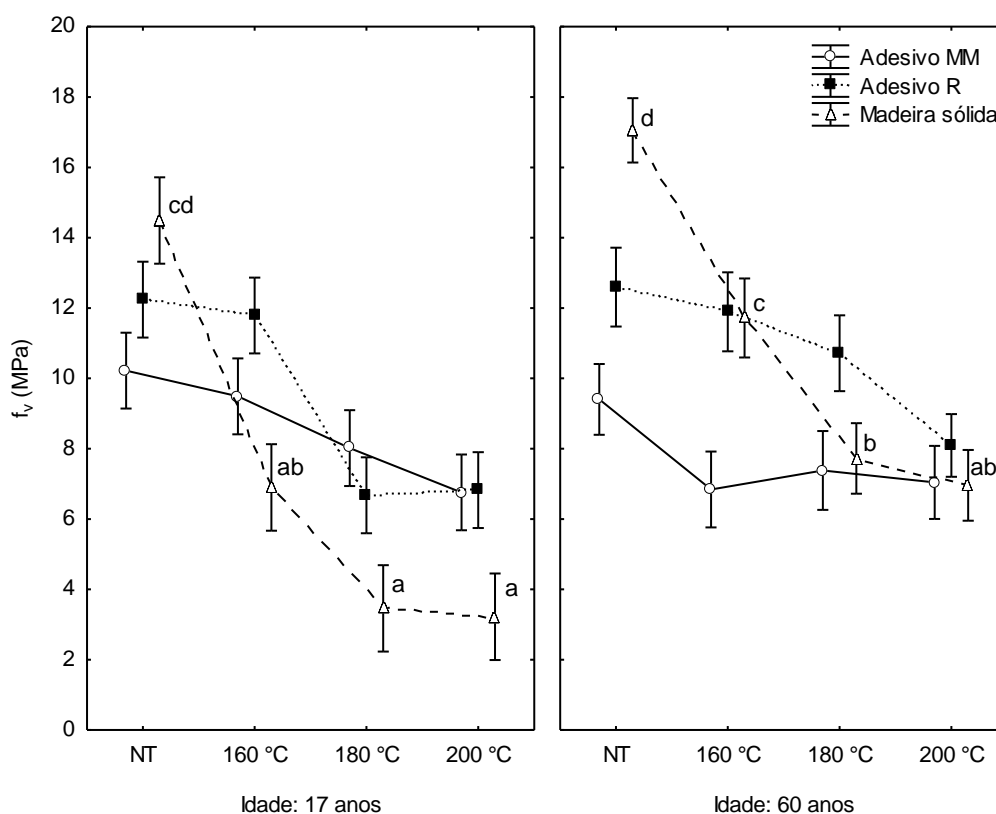


Figura 10. Valores médios de resistência ao cisalhamento nas juntas e na madeira sólida da espécie *C. citriodora* com 17 e 60 anos de idade em função do tipo de tratamento e adesivo. R: adesivo resorcinol; MM: adesivo poliuretano vegetal de mamona. Letras minúsculas iguais representam médias que não diferem entre si estatisticamente.

Para a espécie *E. pellita* com 17 anos, a resistência da adesão supera a da madeira sólida em quase todos os tratamentos, com exceção da madeira não tratada com MM, e tratada a 180°C com R, onde neste último caso, os valores de resistência das juntas são muito próximos aos da madeira sólida, chegando a 0,95 a resistência relativa. Nunes et al. (2016) estudando as mesmas espécies coladas com resorcinol encontraram resultados próximos para madeira não tratada, e termicamente tratada à 180 e 200°C.

Sun et al. (2013), estudando propriedades mecânicas da madeira sólida e tratada termicamente com diferentes temperaturas de *E. pellita*, observaram uma diminuição gradativa no módulo de ruptura conforme a temperatura de tratamento aumentava, ou seja, a temperatura também pode afetar outras propriedades mecânicas da madeira.

Os valores de resistência ao cisalhamento na madeira sólida são bem semelhantes ao que se encontra na literatura para madeira de *Eucalyptus sp.* não tratada, com relação à densidade da espécie estudada (LOBÃO; GOMES, 2006; NASCIMENTO et al., 2001; NUNES et al., 2016; PLASTER et al., 2008; VITAL et al., 2006).

A análise de variância feita para a madeira sólida para as duas espécies de 17 anos é apresentada na Tabela 6. O efeito da espécie, tratamento e interação espécie x tratamento, é significativo para a resistência da madeira sólida como indica o valor p, com 95% de confiança. Já para a espécie *C. citriodora* com 17 e 60 anos, a análise de variância para a madeira sólida indica que somente a idade e o tratamento têm efeito significativo na resistência e o resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 6. Valores de F e p da madeira sólida para as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* de 17 anos.

Fonte de variação	F	Valor p
Espécie	28,938	0,000001*
Tratamento	201,995	0,000000*
Espécie*Tratamento	9,331	0,000027*

* Significativo à 95% de probabilidade.

Tabela 7. Valores de F e p da madeira sólida da espécie *C. citriodora* de 17 e 60 anos

Fonte de variação	F	Valor p
Idade	36,9129	0,0000*
Tratamento	63,8253	0,0000*
Idade*Tratamento	0,5869	0,6251

* Significativo à 95% de probabilidade.

3.2.1. Resistência ao cisalhamento das juntas de madeira com 17 anos

Comparando somente os valores de resistência das juntas coladas, entre as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* na mesma idade, observa-se que os valores de resistência para as duas espécies são bem próximos quando usado o mesmo adesivo, e até estatisticamente iguais em algumas médias, diferindo somente na madeira não tratada. Estatisticamente nota-se que há efeito significativo da espécie nos valores de resistência, explicando assim, que apesar de

valores de resistência semelhantes entre as duas espécies, há diferença estatística entre elas. A análise de variância também mostra que há efeito significativo do tratamento, adesivo e da interação espécie x adesivo, espécie x tratamento e uma tripla interação entre estes dois últimos, como indica a Tabela 8.

Os autores Nunes et al. (2016) testando juntas coladas das mesmas espécies com resorcinol, encontraram valores parecidos de resistência ao cisalhamento na linha de cola para a madeira não tratada, e tratada e 180 °C. Já para o tratamento de 200°C, os valores de resistência encontrados pelos mesmos foram um pouco menores; 5,50 e 5,53 MPa para *C. citriodora* e *E. pellita* respectivamente, quando comparado com 6,82 e 7,95 MPa obtidos.

Já os autores Clauss et al. (2011), estudando a espécie *Fagus sylvatica* L. com densidade próxima do *E. pellita* com 17 anos, obtiveram resistência ao cisalhamento na linha de cola de 12,55 MPa, para as juntas tratadas à 150 °C, valor este parecido com a resistência de *E. pellita* (12,84 MPa), no tratamento de 160 °C.

Tabela 8. Valores de F e p para as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com idade de 17 anos.

Fonte de variação	F	Valor p
Espécie	4,06	0,0457*
Tratamento	194,33	0,0000*
Adesivo	66,36	0,0000*
Espécie*Tratamento	0,56	0,6420
Espécie*Adesivo	11,89	0,0007*
Tratamento*Adesivo	51,81	0,0000*
Espécie*Tratamento*Adesivo	5,28	0,0017*

* Significativo à 95% de probabilidade

Ainda comparando as diferentes espécies de mesma idade, porém coladas com MM, observa-se na Figura 11, que o comportamento da resistência ao cisalhamento na linha de cola são semelhantes, onde os valores de resistência sem tratamento térmico apresentaram valores distintos entre si, sendo que a madeira de *E. pellita* mostrou-se menos resistente do que a *C. citriodora*; com o adesivo resorcinol foi o contrário, a primeira espécie apresentou valores de resistência maiores quando comparada com o *C. citriodora*. No uso do adesivo MM, percebe-se redução gradativa da resistência da ligação à medida que se aumenta a temperatura do tratamento das madeiras, não havendo diferença na resistência para os diferentes tratamentos térmicos.

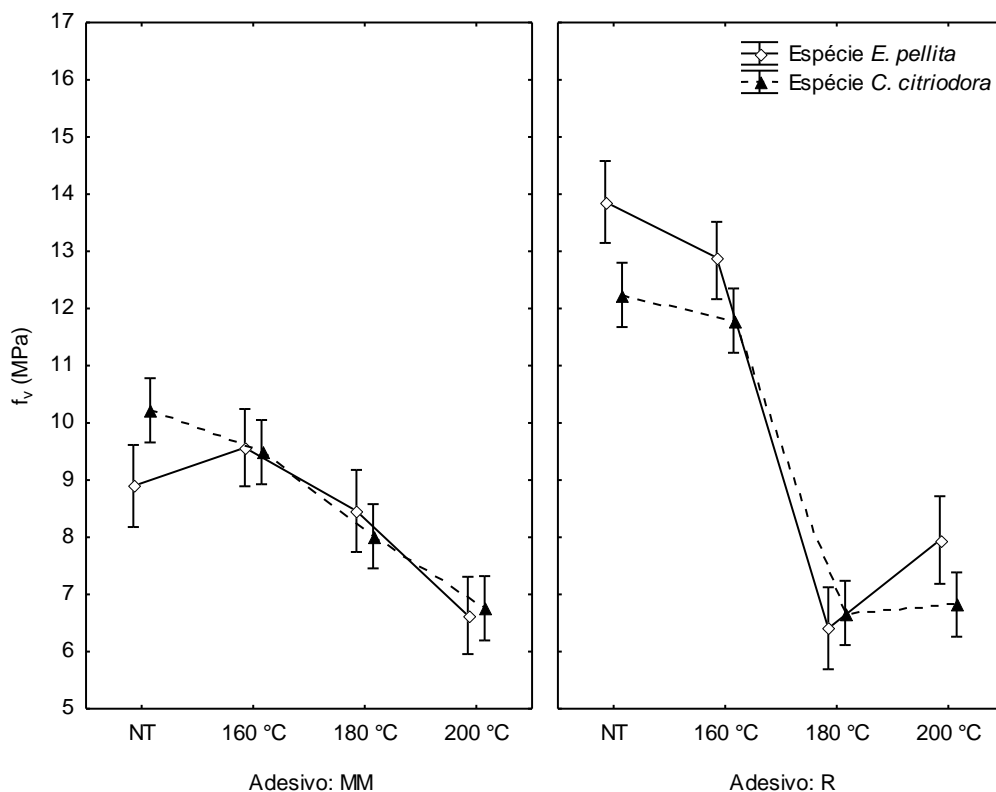


Figura 11. Resistência ao cisalhamento nas juntas coladas, comparando as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com idade de 17 anos, nos diferentes tratamentos e adesivos

Azambuja; Dias (2002) encontraram valores de resistência ao cisalhamento para madeira laminada colada não tratada, com as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribae hondurensis*, com poliuretano de mamona, de 9,84 Mpa, valor este próximo do encontrado para as espécies alvo de estudo no presente trabalho. Os autores Bianche et al. (2017), ao ensaiarem juntas coladas com poliuretano de mamona de madeira de *Eucalyptus* sp., com densidade média de 0,67 g/cm³, encontraram valores de resistência de 9,26 Mpa, valor este também semelhante ao obtido neste trabalho para a madeira não tratada termicamente.

Madeiras coladas com o adesivo R, apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento na ligação nas amostras tratadas até 160°C, ocorrendo uma queda acentuada da resistência acima deste valor, independente da espécie. Na condição de tratamento a 160°, 180° e 200°C, o desempenho da resistência ao cisalhamento foi igual para as duas madeiras.

Comparando o adesivo R com MM, observa-se que o adesivo MM teve redução de resistência menos intensa a medida que se aumentou a temperatura de tratamento.

Observa-se que o R teve um desempenho superior para madeira não tratada e tratada a 160°C, enquanto que na temperatura de 180°C, o adesivo MM obteve um melhor desempenho, o que poderia estar associado com as características hidrofóbicas e estabilidade térmica do poliuretano a base de óleo de mamona como sugere os autores Marinho et al. (2013) nos seus estudos. Na temperatura de 200°C, o desempenho entre os adesivos e madeiras não apresentou diferenças estatísticas.

Através de uma avaliação visual e qualitativa, as amostras submetidas a temperatura de 200°C se mostraram mais fragilizadas, com fissuras principalmente acompanhando os raios, o que pode ter gerado menores valores de resistência para as duas espécies.

3.2.2. Resistência das juntas coladas de madeira de *C. citriodora* de diferentes idades

O comportamento da resistência ao cisalhamento na linha de cola para a espécie *C. citriodora* com 17 anos, colada com o adesivo MM, obteve um desempenho semelhante a madeira de 60 anos, sendo superior apenas quando a madeira foi tratada a 160°C. Isto se confirma na análise de variância onde o efeito da idade na resistência da espécie foi estatisticamente não significativa, enquanto que o tratamento, adesivo e as interações idade x tratamento, idade x adesivo, tratamento x adesivo e a interação tripla entre estes últimos fatores se mostrou significativa à 95% de probabilidade (Ver Tabela 9).

Tabela 9. Valores de F e p para a espécie *C. citriodora* com idades de 17 e 60 anos.

Fonte de variação	F	Valor p
Idade	2,46	0,1183
Tratamento	131,95	0,0000*
Adesivo	157,83	0,0000*
Idade*Tratamento	16,43	0,0000*
Idade*Adesivo	59,07	0,0000*
Tratamento*Adesivo	21,53	0,0000*
Idade*Tratamento*Adesivo	7,51	0,0001*

* Significativo à 95% de probabilidade

A madeira com 60 anos de idade e colada com MM, parece sofrer de imediato o efeito do tratamento térmico, devido a acentuada redução dos valores de resistência da ligação quando a madeira é tratada termicamente (Figura 12), o que pode ser explicado pela alta densidade das amostras com a idade de 60 anos, sugerindo que a temperatura de 160°C não tenha sido suficiente para aumentar a penetração do adesivo poliuretano na madeira, gerando assim uma linha de cola fraca.

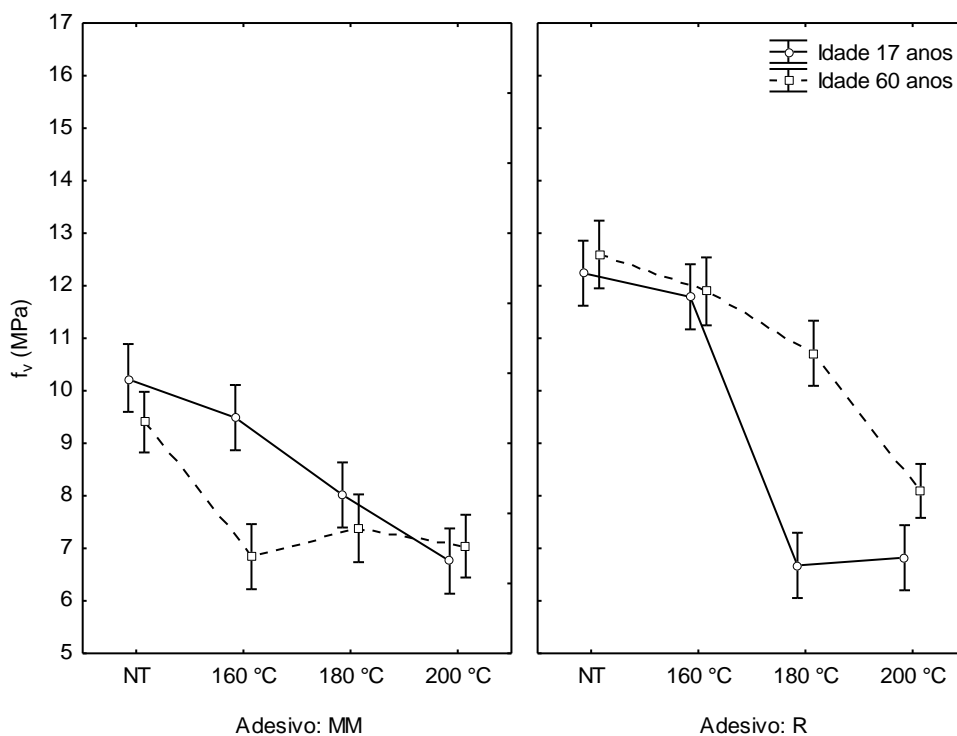


Figura 12. Resistência das juntas coladas com madeira tratada e não tratada termicamente, com poliuretano vegetal de mamona e resorcinol para as madeiras da espécie *C. citriodora* com idades de 17 e 60 anos.

Os autores Lobão; Gomes (2006) e Plaster et al. (2008), estudando juntas coladas com resorcinol de *Eucalyptus sp.* de alta densidade, entre 0,81 e 0,99 g/cm³, obtiveram resultados de resistência ao cisalhamento na linha de cola de 9,7 e 13,5 Mpa respectivamente, valores estes próximos ao obtido neste trabalho, o qual foi de 12,59 Mpa.

As juntas coladas com o R apresentaram melhor desempenho da resistência na idade de 60 anos quando comparada com a de 17 anos, somente para madeira tratada com temperatura acima de 160 °C, obtendo valores similares para madeira não tratada e tratada a 160°C.

O adesivo R mostrou melhores resultados de resistência na idade de 60 anos quando comparado com o MM, porém para a idade de 17 anos, o desempenho dos dois adesivos se assemelha a partir da temperatura de 160°C.

3.2.3. Teor de umidade e densidade aparente das juntas de madeira tratadas e não tratadas termicamente

Os valores de densidade e teor de umidade das juntas são apresentados na Tabela 10. Nota-se que independente da espécie e da idade, os valores de umidade são inversamente proporcionais ao aumento da temperatura de tratamento, ou seja, conforme a temperatura aumenta, o teor de umidade das juntas diminui, fato este explicado pela redução da higroscopicidade da madeira devido à degradação da hemicelulose e redução dos grupos hidroxílicos, ocasionado pela cristalização da celulose (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006). Este fator também está relacionado à resistência das juntas coladas pois há uma perda de massa na madeira, como mencionado anteriormente.

Tabela 10. Valores de densidade aparente para os respectivos teores de umidade de equilíbrio das juntas coladas, das espécies *C. citriodora* com 17 e 60 anos e *E. pellita* com idade de 17 anos.

Tratamento Térmico (°C)	<i>C. citriodora</i>				<i>E. pellita</i>	
	60 anos		17 anos		17 anos	
	ρ aparente	TU (%)	ρ aparente	TU (%)	ρ aparente	TU (%)
NT	1,075 (0,02)	11,8 (1,41)	0,844 (0,04)	11,8 (1,51)	0,741 (0,04)	11,7 (0,43)
160	1,048 (0,02)	7,7 (1,13)	0,818 (0,02)	8,3 (0,62)	0,735 (0,01)	10,1 (1,41)
180	0,992 (0,04)	7,4 (1,82)	0,765 (0,05)	6,9 (1,32)	0,716 (0,02)	6,9 (0,50)
200	0,966 (0,05)	6,1 (2,01)	0,773 (0,08)	6,1 (1,94)	0,728 (0,05)	6,2 (0,29)
média	1,020	8,2	0,800	8,3	0,730	8,7

ρ aparente: Densidade aparente das juntas na condição do teor de umidade encontrado, em g/cm³. TU (%): teor de umidade de equilíbrio das juntas em porcentagem. Valor entre parêntese é o desvio padrão.

Em todas as espécies e idades, nota-se que os valores de umidade entre os tipos de tratamentos são próximos, com exceção do tratamento de 160°C onde a espécie *E. pellita* 17 anos apresentou uma umidade de 10,1 % enquanto que o *C. citriodora* com 17 e 60 anos, mostraram valores de 8,3 % e 7,7 % respectivamente.

Os valores de densidade aparente de uma maneira geral, apresentam uma redução na madeira não tratada para a tratada à 200°C.

As análises de correlação de Pearson entre a densidade, tratamento, teor de umidade e os valores de resistência das juntas das duas espécies com 17 anos são apresentadas na Tabela 11. A correlação entre as temperaturas de tratamento e teor de umidade das juntas foi significativa e negativa para ambas as espécies, apresentando valores altos de correlação de -0,84 e -0,88 para *C. citriodora* e *E. pellita*, respectivamente. Da mesma forma foi a correlação entre resistência e temperatura de tratamento, onde os valores são significativos e negativos para ambas as espécies.

Tabela 11. Valores de correlação de Pearson da resistência ao cisalhamento com o tratamento, densidade e teor de umidade das juntas, para as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com idade de 17 anos.

Espécies	Característica	Tratamento	TU (%)	Densidade	f_v (MPa)
<i>C. citriodora</i>	Tratamento	1,00	-0,84 *	-0,46 *	-0,71 *
	T.U (%)	-	1,00	0,45 *	0,60 *
	Densidade	-	-	1,00	0,57
	f_v (MPa)	-	-	-	1,00
<i>E. pellita</i>	Tratamento	1,00	-0,88 *	-0,25	-0,61 *
	T.U (%)	-	1,00	0,45 *	0,66 *
	Densidade	-	-	1,00	0,50 *
	f_v (MPa)	-	-	-	1,00

* Significativo a 95% de confiança

Já a correlação entre densidade e tratamento foi significativa apenas para a espécie *C. citriodora*, demonstrando também ser negativa. A correlação entre densidade e resistência

apresentou valores positivos para ambas as espécies, porém, significativo somente para a espécie *E. pellita* (0,50).

Analisando a correlação entre teor de umidade e resistência ao cisalhamento, os valores de correlação foram positivos e significativos para as duas espécies, sendo 0,60 para *C. citriodora* e 0,66 para *E. pellita*.

As mesmas análises de correlação foram realizadas para a espécie *C. citriodora* com 60 anos de idade e estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de correlação de Pearson da resistência ao cisalhamento com o tratamento, densidade e teor de umidade das juntas, para a espécie *C. citriodora* com idade de 60 anos.

Espécie	Característica	Tratamento	TU (%)	Densidade	f _v (MPa)
<i>C. citriodora</i>	Tratamento	1,00	-0,80 *	-0,70 *	-0,53 *
	TU (%)	-	1,00	0,66 *	0,52 *
	Densidade	-	-	1,00	0,52 *
	f _v (MPa)	-	-	-	1,00

* Significativo a 95% de confiança

A correlação entre teor de umidade das juntas e o tratamento foi significativa e negativa, apresentando um resultado de correlação muito próximo do encontrado para a mesma espécie, mas com 17 anos de idade. Ainda, a correlação entre resistência e tratamento também apresentou valores significativos e negativos (-0,53).

Para a correlação entre densidade e tratamento, teor de umidade e resistência, os valores de correlação foram todos significativos ($P \leq 0,95$), e negativo somente para o tratamento, enquanto que para o teor de umidade e resistência, os valores foram positivos.

3.3. Composição química das espécies

Os valores de holocelulose, lignina de Klason (lignina insolúvel) e extrativos totais são apresentados na Tabela 13. O teor de lignina para as duas espécies, independentemente da idade, mostrou um aumento gradativo nas temperaturas de tratamento, fato este que não indica a formação de novos polímeros, mas sim uma maior concentração destes, visto que outros componentes químicos tendem a degradar conforme se aumenta a temperatura, principalmente a hemicelulose que após sofrer despolimerização, é dividida em cadeias menores, facilitando a condensação da lignina (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; POUBEL et al., 2013; ÖZGENÇ et al., 2016).

Tabela 13. Percentual de lignina insolúvel, holocelulose e extrativos totais da madeira de *C. citriodora* e *E. pellita* com 17, e *C. citriodora* com 60 anos.

		%			
		Tratamento (°C)	Lignina	Holocelulose	Extrativos
17 anos	<i>E. pellita</i>	NT	19,7 ^(1,06)	74,9 ^(0,84)	1,1
		160	19,2 ^(4,01)	65,9 ^(3,77)	0,7
		180	25,5 ^(4,01)	60,3 ^(0,81)	1,6
		200	31,2 ^(1,65)	55,5 ^(1,22)	1,8
	<i>C. citriodora</i>	NT	20,5 ^(0,71)	72,4 ^(0,53)	1,0
		160	19,5 ^(0,71)	77,2 ^(0,69)	0,9
		180	21,7 ^(2,36)	64,9 ^(0,94)	4,4
		200	22,3 ^(0,47)	58,9 ^(0,35)	3,1
60 anos	<i>C. citriodora</i>	NT	21,7 ^(0,94)	71,5 ^(0,86)	2,4
		160	16,3 ^(2,36)	73,0 ^(0,99)	3,2
		180	16,8 ^(1,65)	64,7 ^(1,56)	1,1
		200	19,8 ^(3,54)	61,9 ^(0,68)	4,5

NT: madeira não tratada. Valores em parênteses representam o desvio padrão da média.

Comparando as duas espécies com a mesma idade, nota-se que no *E. pellita*, o teor de lignina possui valores mais altos nas temperaturas de 180 e 200 °C, o que poderia ser explicado pelos menores teores de holocelulose desta espécie (Figura 13).

Comparando as idades de 17 e 60 anos da espécie *C. citriodora*, é possível observar menores teores de lignina na idade de 60 anos nas temperaturas de tratamento, em comparação com a idade de 17 anos.

Houve uma redução do teor de holocelulose da madeira não tratada para o tratamento de 200°C, o que já era esperado já que a hemicelulose é um dos componentes químicos da madeira que mais sofre efeito do tratamento térmico. De acordo com os autores Windeisen et al. (2007), os carboidratos encontrados na madeira são mais passíveis de sofrer degradação com o tratamento térmico, em comparação a outros constituintes químicos, devido a estrutura amorfa e ramificada, além da liberação de ácido acético, consequência da separação dos grupos acetil, facilitando a quebra da ligação de grupos glicosídicos. Desta forma, os produtos oriundos da degradação destes açúcares podem vir a condensar ou fazer ligações cruzadas entre si.

A madeira de *C. citriodora* nas duas idades, apresentou um aumento do teor de holocelulose para o tratamento de 160 °C e depois uma queda gradativa até a última temperatura de tratamento. Para melhor entender este resultado, seria necessária uma análise mais detalhada dos carboidratos constituintes da madeira desta espécie, porém, tal fato pode sugerir que há uma maior fração celulósica com maiores quantidades de regiões cristalinas na celulose, implicando em uma maior dificuldade de degradação destes componentes até a temperatura de 160°C. Os autores Hakkou et al. (2005), estudando *Fagus sylvatica*, concluíram que a cristalinidade da celulose reduz entre 100 e 160°C devido a quantidade de regiões amorfas, e que temperaturas acima de 200°C levam a maior cristalinidade, não só pelas reações de degradação dos polissacarídeos menos estáveis, como também pela plastificação da lignina que leva a reorganização conformacional de componentes poliméricos da madeira onde entre eles estão os polissacarídeos.

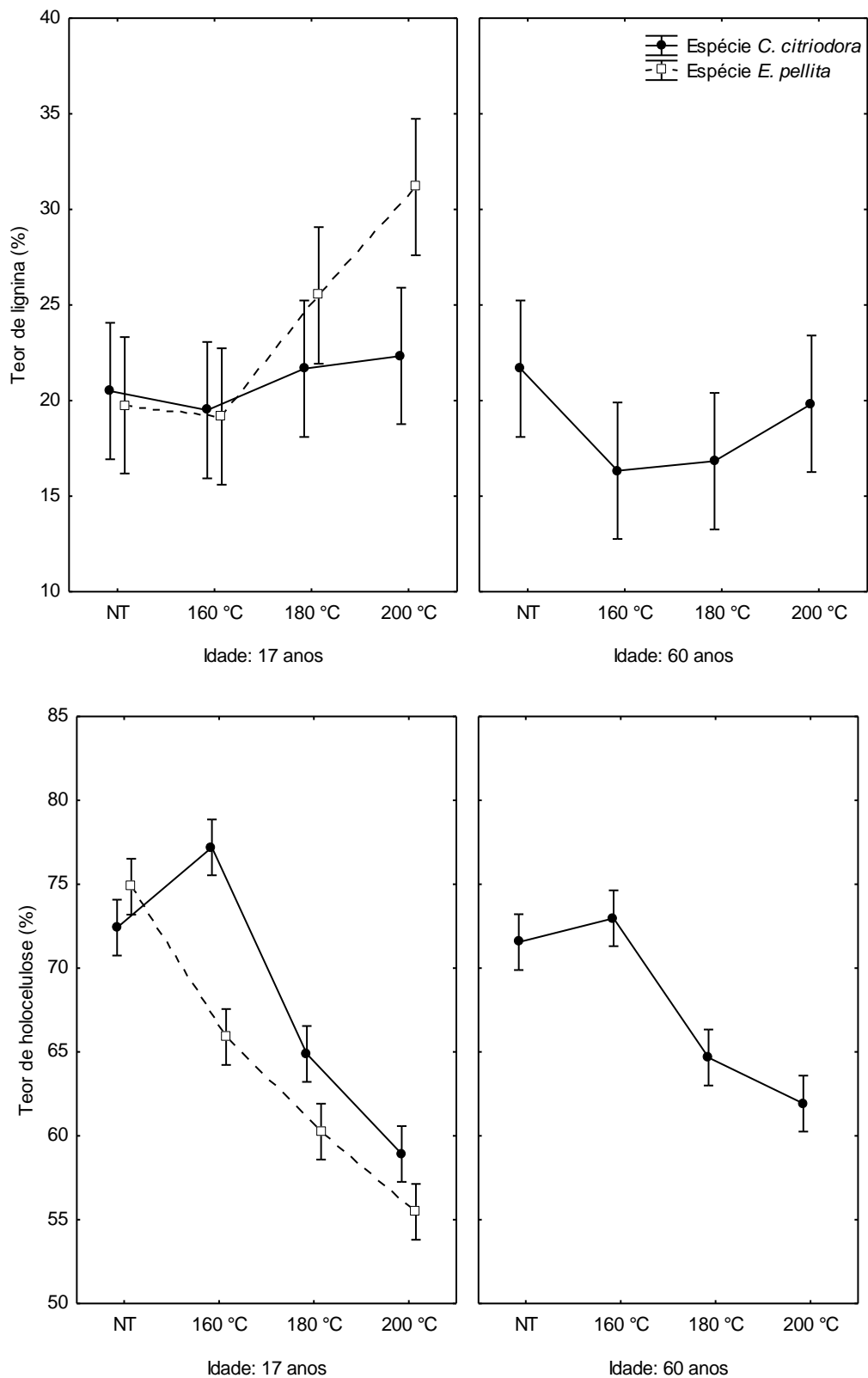


Figura 13. Teor de lignina e holocelulose da madeira das espécies *C. citriodora* com 17 e 60 anos e *E. pellita* com 17 anos, não tratada e tratada termicamente à diferentes temperaturas.

Os teores de extrativos das espécies estudadas são menores do que o encontrado na literatura (MEDEIROS et al., 2016; Oliveira et al., 2010) e variam de 1 a 2,4 %, 0,7 a 3,2 %, 1

a 4,4 % e 1,8 a 4,5 %, para a madeira não tratada e tratada a 160, 180 e 200°C respectivamente, onde na última temperatura os valores são maiores, principalmente na madeira de *C. citriodora*, independente da idade. Poubel et al. (2013) também encontraram um aumento do teor de extrativos nas temperaturas de 200 e 220°C, estudando *Pinus caribaea*.

É interessante observar que a madeira de *C. citriodora* com 60 anos, apresentou o menor valor de extrativos na temperatura de 180°C, enquanto que para a idade de 17 anos e para a mesma temperatura, esta espécie obteve o maior valor no teor de extrativos. Este resultado é explicado pelos diferentes tipos de extrativos presentes na madeira, e que sofrem influência do meio, como o local, idade, ataques de xilófagos, variação climática, entre outros fatores, assim como outros componentes químicos, os quais variam até mesmo dentro de um único indivíduo.

3.4. Percentual de falha na madeira das juntas após ensaio mecânico

O percentual de falha na madeira para as duas espécies com 17 e 60 anos tem seu resultado apresentado na Tabela 14. Analisando as espécies estudadas, pode-se observar que independente do adesivo ou idade, há um aumento da porcentagem de falha conforme se aumenta a temperatura do tratamento térmico, gerando uma maior penetração do adesivo devido à um aumento da porosidade e fissuração da superfície a medida que se aumenta a temperatura de tratamento.

Porém, é importante lembrar que dependendo da temperatura há uma maior fragilização da madeira, como citado anteriormente, gerando uma falsa ideia de que a falha na madeira é um indicativo de uma boa colagem, e que neste caso, deve-se também levar em consideração os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola e densidade da madeira, como por exemplo, a espécie *E. pellita* no tratamento de 180°C, que apresentou em todas as juntas cem por cento de falha na madeira, porém, quando se compara com os valores de resistência na Tabela 1, para este mesmo tratamento e adesivo, tem-se um valor baixo de 6,41 MPa.

Tabela 14. Porcentagem de falha na madeira das juntas coladas com os adesivos poliuretano vegetal de mamona e resorcinol, em função do tipo de tratamento, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos e *C. citriodora* com 60 anos de idade.

Tratamento	Adesivo	Falha na madeira (%)		
		<i>C. citriodora</i>		<i>E. pellita</i>
		60 anos	17 anos	17 anos
NT	MM	0,7	19,9	69,8
	R	6,3	60,8	96,5
160°C	MM	10,3	28,4	62,1
	R	<u>57,6</u>	91,5	94,3
180°C	MM	<u>35,0</u>	68,1	92,6
	R	89,2	96,4	100,0
200°C	MM	<u>33,0</u>	71,7	88,5
	R	98,7	98,3	97,1

MM: poliuretano vegetal de mamona. R: resorcinol. Os valores em negrito não atingiram o mínimo aceitável de porcentagem de falha por grupo de 30% de acordo com a ASTM D5751 – 99 (2012). Os valores sublinhados não atingiram o mínimo aceitável de 15% de porcentagem de falha na linha de cola por amostra de acordo com a ASTM D5751 – 99 (2012).

Para atingir aos parâmetros mínimos desejáveis para uma adesão satisfatória de acordo com a American Standards for Testing and Material (2012), ASTM D5751 – 99 (2012), a porcentagem de falha na madeira no grupo analisado, deve ser de no mínimo 30% para as folhosas. Já quando se analisa individualmente cada amostra, esta porcentagem cai para 15%, sendo que este valor deve se apresentar em pelo menos 90% das amostras testadas, não podendo haver em nenhuma amostra um valor igual a zero, o que neste caso, o teste é considerado não satisfatório para o adesivo naquela condição de colagem.

Quando se discute o percentual de falha em relação ao tipo de adesivo, o poliuretano gerou menores porcentagens de falha na madeira quando comparado com o resorcinol, e isto pode ser devido à sua maior viscosidade e rápida reação de polimerização, além de uma possível pré-polimerização do adesivo que contribui para valores de resistência menores (BIANCHE et al., 2016). Estes mesmos autores avaliando qualidade de adesão de *Eucalyptus* sp com poliuretano de mamona e resorcinol também encontraram maiores valores de porcentagem de falha na madeira para o resorcinol.

A espécie *E. pellita* apresentou valores de falha na madeira maiores que o *C. citriodora* com 17 anos, independentemente do tratamento térmico ou adesivo. Os autores Nunes et al. (2016) também encontraram os mesmos resultados para as mesmas espécies.

Avaliando as duas espécies com a mesma idade, a espécie *C. citriodora* não atingiu às especificações mínimas exigidas pela norma americana para as juntas não tratadas e tratadas a 160 °C, coladas com o poliuretano vegetal. Para o *E. pellita*, ambos os adesivos foram aprovados, tanto na madeira não tratada como no tratamento térmico.

A espécie *C. citriodora* com 60 anos apresentou os menores valores de porcentagem de falha na madeira, indicando uma qualidade de colagem inferior à idade de 17 anos, o que pode ter influência pela sua densidade elevada, principalmente na madeira não tratada, a qual apresentou para o adesivo de mamona um rompimento em grande parte das amostras na linha de cola. Assim, as juntas coladas com mamona não atenderam às especificações da norma americana em nenhum tratamento, nem como as juntas coladas com o resorcinol, não tratadas e a 160°C.

3.5. Resistência das juntas após ciclo de envelhecimento acelerado

Parte das juntas coladas foram destinadas a uma simulação de envelhecimento acelerado em laboratório e os resultados de resistência ao cisalhamento na linha de cola, e perda percentual da resistência após o ciclo de envelhecimento são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Valores de resistência relativa, e valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola, nas juntas coladas das espécies *C. citriodora* e *E. pellita*, para os diferentes tratamentos, adesivos e idades, após condições de envelhecimento acelerado.

		<i>C. citriodora</i>				<i>E. pellita</i>	
Tratamento	Adesivo	60 anos		17 anos		17 anos	
		f_v (Mpa)	r (%)	f_v (Mpa)	r (%)	f_v (Mpa)	r (%)
NT	MM	2,43 ^(0,20)	-74,2	2,57 ^(0,44)	-74,9	4,80 ^(0,24)	-46,0
	R	3,10 ^(1,35)	-75,4	10,25 ^(1,25)	-16,2	9,64 ^(0,71)	-30,4
160°C	MM	2,45 ^(0,30)	-64,2	2,23 ^(0,17)	-76,6	2,48 ^(1,01)	-74,1
	R	8,84 ^(1,99)	-25,7	8,14 ^(1,34)	-30,9	11,72 ^(1,76)	-8,7
180°C	MM	3,20 ^(1,41)	-56,6	4,81 ^(1,57)	-40,1	6,05 ^(2,25)	-28,5
	R	8,51 ^(1,25)	-20,6	5,32 ^(0,35)	-20,3	5,19 ^(1,11)	-18,9
200°C	MM	2,54 ^(1,54)	-63,9	5,46 ^(0,38)	-19,2	5,60 ^(0,60)	-15,5
	R	6,8 ^(1,18)	-16,0	4,35 ^(1,43)	-36,3	6,28 ^(1,66)	-21,0

Onde: MM: poliuretano de mamona. R: resorcinol. NT: não tratadas (controle). f_v : resistência ao cisalhamento na linha de cola nas juntas coladas. r (%): mudança percentual da resistência após envelhecimento, valores negativos indicam perda de resistência e valores positivos, ganho. Valores entre parênteses são o desvio-padrão.

Após a simulação de envelhecimento acelerado em laboratório, pode-se observar que houve uma perda de resistência em todos os casos, indicada pelos valores negativos. Comparando as duas espécies com a mesma idade, e coladas com o adesivo MM, há uma semelhança no comportamento dos valores de r (%), onde nota-se uma perda de resistência maior num primeiro momento e a partir de 160°C, essa perda é reduzida como indica a Figura 14. Isto indica que o tratamento térmico tem efeito positivo quando a madeira é exposta a condições externas durante longos períodos, ou seja, a perda de resistência é menor conforme os valores da temperatura de tratamento aumentam, partindo de uma perda de 80% para 10% da resistência inicial.

Este comportamento é semelhante quando se analisa a espécie *C. citriodora* com 60 anos, também colada com MM, porém a partir do tratamento de 180°C a perda de resistência inicial aumenta. Para esta idade de uma forma geral, a perda da resistência é maior quando comparada com a idade de 17 anos.

Comparando os valores de r (%) para as juntas coladas com o resorcinol para as duas espécies com 17 anos, percebe-se que há um comportamento inverso entre as espécies até a temperatura de 180°C, onde os valores de r (%) quase se igualam. Com este adesivo há uma menor variação de perda de resistência (entre 36 a 8%) quando comparado com o MM.

Ainda analisando o resorcinol, porém para a idade de 60 anos, é interessante observar que a perda de resistência após envelhecimento diminuiu consideravelmente de quase 80% para 10% conforme a temperatura aumenta, muito semelhante à idade de 17 anos colada com MM.

A análise de variância indica que há efeito significativo na resistência ao cisalhamento das amostras envelhecidas em laboratório da espécie, tratamento, adesivo e das interações tratamento x adesivo e espécie x tratamento x adesivo (Tabela 16).

Tabela 16. Valores de F e p de resistência nas juntas, após envelhecimento em laboratório, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos de idade.

Fonte de variação	F	Valor p
Espécie	11,087	0,001791*
Tratamento	4,287	0,009847*
Adesivo	107,117	0,000000*
Espécie*Tratamento	0,885	0,456305
Espécie*Adesivo	0,125	0,725753
Tratamento*Adesivo	41,728	0,000000*
Espécie*Tratamento*Adesivo	4,650	0,006671*

*Significativo à 95% de probabilidade

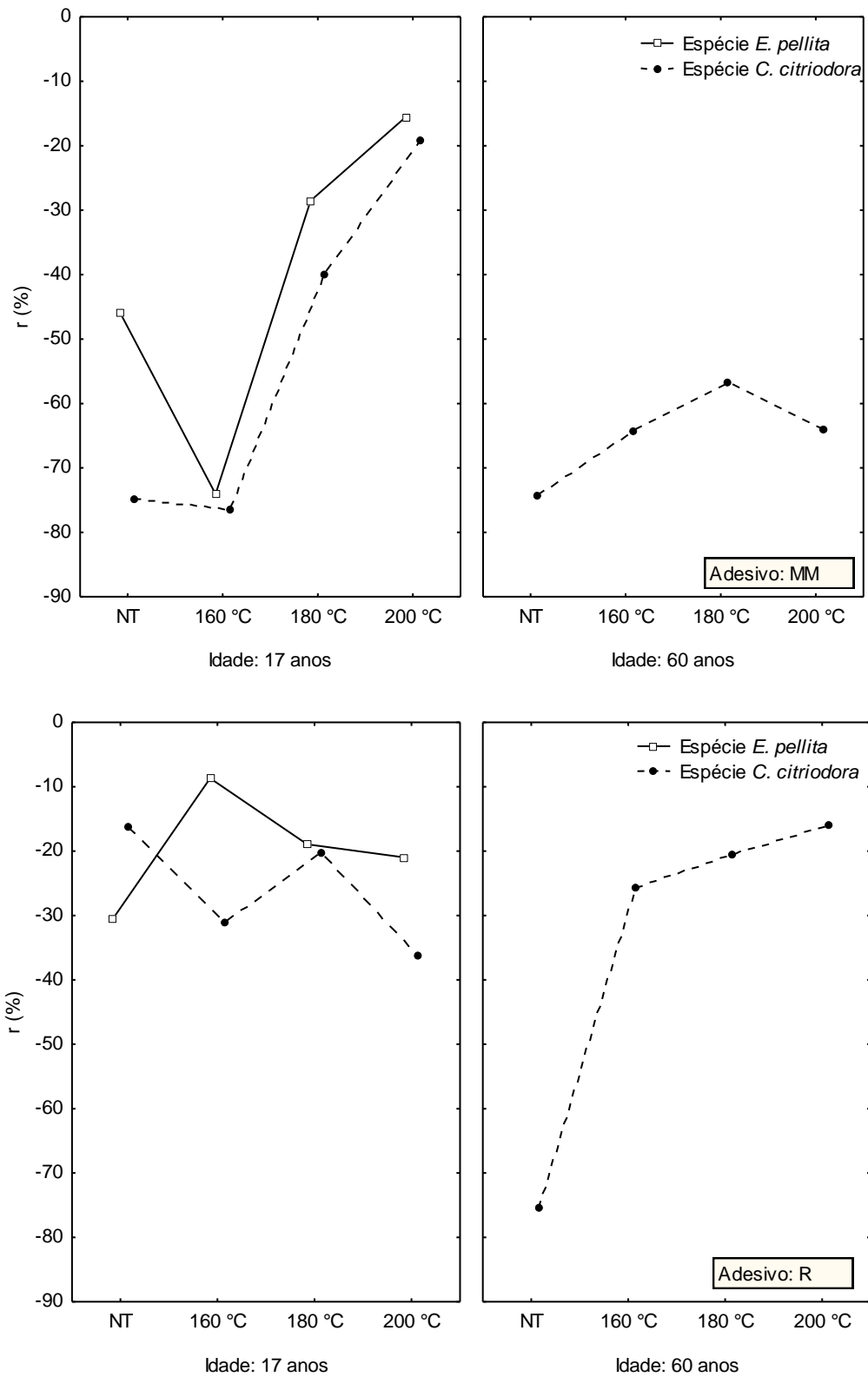


Figura 14. Valores de r (%) das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* em função do tratamento, idade e adesivo, onde o primeiro gráfico (superior) se refere às juntas coladas com o poliuretano vegetal e o segundo gráfico (inferior) ao adesivo resorcinol.

As porcentagens de falha na madeira para estas amostras são apresentadas na Tabela 17. Valores muito baixos de falha ocorreram nas espécies com 17 anos; 0,7% em *C. citriodora*, 1% em *E. pellita* e 0, 0,6 e 7,1% em *C. citriodora* com 60 anos. Tais valores são justificados pela quantidade de juntas que delaminaram completamente ou parcialmente.

Na maioria dos tratamentos das juntas coladas com resorcinol, independente da espécie ou idade, a falha na madeira resultou em percentuais maiores quando comparado com o MM. Este resultado é semelhante ao encontrado nas juntas não envelhecidas. Porém, alguns tratamentos e adesivos resultaram em percentuais opostos, como por exemplo a espécie *C. citriodora* com 60 anos à 160°C, colada com MM, que obteve 80% (2,45 Mpa) de falha na madeira após o envelhecimento enquanto que as juntas não envelhecidas apresentaram um valor de 10,3% (6,84 Mpa).

Tabela 17. Porcentagem de falha na madeira das juntas coladas das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos e *C. citriodora* com 60 anos de idade, em função do tipo de tratamento e do adesivo, após ciclo de envelhecimento acelerado.

Tratamento	Adesivo	Falha na madeira (%)		
		<i>C. citriodora</i>		<i>E. pellita</i>
		60 anos	17 anos	17 anos
NT	MM	0,0	40,0	64,1
	R	0,6	39,6	68,9
160°C	MM	80,0	0,7	1,0
	R	69,6	96,4	100,0
180°C	MM	7,1	61,4	95,2
	R	88,6	99,4	100,0
200°C	MM	18,9	99,5	99,0
	R	22,0	98,3	100,0

Onde: MM: poliuretano de mamona. R: resorcinol. NT: não tratadas (controle).

4 CONCLUSÕES

O tratamento térmico proporcionou reduções na resistência mecânica tanto nas juntas coladas quanto na madeira sólida.

O tratamento térmico nas juntas resultou em um ganho de resistência quando comparado com a madeira sólida, sugerindo que para a colagem, o tratamento térmico de maneira geral pode ser considerado um aliado para uma boa adesão, porém, este ganho não foi observado em todas as temperaturas para os dois adesivos.

O adesivo resorcinol apresentou um melhor desempenho geral em comparação ao poliuretano nas juntas não envelhecidas e após simulação de envelhecimento.

Na idade de 17 anos, em ambas espécies, abaixo da temperatura de 180°C, o resorcinol mostrou melhores resultados de resistência, enquanto que acima desta temperatura, os dois adesivos se igualaram. A espécie *E. pellita* resultou em maiores valores de resistência.

A resistência das juntas coladas com o adesivo resorcinol apresentou resultados melhores em comparação ao poliuretano para a espécie *C. citriodora* aos 60 anos de idade. Adicionalmente, a temperatura de 200°C gerou valores de resistência nas juntas superiores ao da madeira sólida, mostrando um ganho em resistência quando se cola madeira de alta densidade.

A espécie *C. citriodora* com 17 resultou em maiores valores de resistência nas juntas, e menores na madeira sólida.

A variação térmica e de umidade relativa ao qual os adesivos foram submetidos durante o ensaio de envelhecimento acelerado proporcionou redução nos valores de resistência ao cisalhamento nas juntas coladas.

Os teores de lignina aumentaram com a temperatura, efeito da redução no teor de holocelulose. O teor de extrativos não apresentou uma relação entre as espécies, nem idades, e mostrou uma interação com a temperatura somente para a espécie *C. citriodora* com 17 anos.

CAPÍTULO 2

MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA NATURAL E TRATADA TERMICAMENTE DE *C. citriodora* E *E. pellita*

RESUMO

A molhabilidade da superfície da madeira pode ser entendida como um fator importante nos processos de adesão, e pode ser avaliada principalmente, por meio da análise do ângulo de contato entre a superfície e a gota do líquido teste. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do tratamento térmico, assim como da espécie, e da idade, na molhabilidade da superfície da madeira das espécies *C. citriodora* com 17 e 60 anos, e *E. pellita* com 17 anos, mediante análise do ângulo de contato da gota do líquido teste, por meio de um goniômetro, onde foi analisado a variação do ângulo em função do tempo de medição, tanto na superfície recém aplainada, quanto oxidada por um período de 1 (ano), nas temperaturas de tratamento térmico (160°, 180° e 200°C) e na madeira não tratada. As medições foram realizadas a cada 10 segundos durante 120 segundos. Os resultados mostram que o ângulo de contato diminuiu após modificação térmica, independente da temperatura e que a superfície aplainada resultou em menores valores do ângulo em comparação a superfície oxidada. A espécie *E. pellita* após tratamento térmico, apresentou na superfície aplainada, maiores valores de ângulo em comparação ao *C. citriodora* na mesma idade. Na superfície oxidada, a espécie *E. pellita* apresentou menores valores de ângulo de contato em comparação à segunda espécie na mesma idade. Não foi observado uma relação entre ângulo de contato e densidade da madeira ao analisar a espécie *C. citriodora* com 17 e 60 anos. Houve uma queda do ângulo de contato no decorrer do tempo de medição, onde a variação do ângulo foi menor na superfície oxidada.

Palavras-chave: ângulo de contato; tratamento térmico; superfície oxidada.

ABSTRACT

The wettability of the wood surface can be understood as an important factor in the adhesion processes, and it can be evaluated through the analysis of the contact angle between a surface and the probe liquid. Therefore, the aim of the present study was to evaluate the effect of heat treatment, as such as the specie and the age, on wood wettability of two species; *C. citriodora* with 17 and 60 years, and *E. pellita* with 17 years, through the analysis of the contact angle between the wood surface and the probe liquid, using a goniometer, on the planned and one-year oxidized surface, at the heat treatment temperatures (160°, 180° and 200° C) and also, on untreated wood. The measurements were taken each ten seconds during a total period of 120 seconds. The results showed that drop contact angle decreased after heat treatment, regardless of temperature and the planned surface showed smaller values of drop contact angle than the oxidized surface. The specie *E. pellita* presented on the planned surface, higher values of contact angle in comparison to *C. citriodora* at the same age. At the oxidized surface, the specie *E. pellita* presented smaller values of contact angle than the second specie at the same age. It was not observed a relation between contact angle and density of wood when analyzing *C. citriodora* with 17 and 60 years old. There was a decrease in contact angle over the measurement time, where the angle variation was smaller on the oxidized surface.

Keywords: contact angle; heat treatment; oxidized surface.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a molhabilidade da superfície da madeira é fator crucial para o entendimento do comportamento de um líquido qualquer, principalmente no que tange a penetração dos adesivos e preservativos na madeira, além de ser também utilizada para avaliar a biodeterioração da madeira à agentes do clima e xilófagos (STANGERLIN et al., 2013).

A molhabilidade no processo de colagem se torna importante, a partir do momento em que é possível criar uma relação entre o valor do ângulo de contato que um líquido faz com uma superfície e a velocidade em que este líquido é absorvido por ela. Ainda, a modificação da superfície com o tempo e a preparação da mesma, compõe um papel importante neste aspecto, visto que superfícies recém preparadas possuem uma molhabilidade superior àquelas que tiveram sua superfície inativada por diversos processos como oxidação, modificação térmica ou modificação de quantidade e natureza dos extrativos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Porém, quando se tenta criar uma relação somente entre a molhabilidade e a resistência de ligações adesivas, não é possível estabelecer uma correlação, pois diversos outros fatores possuem uma maior influência na colagem da madeira como densidade, composição química e rugosidade da superfície (HAKKOU et al., 2005, NUSSBAUM; STERLEY, 2002).

Diversas são as técnicas usadas para avaliação da molhabilidade, porém a mais utilizada é o método *telescope-goniometer* o qual faz a mensuração direta da tangente do ângulo em três pontos de contato no perfil de uma gota séssil, utilizando o método DSA (*drop shape analyzer*), equipamento mais recente e de melhor precisão (LOPES et al., 2018).

Sendo assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar o efeito do tratamento térmico, assim como a oxidação da superfície, na molhabilidade da madeira de *E. pellita* e *C. citriodora* com diferentes idades utilizando a o método DSA.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Equipamento utilizado e metodologia aplicada

A análise do ângulo de contato foi realizada utilizando a metodologia da gota séssil, com o auxílio do equipamento DSA 100 - *Drop Shape Analyzer* (Figura 15), versão 1.92 de KRÜSS GmbH (Hamburgo, Alemanha), utilizando-se como líquido teste a água destilada em temperatura ambiente de 25°C. Esta foi aplicada com uma seringa dosadora de volume de 500 µl, com agulha de 0,5 mm de diâmetro, e uma distância de 6 mm entre a agulha e a superfície. Aplicou-se uma gota de 50 µl e iniciado o tempo de medição do ângulo, com duração total de 120 segundos, cada medida era realizada a cada 10 segundos, resultando ao final do tempo, em 12 valores de ângulo por gota aplicada.

Primeiramente a gota foi aplicada nas lamelas para análise de ângulo na superfície oxidada, na sequência foram aplainadas somente na superfície que seria colada, para análise do ângulo nesta superfície. Foram realizadas 4 repetições por lamela em cada tratamento, totalizando 512 médias de ângulo de contato. As gotas eram aplicadas equidistantes ao longo da lamela, na face em que seria colada.

2.2. Material, delineamento experimental e análise estatística

Foram separadas um total de 128 lamelas, 12 lamelas para cada idade (17 e 60 anos) e tratamento (controle, 160, 180 e 200°C) da espécie *C. citriodora*, e 8 lamelas para cada tratamento da espécie *E. pellita* com 17 anos, para avaliação da molhabilidade antes da colagem, sendo que todas elas ficaram estocadas em laboratório com ambiente climatizado à 25°C e 65% de umidade relativa, pelo período de 1 ano. O delineamento experimental seguiu o que foi apresentado na Tabela 1 no Capítulo 1.

Estas médias foram analisadas estatisticamente com o auxílio do software Statsoft 7, sendo utilizado o teste de Kruskal-Wallis para médias não-paramétricas. A variável dependente analisada foi somente o valor do ângulo de contato em graus a cada 10 segundos para análise da sua variação em função do tempo, e a média do ângulo após os 120 segundos para análise comparativa entre as espécies, idades e tratamentos.



Figura 15. A: imagem de uma lamela sendo gotejada no equipamento DSA 100 *Drop Shape Analyzer*. B: imagem gerada no software do equipamento, onde é calculado o ângulo de contato da gota.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando se fala em adesão, para uma superfície possuir uma boa molhabilidade, ou seja, uma boa penetração do adesivo, o ângulo entre a gota e a superfície deve ser baixo, pois assim, entende-se que o líquido está se espalhando e penetrando na madeira. Esta variação da modificação do ângulo em função do tempo em que a gota foi aplicada também é importante, pois se a redução do ângulo for muito rápida, ou seja, acontecer em poucos segundos, isto pode gerar uma linha de cola faminta, resultando numa baixa qualidade de adesão.

Observando a Tabela 18, nota-se que a média dos ângulos é maior na superfície oxidada em comparação à fresca, em todos os casos, sendo elas estatisticamente diferentes através do teste de Kruskal-Wallis. Os autores Gindl et al. (2004) estudando a molhabilidade de superfície aplainada e oxidada de *Picea abies* e *Fagus sylvatica* também observaram esse comportamento, explicado pelo fato de que com o tempo, há uma redução do caráter polar da superfície devido ao aumento percentual de átomo de carbono e diminuição de átomos de oxigênio, gerando uma superfície hidrofóbica. Outro importante fator é a variação de extrativos observada ao longo do tempo, e seus efeitos de contaminação quando eles são absorvidos pelo líquido utilizado, que também geram modificações na molhabilidade da madeira (NUSSBAUM; STERLEY, 2002).

Tabela 18. Valores médios do ângulo de contato entre a gota séssil e a superfície da madeira de *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos de idade, na superfície aplainada e oxidada, em função dos tipos de tratamento.

Espécie	Tratamento	Ângulo de contato médio (em graus)	
		Superfície aplainada	Superfície oxidada
<i>C. citriodora</i>	NT	43,8 ^{a A}	53,6 ^{a B}
	160°C	47,6 ^{b A}	79,6 ^{b B}
	180°C	60,3 ^{c A}	84,3 ^{c B}
	200°C	64,9 ^{d A}	86,0 ^{d B}
média		54,2	75,7
<i>E. pellita</i>	NT	38,6 ^{a A}	67,1 ^{a B}
	160°C	53,2 ^{b A}	77,1 ^{bcd B}
	180°C	63,3 ^{cd A}	80,9 ^{cd B}
	200°C	66,5 ^{d A}	80,3 ^{d B}
média		58,7	76,3

Médias seguidas por letras minúsculas iguais, não apresentam diferença entre tratamento, para o mesmo tipo de superfície para cada espécie, pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade (teste de Kruskal-Wallis); médias seguidas por letras maiúsculas iguais, não apresentam diferença entre tipo de superfícies, para diferentes tratamentos, pelo teste de Mann-Whitney, ao nível de 95% de probabilidade.

Analisando o efeito do tratamento térmico na molhabilidade, percebe-se que há um aumento do ângulo de contato conforme se aumenta a temperatura nos dois tipos de superfície, ou seja, a superfície tende à hidrofobicidade e pode ser explicado pela plastificação da lignina que ocorre a partir da temperatura de 150°C, e isso leva à reorganização de componentes poliméricos ligno-celulósicos (HAKKOU et al., 2005). E ainda, a partir de altas temperaturas de tratamento, há uma estabilidade do ângulo de contato, que no caso da espécie por eles estudada (*Fagus sylvatica*) foi de 90°.

A molhabilidade também é afetada pelo tratamento térmico a partir do momento em que se inicia a degradação da hemicelulose, pois este fator gera uma redução dos grupos hidroxílicos

livres responsáveis pela afinidade com a água, o que diminui então a molhabilidade da superfície da madeira, de acordo com os autores Özgenç et al. (2016).

Comparando a madeira tratada das duas espécies com idade de 17 anos, observa-se uma diferença nos valores do ângulo, tanto entre os tratamentos, quanto entre os tipos de superfície, onde estes são maiores na superfície aplainada para a espécie *E. pellita*, enquanto que na superfície oxidada, esta espécie obteve os menores valores de ângulo.

Sabendo que a colagem se deu sob superfície aplainada, é interessante analisar a relação do ângulo com a qualidade de adesão das juntas, pois menores ângulos indicam uma melhor penetração do adesivo na estrutura da madeira, criando uma associação entre estes dois componentes, gerando ligações mais resistentes (ALBINO et al., 2010 apud CHANDLER et al., 2005). De acordo com Forest Products Laboratory (2010), uma superfície com uma boa molhabilidade absorve a gota dentro de 20 segundos, porém se a gota se espalhar, mas ainda restar água na superfície após 40 segundos, então a superfície possui boa molhabilidade, mas uma baixa penetração e pode sugerir problemas na adesão. Ainda de acordo com estes autores, ao se tratar termicamente a madeira, extrativos presentes nela podem migrar para a superfície tornando-as inativas através de modificações químicas e físicas, pois alguns extrativos são hidrofóbicos e podem possuir caráter ácido ou básico, interagindo de diferentes formas com o adesivo utilizado, além de literalmente bloquear certos poros, prejudicando assim a interface madeira-adesivo e consequentemente, a adesão.

Os resultados de resistência ao cisalhamento nas juntas, encontrados neste trabalho, mostram exatamente o que foi mencionado acima, pois eles apresentam uma redução conforme se aumentou a temperatura do tratamento, indicando que a molhabilidade é afetada pela mesma, reduzindo a penetração do adesivo e consequentemente, a qualidade da adesão (Tabela 14, Capítulo 1).

A Tabela 19 apresenta o resultado do ângulo da espécie *C. citriodora* com 17 e 60 anos. A mesma resposta foi encontrada quando se analisa os valores do ângulo entre os tipos de superfície e os tratamentos. Nota-se, que neste caso, a madeira com 17 anos apresentou maiores valores de ângulo para a superfície aplainada a partir de 180°C, e em todas as temperaturas de tratamento na superfície oxidada (Figura 16).

Os autores Amorim et al. (2013), avaliando a molhabilidade de algumas espécies amazônicas, encontraram uma correlação positiva entre a densidade e o ângulo de contato. Porém, tais resultados diferem dos encontrados neste trabalho onde os valores do ângulo são maiores para a madeira com menor densidade (17 anos), o que poderia ser explicado pelo fato de que outros fatores como a natureza e quantidade de extrativos, rugosidade da superfície e direção do plano de corte (JANKOWSKA et al., 2018), influenciam nos valores do ângulo. Por maior que tenha sido o cuidado no momento de se produzir os corpos-de-prova utilizados neste trabalho, estudos mais detalhados como a estrutura anatômica da superfície e caracterização dos extrativos devem ser realizados para a melhor compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 19. Valores médios do ângulo de contato entre a gota séssil e a superfície da madeira, na superfície aplainada e oxidada, em função da idade da madeira de *C. citriodora*, e os tratamentos térmicos.

Idade	Tratamento	Ângulo de contato médio (em graus)	
		Superfície aplainada	Superfície oxidada
17	NT	43,8 ^{aA}	53,6 ^{aB}
	160°C	47,6 ^{bA}	79,6 ^{bB}
	180°C	60,3 ^{cA}	84,3 ^{cB}
	200°C	64,7 ^{dA}	86,0 ^{dB}
	média	54,1	75,9
60	NT	41,5 ^{aA}	50,7 ^{aB}
	160°C	52,0 ^{bA}	71,8 ^{bB}
	180°C	55,5 ^{cA}	77,4 ^{cB}
	200°C	58,9 ^{dA}	74,0 ^{dB}
	média	52,0	68,5

Médias seguidas por letras minúsculas iguais, não apresentam diferença entre tratamento, para o mesmo tipo de superfície para cada idade, pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade; médias seguidas por letras maiúsculas iguais, não apresentam diferença entre tipo de superfícies, para diferentes tratamentos, pelo teste de Mann-Whitney, ao nível de 95% de probabilidade.

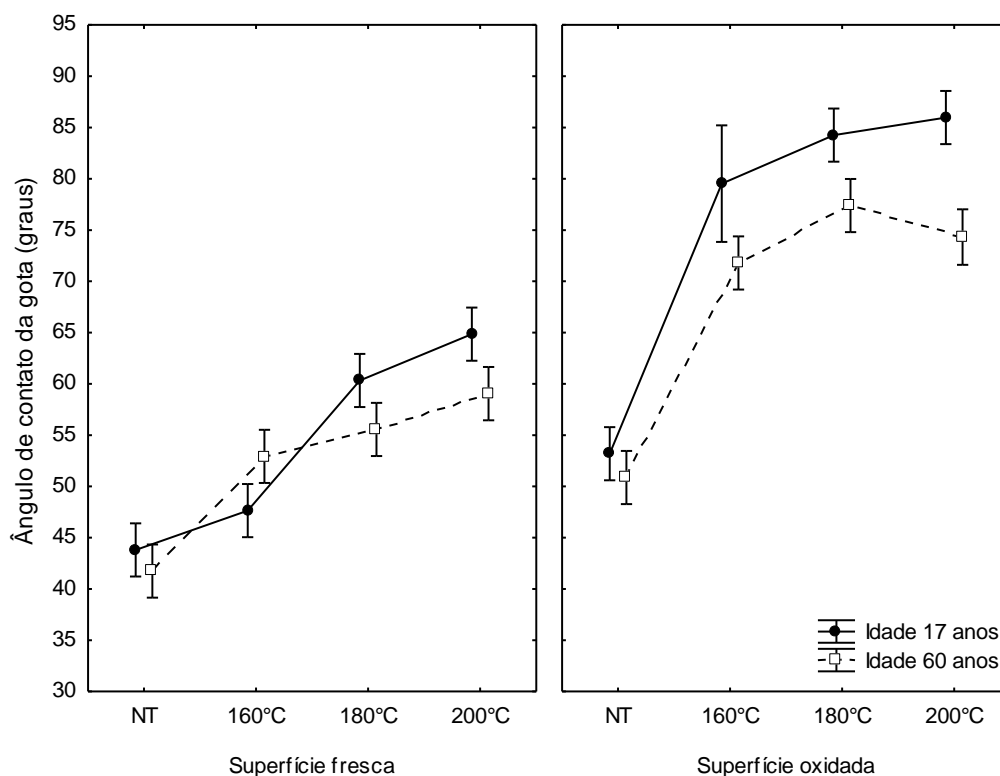


Figura 16. Ângulo de contato em razão do tipo de superfície e tratamento, das idades de 17 e 60 anos para *C. citriodora*.

Autores como Kishino; Nakano (2004) também não encontraram relação entre densidade e molhabilidade das espécies por eles estudadas, onde eles concluíram que a molhabilidade tem maior influência pela composição química e estrutural da superfície da madeira.

A Figura 17 mostra a variação do ângulo de contato em função do tempo de medição para as espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos, onde nota-se que há uma diminuição do ângulo, a partir do tempo zero (0 segundos), até a medição final de 120 segundos. Além disso, é possível observar que o efeito da superfície no ângulo, é maior do que o efeito do tratamento térmico, visto que na superfície oxidada, os valores do ângulo são superiores à superfície aplainada, e que após o tratamento térmico, as curvas resultantes das temperaturas de tratamento se aproximam, indicando pouca variabilidade de ângulo entre estas.

Analisando a superfície aplainada da espécie *C. citriodora*, observa-se que do tempo zero até o tempo de 30 segundos, há uma redução acentuada do ângulo em comparação ao *E. pellita*, principalmente nas amostras não tratadas e tratadas a 160°C, as quais estas se mantêm com valores próximos. Esta rápida redução pode ser influenciada pela rugosidade da superfície, gerando implicações diretas na interação entre certos vernizes para madeira por exemplo, pois a rugosidade gera uma maior área de contato entre o líquido e a superfície, favorecendo uma maior interação entre estes agentes (DARMAWAN et al., 2018). Esta afirmação poderia explicar também o comportamento dos adesivos, pois analisando os resultados de resistência da ligação das juntas, discutidos no Capítulo 1, nota-se que para a espécie *C. citriodora* com 17 anos, o valor de resistência para a madeira não tratada e para o adesivo de mamona (o qual possui uma viscosidade maior e por isso foi utilizado como efeito de comparação), é superior quando comparado com a espécie *E. pellita*, sugerindo que talvez a rugosidade possa ter uma maior influência na qualidade da ligação adesiva.

Já na superfície oxidada, a madeira não tratada de *C. citriodora* apresenta menores valores, enquanto que no *E. pellita* há uma elevação repentina dos ângulos, onde os seus valores chegam a ser maiores do que no tratamento de 200°C para a superfície aplainada.

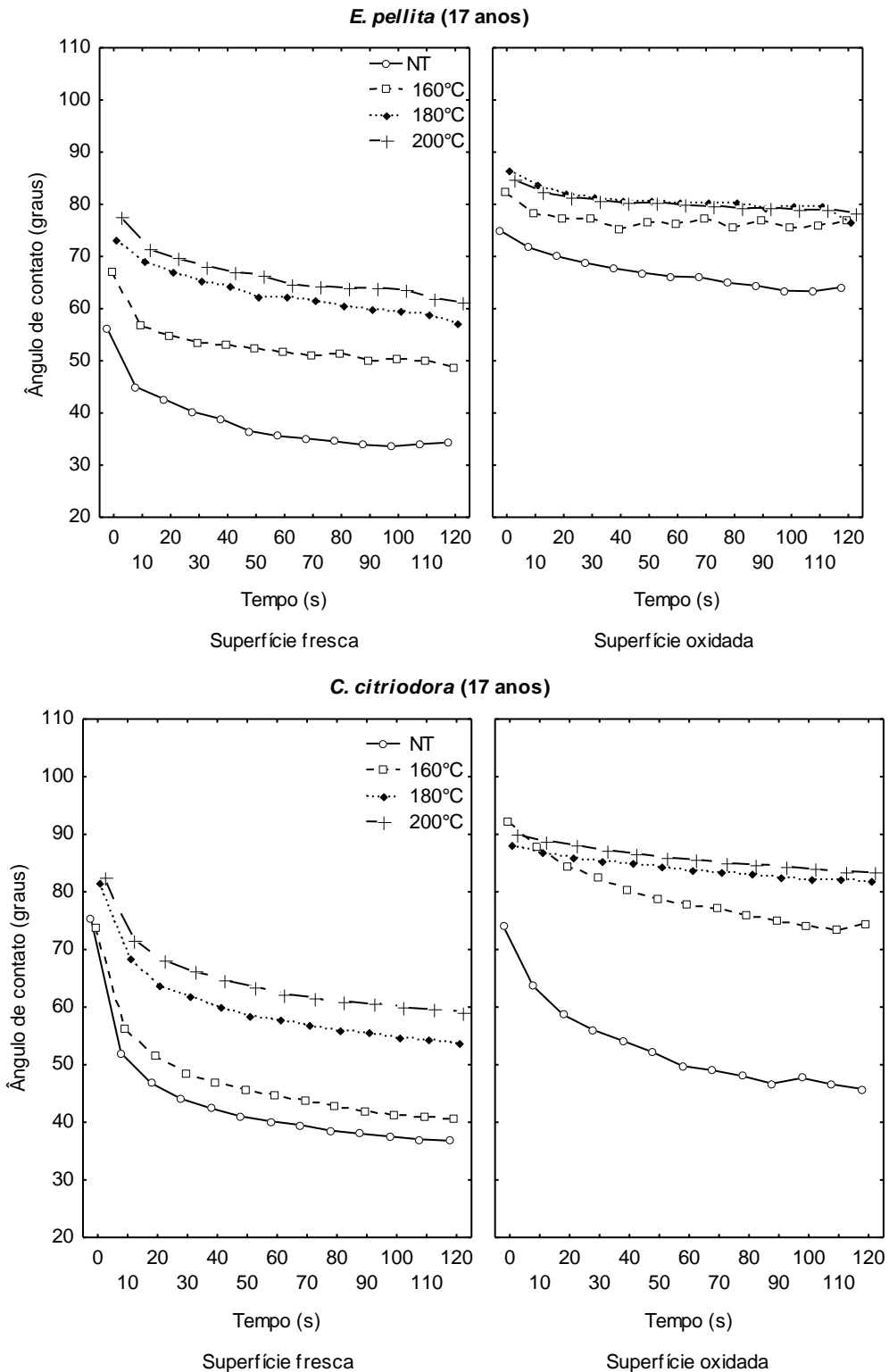


Figura 17. Ângulo de contato das espécies *C. citriodora* e *E. pellita* com 17 anos, em função do tempo de medição, para os diferentes tratamentos.

Os autores Santoni; Pizzo (2011) estudando espécies do mediterrâneo, também encontraram este comportamento para o ângulo em função do tempo, em que eles dividem esta curva de variação em três momentos onde na fase inicial, que dura alguns poucos segundos, há

uma queda rápida e constante e é onde o líquido se espalha e preenche a superfície rugosa da madeira; em um segundo momento, na fase intermediária, a gota já está acomodada e seu ângulo reduz em função do tempo, em velocidade variada; e por último, na terceira fase, a variação do ângulo em função do tempo é mais lenta do que na primeira fase, e se torna constante até a absorção total da gota. Este padrão se repete na superfície aplainada e oxidada, onde nesta última, nota-se uma variação menor do ângulo nas temperaturas de tratamento, diferente da superfície aplainada onde a redução nos segundos iniciais é mais abrupta.

Estes mesmos autores sugerem que na fase inicial, o comportamento da gota se dá mais por aspectos físicos da superfície, assim como sua preparação (maquinário utilizado), do que por aspectos químicos, onde este último possui maior influência nas fases seguintes.

Os autores Jankowska et al. (2018), estudando o efeito do tipo de corte na preparação da superfície, concluíram que a madeira laminada com uma faqueadeira apresenta menores valores de ângulo em comparação a uma superfície cortada com uma serra de disco. Além disso, foi observado uma correlação significativa entre a rugosidade e ângulo de contato, onde os valores de ângulo de contato são menores quando a rugosidade da superfície é maior.

Os autores Lopes et al. (2018), estudando a molhabilidade na madeira de teca, obtiveram resultados semelhantes ao deste trabalho onde o ângulo apresenta redução em função do tempo de medição, e um aumento em função da temperatura de tratamento.

4 CONCLUSÃO

As lamelas recém preparadas, ou com pouco tempo de exposição ao ar e ao efeito da irradiação, apresentaram menores valores de ângulo de contato.

A madeira com superfície exposta durante longo período, apresentou ângulos de contatos maiores devido as modificações físico-químicas a que esteve submetida ao longo do tempo, inativando a superfície para interagir com o adesivo.

O tratamento térmico a temperaturas mais elevadas tornou a superfície hidrofóbica devido à plastificação da lignina, rearranjando os polímeros lignocelulósicos, modificando as estruturas e quantidades dos extrativos, bloqueando a absorção da gota.

A madeira não tratada de *E. pellita* apresentou valores de ângulo maiores do que a espécie *C. citriodora* para a idade de 17 anos, enquanto que após o tratamento térmico a madeira de *E. pellita* resultou em uma melhor molhabilidade.

A madeira de *C. citriodora* (60 anos) apresentou uma melhor molhabilidade em comparação com a mesma espécie de 17 anos.

CONCLUSÕES GERAIS

Conclui-se pelo presente trabalho, que ao se tratar termicamente a madeira para a colagem, há um ganho de resistência em comparação a madeira sólida, mas que deve ser considerado a redução da mesma conforme se aumenta a temperatura, indicando que altas temperaturas de tratamento afetam negativamente a resistência da madeira natural.

Também foi possível concluir que de uma maneira geral, o resorcinol apresentou melhor desempenho em relação ao poliuretano, sugerindo diferentes finalidades no uso dos mesmos, e que para condições externas, o poliuretano pode ser usado desde que não seja exposto a condições extremas de temperatura e umidade, mesmo ele possuindo características hidrofóbicas e boa estabilidade térmica. O que se conclui neste caso, é que a densidade da madeira foi um fator crucial para o desempenho do mesmo.

A densidade não foi o principal fator com efeito no processo de colagem, visto que a espécie que apresentou melhores parâmetros de qualidade de adesão foi o *E. pellita*, mas quando se analisa as diferentes idades da espécie *C. citriodora*, observa-se um desempenho semelhante entre elas, mesmo as densidades sendo distintas, e que neste caso, a composição química das mesmas deve ser levado em consideração, assim como a estrutura física da superfície da madeira.

E por fim, a molhabilidade da superfície da madeira é afetada pelo tratamento térmico, onde quanto maior a temperatura, menor é a molhabilidade, mesmo a madeira apresentando fissuras na superfície, o que pode levar a uma maior penetração do adesivo, mas não à nível celular. Além disso, sugere-se que a colagem seja feita sempre na superfície aplainada, ou seja, com pouco tempo de exposição ao ar, pois a superfície oxidada apresentou menor molhabilidade devido a oxidação e inativação da mesma.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABREU, H. DOS S.; CARVALHO, A. M. DE; MONTEIRO, M. B. D. O.; et al. Métodos de análise em química da madeira (Métodos de análise química utilizados no Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da UFRRJ). Seropédica, Rio de Janeiro, 2006.
- ALBINO, V. C. D. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 509–516, 2010.
- ALBINO, V. C. DO S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 803–811, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. ASTM D905 - 08 (Reapproved 2013). **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–5, 2013a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. ASTM D5266 - 13. **Annual Book of ASTM Standards**, 2013b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM D143-14. **Annual Book of ASTM Standards**, 2014.
- AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIAL. Standard Test Methods for Resistance of Adhesives to Cyclic Laboratory Aging Conditions. ASTM D1183 - 03 (Reapproved 2011). **Annual Book of ASTM Standards**, p. 11–13, 2011.
- AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIAL. Standard Specification for Adhesives Used for Laminate Joints in Nonstructural Lumber Products. ASTM D5751 - 99 (Reapproved 2012). **Annual Book of ASTM Standards**, 2012.
- AMORIM, M. R. S.; RIBEIRO, P. G.; MARTINS, S. A.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Surface Wettability and Roughness of 11 Amazonian Tropical Hardwoods. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 99–109, 2013.
- ANGELI, A. Indicações para escolha de espécies de *Eucalyptus*. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=eucalipto>>. Acesso em: 11/9/2017.
- ANJOS, F. P. DOS. Efeitos da termorreificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal Rural da Amazônia, 2014.
- AZAMBUJA, M. DOS A.; DIAS, A. A. Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC). **Madeira**, v. 3, n. 8, p. 1–43, 2002.
- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. DE C. O.; LADEIRA, J. P. S.; et al. Resistência ao cisalhamento na linha de cola das madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. **Revista Árvore**, v. 40, n. 6, p. 1109–1117, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000600017>>. .
- BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; et al. Cisalhamento na Linha de

Cola de Eucalyptus sp . Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–9, 2017.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, p. 204–211, 2006.

BRADY, D. E.; KAMKE, F. A. Effect of hot-pressing parameters on resin penetration. **Forest products journal**, 1988.

BRITO, J. O.; SILVA, F. G.; LEÃO, M. M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 8545–8548, 2008.

BURATTA, C. C.; COELHO, V. G.; JUNIOR, M. G. C.; NASCIMENTO, A. M. DO. Propriedades tecnológicas da madeira de mogno africano sob efeito de tratamento térmico. XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira +III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. **Anais...** . p.1–11, 2018. São Carlos, SP.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído. **Revista Matéria**, v. 9, n. 1, p. 32–42, 2004. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufjf.br/sarra/artigos/artigo10592>>. .

CARVALHO, A. G.; DONATO, D. B.; ZANUNCIO, A. J. V.; et al. Colagem da madeira de Pinus termoretificada. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 217–222, 2015.

CARVALHO, A. G.; PIRES, M. R.; ZANUNCIO, A. J. V.; et al. Desempenho de Painéis OSB com Adesivos Comerciais e Tânico de Barbatimão. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1155–1163, 2015.

CHANDLER, J. G.; BRANDON, R. L.; FRIHART, C. R. Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy. ASC Spring 2005 Convention and Exposition, April. **Anais...** . p.12, 2005.

CIF. Eucalipto. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=eucalipto>>. Acesso em: 11/9/2017.

CLAUSS, S.; JOSCAK, M.; NIEMZ, P. Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 1, p. 101–111, 2011.

DARMAWAN, W.; NANDIKA, D.; NOVIYANTI, E.; et al. Wettability and bonding quality of exterior coatings on jabon and sengon wood surfaces. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 15, n. 1, p. 95–104, 2018.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, , n. 65, p. 102–113, 2004.

EMBRAPA. Eucalyptus. Disponível em: <https://dendro.cnptia.embrapa.br/recursos/folder_eucalyptus_junho2000ID-pEiTdesAUE.PDF>. Acesso em: 11/9/2017.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood Handbook**. Helsinki, Finland, 2003.

FIORELLI, J. **Utilização De Fibras De Carbono E De Fibras De Vidro Para Reforço De Vigas De Madeira**, 2002. Universidade de São Paulo.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Ipef**, v. 2/3, p. 65–74, 1971.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Centennial ed. Madison, 2010.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - USDA. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison, 2010.

GINDL, M.; REITERER, A.; SINN, G.; STANZL-TSCHEGG, S. E. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 62, n. 4, p. 273–280, 2004.

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. DE A.; SCHAYDER, L. F.; TINTI, V. P.; SANTIAGO, S. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de Pinus sp . coladas em temperatura ambiente. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 1, p. 42–50, 2016.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**, 2008. Universidade de Brasília.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, p. 1–5, 2005.

IWAKIRI, S.; CAPRARA, A. C.; SAKS, D. DO C. O.; et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia Forestalis**, , n. 68, p. 39–43, 2005.

IWAKIRI, S.; SILVA, J. D. C.; SILVA, J. R. M. DA; ALVES, C. R.; PUEHRINGER, C. A. Produção de compensados de Pinus taeda e Pinus oocarpa Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia formaldeído. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 371–375, 2002.

JANKOWSKA, A.; ZBIEC, M.; KOZAKIEWICZ, P.; et al. The wettability and surface free energy of sawn, sliced and sanded european oak wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 443–454, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2018005031401&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. .

JÚNIOR, A. F. D.; SANTOS, P. V. DOS; PACE, J. H. C.; CARVALHO, A. M. DE; LATORRACA, J. V. DE F. Caracterização da Madeira de Quatro Espécies Florestais para Uso em Moveleira. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 93–107, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/169-rcm/v04n01/639-v04n01a08.html>>. .

KISHINO, M.; NAKANO, T. Artificial weathering of tropical woods. Part 2: Color change. **Holzforschung**, v. 58, n. 5, p. 558–565, 2004.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. DE C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de Eucalyptus e sua influência na colagem. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 123–129, 2007.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, C. L. S. DE O. Colagem da madeira de clones de Eucalyptus com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 73–77, 2008.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade de adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova

colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 194–200, 2006.

LOPES, J. DE O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M. DO. Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 2, p. 249–256, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2018005002801&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. .

LOPES, J. DE O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M. DO; LATORRACA, J. V. DE F. Propriedades físicas da madeira de Teca termorretificada. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 569–577, 2014.

MARINHO, N. P.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; et al. Caracterização Física e Térmica de Compósito de Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Associado com Partículas de Bambu. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, p. 1–5, 2013.

MARTINS, V. A. **Secagem de Madeira Serrada**. 1988.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. DAS. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES setorial**, v. 27, p. 121–156, 2008. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. .

MEDEIROS, B. L. M. A.; JUNIOR, J. B. G.; RIBEIRO, M. X.; et al. Avaliação das Propriedades Físicas e Químicas da Madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* Cultivadas no Piauí. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 403–407, 2016.

MENEZES, W. M. DE; SANTINI, E. J.; SOUZA, J. T. DE; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1019–1024, 2014.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, , n. Edição Especial ENTECA, p. 35–45, 2009. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/viewArticle/8714>>. .

MOI, S. V.; PETRAUSKI, S. M. F. C.; PETRAUSKI, A. Desempenho de juntas estruturais em madeira laminada colada de eucalipto utilizando adesivos resorcinol e mamona. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECO. **Anais...** . p.1–5, 2016. Foz do Iguaçu.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; VIDAURRE, G. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 615–621, 2014.

MOURA, L. F. DE; BRITO, J. O.; JÚNIOR, G. B. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 305–314, 2012.

NASCIMENTO, A. M. DO; OLIVEIRA, J. T. DA S.; DELLA LUCIA, R. M. Classificação e propriedades da madeira de pinus e eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 27–35, 2001.

NASCIMENTO, M. F.; BERTOLINI, M. DA S.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 1, p. 41–48, 2015.

NETO, S. P. DE M. **Madeira de Eucalipto para Serraria**. Planaltina, DF, 2017.

NUNES, C. S. **Propriedades tecnológicas e qualidade de adesão de madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* termorretrificadas**, 2012. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

NUNES, C. S.; NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; LELIS, R. C. C. Qualidade de adesão das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* tratadas termicamente. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 41–56, 2016.

NUSSBAUM, R. M.; STERLEY, M. The effect of wood extractive content on glue adhesion and surface wettability of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 1, p. 57–71, 2002.

OLIVEIRA, A. C. .; CARNEIRO, A. DE C. O. .; VITAL, B. R. .; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>>. .

ÖZGENÇ, Ö.; DURMAZ, S.; BOYACI, I. H.; EKSI-KOCAK, H. Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 171, p. 395–400, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2016.08.026>>. .

PAES, J. B.; NUNES, S. T.; LAHR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. DE F.; LACERDA, R. M. DE A. Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 551–558, 2011.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 14, n. 3, p. 251–258, 2008.

POUBEL, D. DA S.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. DE F.; CARVALHO, A. M. DE. Estrutura Anatômica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 117–126, 2011. Disponível em: <<http://www.floram.org/articles/view/id/4ff1c7f31ef1fa990d00001b>>. .

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

REIS, C. A. .; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. .; FILHO, E. P. ***Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil**. Colombo, PR, 2013.

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

SANTONI, I.; PIZZO, B. Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 7, p. 743–753, 2011. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.07.002>>. .

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; et al. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Materia**, v. 22, n. 2, 2017.

SILVA, C. J. DA; VALE, A. T. DO; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63–75, 2015. Disponível em:

<<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/822>>. .

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**, 2002. Universidade Federal do Paraná.

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

STANGERLIN, D. M.; DA COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; et al. Molhabilidade da madeira de três espécies amazônicas submetidas a ensaios de apodrecimento acelerado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 266–272, 2013.

SUBRAMANYAM, R.; MISHRA, I. M. Co-degradation of resorcinol and catechol in an UASB reactor. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4147–4157, 2008.

SUN, B.; WANG, X.; LIU, J. Changes in dimensional stability and mechanical properties of Eucalyptus pellita by melamine – urea – formaldehyde resin impregnation and heat treatment. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, p. 557–562, 2013.

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

TIENNE, D. L. DA C. **Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condições de serviço externo e interno**, 2006. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

VALERO, M. F.; PULIDO, J. E.; RAMÍREZ, A.; CHENG, Z. Estudio de las propiedades mecánicas, térmicas, reológicas y morfología de poliuretanos a partir de aceite de Higuierilla modificado por transesterificación. **Revista Iberoamericana de Polímero**, v. 9, n. 2, p. 102–118, 2008. Disponível em: <<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR08/valero.pdf>>. .

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

VITAL, B. R.; MACIEL, A. D. S.; LUCIA, R. M. DELLA. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de Eucalyptus grandis, Eucalyptus saligna e Pinus elliottii. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 637–644, 2006.

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

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

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**, 2003. Universidade de São Paulo.

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