



**EFEITO DA TERMODENSIFICAÇÃO E DO PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO
SOBRE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.**

LARISSA MESQUITA DO VALE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**EFEITO DA TERMODENSIFICAÇÃO E DO PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO
SOBRE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO DE 2020**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**“EFEITO DA TERMODENSIFICAÇÃO E DO PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE
PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Ceiba pentandra* (L) GAERTN”**

LARISSA MESQUITA DO VALE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI (Departamento de
Engenharia Florestal – EFL/UnB);**

(Orientador)

**Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal –
EFL/UnB);**

(Examinador Interno)

Prof. Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB);

(Examinador Externo)

**Prof. Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia
Florestal – EFL/UnB).**

(Examinadora Suplente)

Brasília-DF, 20 de fevereiro de 2020.

MM582e Mesquita do Vale, Larissa
EFEITO DA TERMODENSIFICAÇÃO E DO PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO
SOBRE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Ceiba pentandra* (L.)
Gaertn. / Larissa Mesquita do Vale; orientador Cláudio
Henrique Soares Del Menezzi. -- Brasília, 2020.
P.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais)
- Universidade de Brasília, 2020.

1. Termodensificação. 2. *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. 3.
Modificação da madeira. 4. Pós-tratamento térmico. I.
Henrique Soares Del Menezzi, Cláudio, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALE, L.M. (2020). Efeito da termodensificação e do pós-tratamento térmico sobre propriedades da madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 109 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Larissa Mesquita do Vale

TÍTULO: Efeito da termodensificação e do pós-tratamento térmico sobre propriedades da madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

Concedo à Universidade de Brasília-UnB permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestá-las somente para propósitos acadêmicos e científicos. Reservo outros direitos de publicação, de forma que nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem minha autorização por escrito.

Larissa Mesquita do Vale

Endereço eletrônico: emevelarissa@gmail.com

AGRADECIMENTOS

À espiritualidade, por me guiar durante esse processo. Aos meus pais e minha irmã, pelo apoio e por tudo que conquistei.

A todas as mulheres que vieram antes de mim e abriram o caminho para que eu pudesse chegar aonde cheguei. A todas as mulheres que virão depois de mim, por continuar fortalecendo esse ciclo.

Ao meu companheiro Aloizio, pelo amor, cuidado e troca.

Ao professor Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, pelo incentivo, conhecimento compartilhado e inspiração.

A todos os colegas que estiveram comigo durante esse período, especialmente Mírian Costa, Yolanda Neres e Niliane Campos.

Ao professor Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis.

À amiga Jaqueline, pelo apoio em todas as etapas da vida.

À Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGEFL) pela formação.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Florestal e Laboratório de Produtos Florestais, por possibilitarem o uso dos laboratórios e equipamentos.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro e pela bolsa.

RESUMO

EFEITO DA TERMODENSIFICAÇÃO E DO PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.

Autor: Larissa Mesquita do Vale

Orientador: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, Fevereiro de 2020

A madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn (sumaúma) é de baixa densidade, fácil trabalhabilidade e baixa resistência natural ao ataque de organismos xilófagos. Madeiras de baixa densidade apresentam limitações quando comparadas a madeiras de alta densidade, que apresentam maior resistência mecânica. A termodensificação (tratamento termomecânico) é um método que utiliza a ação do calor e da pressão, e tem como principal objetivo a melhoria das propriedades mecânicas da madeira através do aumento da densidade. Entretanto, a compressão gera uma tensão interna que é liberada quando a madeira entra em contato com a umidade, que pode ser aliviada através de um posterior tratamento térmico. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da termodensificação sobre as propriedades físicas, mecânicas e superficiais da madeira de sumaúma, e avaliar o efeito do tratamento térmico (pós-tratamento) sobre essas propriedades e sobre a estabilidade dimensional da madeira termodensificada. A termodensificação foi realizado utilizando-se uma prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão, em que foram avaliados quatro tratamentos decorrentes da combinação de dois tempos de duração (5 e 10 minutos) e duas pressões (1,07 MPa e 2,15 MPa) comparados à testemunha. O pós-tratamento térmico consistiu em manter metade das amostras termodensificadas apenas em contato com os pratos aquecidos da prensa (sem pressão) aquecida a 180°C durante 25 minutos. Observou-se um aumento significativo da densidade, evidenciado pela taxa de compactação e taxa de densificação. A perda de massa apresentou aumento significativo apenas no tratamento de maior duração e maior pressão. As propriedades mecânicas apresentaram aumento significativo em todos os tratamentos, influenciados principalmente pela pressão, sendo a f_H a propriedade que apresentou maior ganho. As propriedades físicas apresentaram redução, influenciadas apenas pela pressão, evidenciando uma perda na estabilidade dimensional. As propriedades superficiais apresentaram melhora significativa em todos os tratamentos, influenciadas pelos fatores tempo e pressão, resultando em um escurecimento da madeira e redução da aspereza da superfície. Quanto ao pós-tratamento, as propriedades mecânicas apresentaram aumento significativo em todos os tratamentos, indicando que o tratamento térmico potencializou os ganhos observados na madeira termodensificada. As propriedades físicas apresentaram uma redução, em sua maioria não significativa, indicando que o pós-tratamento térmico não foi eficiente na melhoria da estabilidade dimensional das amostras termodensificadas. As propriedades superficiais apresentaram melhora significativa nos quatro tratamentos, resultando em um escurecimento e redução da aspereza da superfície. O tratamento termomecânico e o pós-tratamento térmico, de modo geral, provocaram melhoras sobre as propriedades mecânicas e superficiais e reduziram algumas propriedades físicas.

Palavras-chave: sumaúma, tratamento termomecânico, modificação da madeira, colorimetria, rugosidade.

ABSTRACT

EFFECT OF THERMODENSIFICATION AND POST-HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn WOOD

Author: Larissa Mesquita do Vale

Supervisor: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, February, 2020

Ceiba pentandra (L.) Gaertn (kapok) wood has low density, easy workability and low natural resistance to attack by xylophagous organisms. Low density woods have limitations when compared to high density woods, which have higher mechanical resistance. The thermodensification (thermomechanical treatment) is a method that uses the action of heat and pressure, and its main objective is to improve the mechanical properties of wood through increasing density. However, compression generates an internal tension that is released when the wood comes into contact with moisture, which can be relieved by subsequent heat treatment. In this sense, the present work aimed to evaluate the effect of densification on the physical, mechanical and superficial properties of kapok wood and to evaluate the effect of heat treatment (post-treatment) on these properties and on the dimensional stability of thermodensified wood. The thermodensification treatment was performed using a hydraulic press with controlled temperature and pressure, in which four treatments were evaluated resulting from the combination of two duration times (5 and 10 minutes) and two pressures (1,07 MPa and 2,15 MPa) compared to the control samples. Post-heat treatment consisted of keeping half of the thermodensified samples only in contact with the heated plates of the press (without pressure) heated with a temperature of 180°C for 25 minutes. There was a significant increase in density, evidenced by the compaction rate and densification rate. Mass loss showed a significant increase only in treatment 4. The mechanical properties showed a significant increase in all treatments, mainly influenced by pressure, with f_H being the property with the highest gain. Physical properties were reduced, influenced only by pressure, showing a loss in dimensional stability. Surface properties showed significant improvement in all treatments, influenced by time and pressure factors, resulting in wood darkening and reduction of surface roughness. Regarding post-treatment, the mechanical properties showed significant increase in all treatments, indicating that the heat treatment potentiated the gains observed in the thermodensified wood. The physical properties showed a reduction, mostly non-significant, indicating that the post-heat treatment was not efficient in improving the dimensional stability of the thermodensified samples. Surface properties showed significant improvement in all four treatments, resulting in darkening and reduction of surface roughness. Thermomechanical treatment and post-heat treatment generally improved mechanical and surface properties and reduced physical properties.

Key words: kapok, thermomechanical treatment, wood modification, colorimetry, roughness.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
3. HIPÓTESE.....	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.....	15
4.2 Processos de modificação da madeira.....	17
4.3 Termodensificação	19
4.4 Estabilização da madeira termodensificada	20
5. MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1 Material.....	24
5.2 Determinação da pressão utilizada na prensa hidráulica	24
5.3 Termodensificação	25
5.4 Caracterização da termodensificação.....	27
5.5 Pós-tratamento térmico (PT).....	29
5.6 Determinação das propriedades	29
5.6.1 Obtenção dos corpos de prova	29
5.6.2 Propriedades mecânicas	30
5.6.3 Propriedades físicas.....	33
5.6.4 Propriedades superficiais.....	35
5.6.4.1 Propriedades colorimétricas	35
5.6.4.2 Rugosidade	37
5.6.5 Análise de dados.....	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1 Caracterização das amostras antes da densificação	39
6.1.1 Termodensificação	39

6.1.2	Temperatura interna das amostras.....	39
6.1.3	Caracterização da termodensificação	41
6.2	Efeito da termodensificação sobre as propriedades da madeira de sumaúma	46
6.2.1	Propriedades mecânicas	46
6.2.2	Propriedades físicas.....	50
6.2.3	Propriedades superficiais.....	54
6.2.3.1	Colorimetria.....	54
6.2.3.2	Rugosidade	59
6.3	Escolha dos parâmetros (tempo e pressão) da termodensificação	62
6.4	Efeito do pós-tratamento térmico sobre as propriedades das amostras termodensificadas.....	63
6.4.1	Temperatura interna das amostras.....	63
6.4.2	Propriedades mecânicas	65
6.4.3	Propriedades físicas.....	67
6.4.4	Propriedades superficiais.....	69
6.4.4.1	Colorimetria.....	69
6.4.4.2	Rugosidade	71
7.	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ocorrência natural de Sumaúma no Brasil. Fonte: Embrapa Florestas.	16
Figura 2. Fluxograma da metodologia utilizada.....	23
Figura 3. A: Prensa hidráulica INDUMEC; B: <i>Datalogger CELTD890</i> . Foto: o autor.....	26
Figura 4. Esquema geral da termodensificação.....	27
Figura 5. Esquema de confecção dos corpos de prova das análises das propriedades físicas, mecânicas e superficiais. 1,2 e 3: ensaio de flexão estática e módulo de elasticidade dinâmico; 4 e 5: ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras; 6 e 7: ensaio de dureza janka superficial; 8 e 9: ensaio de imersão; 10 e 11: colorimetria e rugosidade; 12 a 17: ensaio de resistência à compressão paralela às fibras, cuja porção central corresponde ao local de rompimento da amostra após o ensaio de flexão estática.....	29
Figura 6. 1: ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras; 2: ensaio de resistência a compressão paralela às fibras; 3: ensaio de dureza janka superficial; 4: ensaio de flexão estática. Foto: o autor.....	32
Figura 7. Ensaio não destrutivo de ondas de tensão realizado com o equipamento <i>Stress wave timer Metriguard 239</i> . Foto: o autor.....	33
Figura 8. Espectrofotômetro <i>Color Eye XT-X-Rite</i> . Foto: o autor.	35
Figura 9. Ensaio de rugosidade superficial realizado com o equipamento Rugosímetro <i>Surftest</i> modelo SJ - 400 (<i>Mitutoyo</i>). Foto: o autor.	37
Figura 10. Temperatura interna das amostras durante a termodensificação.....	40
Figura 11. Taxa de compactação (TXC). Análise estatística pelo teste de média de Tukey, ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.....	41
Figura 12. TE = Testemunha; T1 = amostra do tratamento 1; T2 = amostra do tratamento 2; T3 = amostra do tratamento 3; T4 = amostra do tratamento 4. Foto: o autor.	42
Figura 13. Taxa de densificação (TXD). Análise estatística pelo teste de média de Tukey ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.....	43
Figura 14. Perda de massa (PM). Análise estatística pelo teste de média de Tukey, ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.....	44

Figura 15. Amostras após 24 horas de imersão comparadas a amostras do mesmo tratamento antes da imersão. TE: testemunha; T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4.	52
Figura 16. Análise colorimétrica da testemunha da madeira de <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	55
Figura 17. Aspecto das amostras termodensificadas comparadas à testemunha. TE: testemunha; T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4.....	58
Figura 18. A: testemunha; B: tratamento 1; C: tratamento 2; D tratamento 3; E: tratamento 4.	60
Figura 19. Temperatura interna das amostras durante o pós-tratamento térmico.	64
Figura 20. Amostras termodensificadas comparadas às amostras termodensificadas que receberam o pós-tratamento térmico. T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4; T1 PT: tratamento 1 após o pós-tratamento térmico; T2 PT: tratamento 2 após o pós-tratamento térmico; T3 PT: tratamento 3 após o pós-tratamento térmico; T4 PT: tratamento 4 após o pós-tratamento térmico.....	70
Figura 21. Perfil de rugosidade do tratamento 1 antes e depois do pós-tratamento térmico....	72
Figura 22. Perfil de rugosidade do tratamento 2 antes e depois do pós-tratamento térmico....	73
Figura 23. Perfil de rugosidade do tratamento 3 antes e depois do pós-tratamento térmico....	74
Figura24. Perfil de rugosidade do tratamento 4 antes e depois do pós-tratamento térmico.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos tratamentos aplicados.....	26
Tabela 2. Parâmetros da termodensificação e do pós-tratamento térmico.....	28
Tabela 3. Número de CPs utilizados na caracterização das propriedades mecânicas, físicas e superficiais.....	30
Tabela 4. ANOVA da densidade das amostras da testemunha e daquelas alocadas para os quatro tratamentos.....	39
Tabela 5. ANOVA da densidade dos quatro tratamentos antes e depois da densificação.....	43
Tabela 6. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as variáveis de caracterização da termodensificação.....	45
Tabela 7. Análise das propriedades mecânicas pelo teste de Dunnett.....	47
Tabela 8. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades mecânicas.....	49
Tabela 9. Propriedades físicas analisadas pelo teste de Dunnett.....	51
Tabela 10. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades físicas.....	54
Tabela 11. Médias dos parâmetros colorimétricos analisados pelo teste de Dunnett.....	55
Tabela 12. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre os parâmetros colorimétricos.....	57
Tabela 13. Variação dos parâmetros colorimétricos dos tratamentos em relação aos da testemunha.....	58
Tabela 14. Médias dos parâmetros de rugosidade analisadas pelo teste de Dunnett.....	59
Tabela 15. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre os parâmetros de rugosidade.....	61
Tabela 16. Resumo do efeito do tempo e da pressão sobre as propriedades mecânicas, físicas e superficiais.....	62
Tabela 17. ANOVA das propriedades mecânicas antes e depois do pós-tratamento térmico.....	65
Tabela 18. ANOVA das propriedades físicas antes e depois do pós-tratamento térmico.....	67
Tabela 19. ANOVA dos parâmetros colorimétricos antes e depois do pós-tratamento térmico.....	69
Tabela 20. Variação dos parâmetros colorimétricos entre os tratamentos das amostras termodensificadas e os tratamentos das amostras que receberam pós-tratamento térmico.....	71

Tabela 21. ANOVA dos parâmetros de rugosidade antes e depois do pós-tratamento térmico.
.....71

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico cujas propriedades são influenciadas pelas características genótípicas, condições climáticas e qualidade de sítio. Dessa forma, esse material apresenta diferentes características físicas, mecânicas e anatômicas dependendo da espécie, podendo variar também dentro de um mesmo indivíduo (FREITAS et al., 2015).

As principais vantagens da madeira em relação a materiais como aço e concreto são o baixo peso, consumo energético baixo de processamento, resistência ao suporte de cargas de curta duração e boa resistência ao fogo (CUNHA; MATOS, 2010). Segundo Conte et al. (2014) a higroscopicidade e anisotropia são os principais fatores limitantes no uso dessa matéria-prima, sendo de grande importância pesquisas que forneçam informações sobre essas características e seu uso final adequado.

Existem diversos métodos de modificação da madeira que visam melhorar algumas de suas propriedades e reduzir suas limitações. No tratamento térmico o principal objetivo é a melhoria da estabilidade dimensional, característica que faz com que a madeira varie suas dimensões conforme alteração da umidade. Entretanto, o tratamento térmico tem como desvantagem a redução das propriedades mecânicas da madeira.

A termodensificação é um método de modificação que utiliza calor combinado à pressão. Nesse sentido, a termodensificação apresenta uma vantagem devido à aplicação de forças de compressão, que tem como principal objetivo a melhoria das propriedades mecânicas da madeira através do aumento da sua densidade. De acordo com Caliri et al. (1993), a densidade se correlaciona diretamente com algumas propriedades da madeira, sendo um dos melhores parâmetros na avaliação da qualidade da madeira.

Entretanto, durante a compressão da madeira tensões internas são geradas, e ao entrar em contato com a umidade, a madeira tende a retomar sua forma original a fim de liberar essas tensões. Nesse sentido, o pós-tratamento é uma alternativa para que a forma comprimida da madeira seja fixada e as tensões liberadas sem que a madeira retorne à sua forma anterior.

O estudo de métodos de modificação na madeira tem grande importância pro mercado, permitindo que madeiras de baixa densidade tenham suas propriedades melhoradas de acordo com o uso final e tenham sua gama de usos expandida. A partir dessas pesquisas é possível agregar mais valor e reduzir a exploração de espécies comumente utilizadas. De acordo com Reis et al. (2019), a comercialização de madeiras já consolidadas no mercado faz com que haja a super exploração de determinadas espécies, fazendo com que essas cheguem à extinção.

A sumaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.), da família Bombacaceae, possui madeira de baixa densidade e resistência natural ao ataque de organismos xilófagos. Devido a sua baixa resistência mecânica, a madeira de sumaúma apresenta limitações quanto ao seu uso. Dessa forma, a termodensificação aplicada a madeira de sumaúma tem grande importância no estudo do aumento da resistência mecânica de madeiras de baixa densidade, além de proporcionar uma utilização mais ampla dessa matéria-prima em situações que exigem maior resistência.

2. OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito da termodensificação sobre as propriedades da madeira de sumaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn). Os objetivos específicos foram:

- Avaliar o efeito dos fatores tempo e pressão sobre propriedades mecânicas, físicas e superficiais;
- Avaliar o efeito adicional do pós-tratamento sobre a estabilidade dimensional da madeira de sumaúma termodensificada.

3. HIPÓTESE

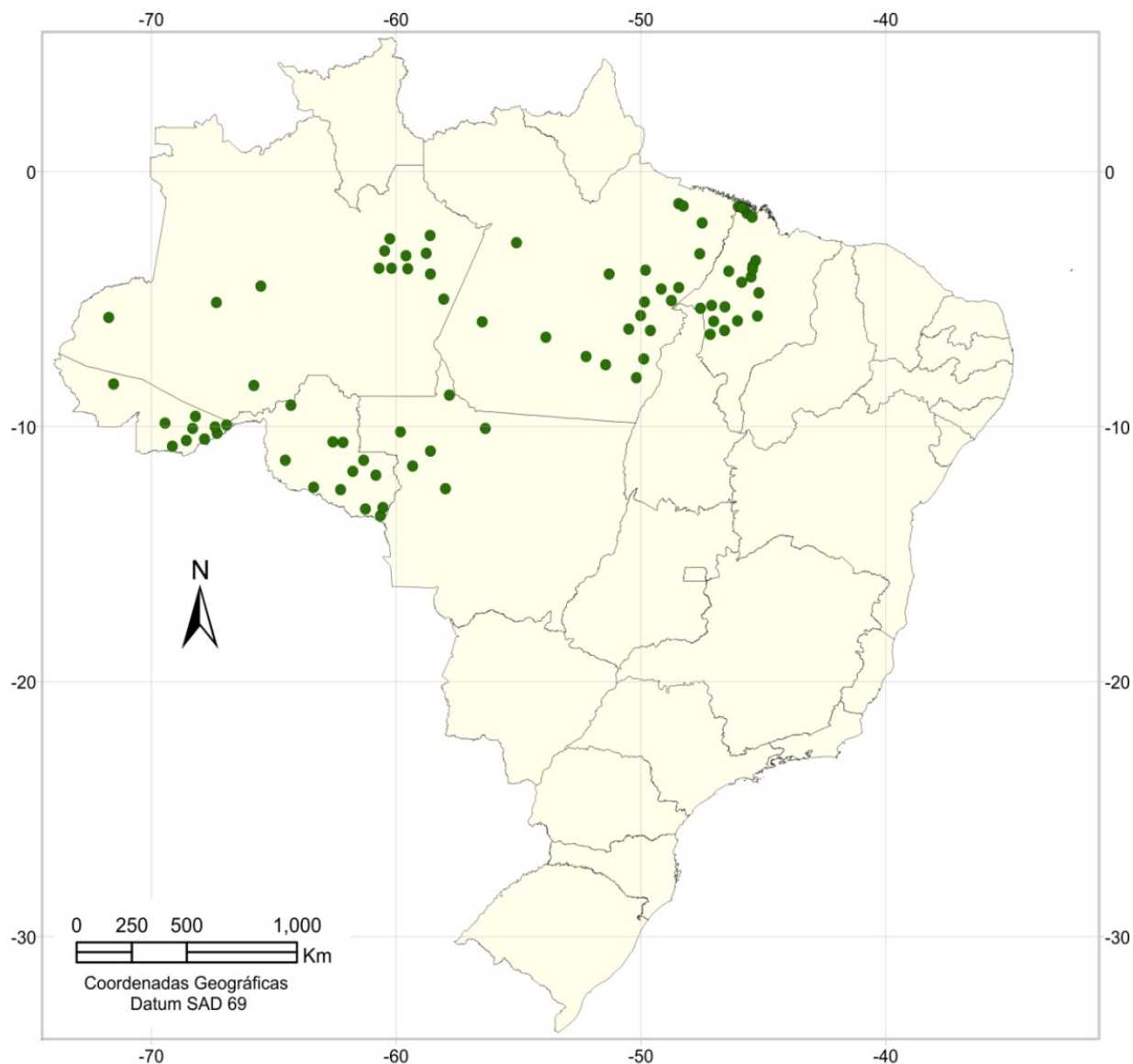
Espera-se que a madeira de sumaúma apresente melhorias nas propriedades mecânicas e superficiais após a termodensificação, e uma melhoria na estabilidade dimensional após o pós-tratamento térmico.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn

A sumaúma, *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn, ocorre no norte da América Central e Antilhas, em toda Bacia Amazônica e Peru. É uma árvore decídua, emergente, que pode chegar a 60 metros de altura e ocorre em áreas de várzea, sazonalmente inundadas. Suas folhas são alternas e palmadas, possui caule cilíndrico com espinhos e sua copa pode alcançar uma cobertura de até 50 metros (GRIBEL et al., 1999).

Conforme observado na Figura 1 os locais de ocorrência natural no Brasil são o Acre, Amazonas, Maranhão, Pará, Rondônia e Mato Grosso, podendo crescer em terra firme, locais com estação seca anual distinta, e em várzeas (NOLDT et al., 2008).



Locais identificados de ocorrência natural de Sumaúma (*Ceiba pentandra*), no Brasil

Figura 1. Mapa de ocorrência natural de Sumaúma no Brasil. Fonte: Embrapa Florestas.

Madeiras de baixa densidade ($< 0,50 \text{ g/cm}^3$) como a sumaúma, munguba, seringa e virola são mais utilizadas para fins em que a resistência mecânica não é fundamental (ABREU et al., 2002). Espécie de alto valor comercial e uma das mais promissoras para plantios, a sumaúma é utilizada na confecção de compensados, laminados, embarcações, caixas e brinquedos. (SOUZA et al., 2010).

A indústria de madeira compensada explora essa madeira de forma intensiva, ameaçando as populações nativas na Amazônia peruana e brasileira (BRONDANI et al.,

2003). Muito utilizada em estruturas diversas, a madeira de sumaúma apresenta baixa resistência ao ataque de cupins (PAES et al., 2007).

4.2 Processos de modificação da madeira

As propriedades físicas, mecânicas e resistência à degradação biótica e abiótica, são parâmetros fundamentais na definição adequada do uso final da madeira (peças estruturais, ambientes internos, móveis, painéis etc). As principais propriedades usadas nessa definição são a densidade ou massa específica (relação entre a massa e o volume), estabilidade dimensional (variação dimensional em função do teor de umidade), resistência à compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento (ARAÚJO, 2007).

A modificação da madeira é uma alternativa para superar as desvantagens que a madeira apresenta em relação a algumas de suas propriedades, como melhorar sua resistência ao ataque de organismos xilófagos, reduzir sua instabilidade dimensional e melhorar sua resistência ao intemperismo natural. Esse processo pode ser classificado como ativo ou passivo: a modificação ativa da madeira é aquela que provoca alterações químicas, enquanto a modificação passiva altera algumas de suas propriedades sem causar alterações químicas (HILL, 2006a). De modo geral, os principais objetivos de processos que visam a modificação da madeira são o aumento da durabilidade e a redução das características de peças que apresentam comportamento inadequado em sua formação e por isso costumam ser rejeitadas (DELUCIS et al., 2013).

Segundo Sandberg et al. (2017) os principais métodos de modificação da madeira são os tratamentos químicos, tratamentos termo-hidro e termo-hidro-mecânicos, tratamentos baseados em processos biológicos e os tratamentos físicos com o uso de irradiação eletromagnética e plasma. Durante os anos 80 indústrias francesas e japonesas começaram a tratar a madeira com calor a fim de aumentar sua resistência ao ataque de organismos xilófagos. No mercado europeu, os principais processos utilizados são *Thermowood process*, *Platowood process*, *Retification process*, *Le Bois Perdure* e *OHT-process* (NAVI e SANDBER, 2011).

A modificação química da madeira ocorre quando há uma reação entre um componente da madeira e um reagente químico, formando ligações covalentes entre eles. (ROWELL, 2005). O tratamento químico da madeira visa melhorar a estabilidade dimensional, propriedades mecânicas ou resistência à degradação biológica, além de modificar suas partículas na fabricação de compósitos, papel e outros materiais. A melhoria na estabilidade dimensional é alcançada pela modificação dos grupos hidroxila da parede

celular, reduzindo os sítios livres que possuem capacidade de ligação com a água, e pelo preenchimento dos espaços vazios do lúmen. Os principais processos de modificação química são a acetilação, furfurilação e tratamentos baseados na impregnação de resinas ou com monômeros vinílicos (GÉRARDIN, 2016).

O tratamento térmico é outra alternativa para modificação das propriedades da madeira. De acordo com Brito et al. (2006), esse método consiste em aplicar altas temperaturas à madeira, sempre abaixo da temperatura de degradação dos polímeros. Segundo Goli et al. (2014), esse tratamento resulta em uma redução da densidade, do teor de umidade de equilíbrio, melhoria na estabilidade dimensional e aumento da resistência à deterioração por fungos. Quanto às propriedades mecânicas, o tratamento térmico aumenta a dureza, mas reduz outras propriedades de resistência, como a resistência à flexão e ao cisalhamento.

O tratamento térmico é comumente realizado entre 180 e 260°C de temperatura. Abaixo de 140°C as modificações nas propriedades da madeira são muito leves, e acima de 260°C as modificações provocam degradação indesejada dos substratos (HILL, 2006b). Existem diversos métodos que podem ser aplicados, sendo importante observar suas variáveis, como duração do tratamento, temperatura, espécie, tamanho das amostras, uso de sistemas abertos ou fechados, uso de catalizadores etc.

Esse método de modificação causa inicialmente uma perda de massa devido à perda de água, em seguida, a perda de massa é causada pela degradação dos seus componentes. Conforme é aumentada a temperatura, os polímeros das paredes celulares são degradados, sendo o primeiro a hemicelulose. Em condições secas, ou seja, sem adição de água ou vapor, há uma diminuição da higroscopicidade acompanhada de uma redução em algumas propriedades de resistência da madeira (FPL, 2010).

Brosse et al. (2010), ao avaliarem os efeitos do tratamento térmico na madeira de *Fagus initially* (faia), verificaram que além da degradação da hemicelulose, há uma alteração da lignina por reações de despolimerização e recondensação. O mesmo foi constatado por Cabalová et al. (2016), em estudo sobre a degradação dos componentes da madeira de carvalho: uma redução da hemicelulose e aumento da celulose e lignina.

As técnicas convencionais de preservação da madeira geralmente envolvem a utilização de produtos químicos tóxicos, envolvendo grandes riscos ambientais. O tratamento térmico, dessa forma, é uma alternativa não tóxica que altera propriedades da madeira aumentando sua durabilidade (HAKKOU et al., 2005). Para Croitoru et al. (2018), o tratamento térmico é um dos métodos ecológicos mais eficientes na melhoria das propriedades da madeira.

Além da melhoria da estabilidade dimensional e resistência ao ataque de microorganismos, o tratamento térmico é capaz de alterar a cor da madeira e criar novos padrões (LOPES et al., 2014). Essa propriedade é de grande importância na classificação estética da madeira no mercado, pois é uma das primeiras características observadas pelo consumidor, sendo considerada um indicador da sua finalidade (MORI et al., 2005).

O tratamento Termo-Hidro-Mecânico (THM) é o processo de densificação que utiliza altas temperaturas, umidade e compressão mecânica a fim de melhorar as propriedades da madeira, modificando a composição química da madeira (SKYBA et al., 2009). Nesse método de modificação, a água e o calor tem o papel de amolecer a parede celular enquanto a madeira é comprimida (SOTOMAYOR CASTELLANOS, 2017).

A madeira submetida ao THM apresenta uma capacidade maior de deformação devido à presença da água, que torna a madeira mais plástica. À temperatura ambiente, ao contrário da celulose e hemicelulose, a lignina está em estado mais rígido, sendo necessário aplicar temperaturas mais altas para que a modificação ocorra. O papel da água nesse tipo de tratamento é provocar reações de hidrólise, promover a mobilidade dos prótons e acidificar o meio reativo (MILITZ, 2012a).

4.3 Termodensificação

Existem vários métodos utilizados para densificar madeira: preenchimento dos espaços vazios com resinas naturais, polímeros, ceras, enxofre, metais de baixa fusão etc. Além desses processos, a madeira pode ser comprimida sob determinadas condições, fazendo com que os espaços vazios do lúmen sejam reduzidos através de processos mecânicos (MILITZ, 2012b).

A densidade é uma importante característica que está diretamente relacionada à qualidade e utilização final da madeira. Sua variação permite a seleção da madeira para diferentes usos, como fabricação de móveis, portas e estruturas (RODRIGUEZ et al., 2016). Dessa forma, como a resistência da madeira tende a aumentar conforme a densidade aumenta, o principal objetivo da densificação é a melhoria das propriedades mecânicas (FANG et al., 2012).

Madeiras de baixa densidade apresentam um uso limitado devido a sua baixa resistência mecânica e por isso não podem ser usadas em situações que essa propriedade seja fundamental. Nesse sentido, a termodensificação é utilizada no aumento da densidade, com a menor perda de massa possível, para aplicações em pisos Gong et al. (2010). Dessa forma, madeiras que apresentam baixa densidade e baixa durabilidade podem ser transformadas em

produtos de maior densidade e ter sua vida útil prolongada através da densificação (SÖZBIR; BEKTAŞ, 2017).

O processo de densificação da madeira consiste em quatro estágios básicos: amolecimento, compressão, ajuste e fixação do estado comprimido. (KUTNAR; SERNEK, 2007). De acordo com Navi e Heger (2004), esse processo é capaz de melhorar as propriedades físicas e mecânicas, além de provocar a modificação da forma da madeira. Segundo os mesmos autores, a compressão transversal da madeira é capaz de eliminar a porosidade total ou parcialmente através da combinação dos fatores temperatura, água e pressão.

Segundo Navi e Girardet (2000) o módulo de elasticidade, dureza superficial, resistência ao cisalhamento e a estabilidade dimensional são exemplos de propriedades que podem ser melhoradas através da densificação. De acordo com Arruda et al. (2011), a combinação da temperatura e da pressão são fatores importantes na otimização da termodensificação, aumentando a densidade da madeira ao mesmo tempo em que é reduzida a higroscopicidade.

De acordo com Militz (2012a) durante a compressão em condições de umidade saturada, as células se deformam até um ponto de escoamento, que ocorre a 0,5 MPa de pressão e 140°C de temperatura. A partir desse ponto, as paredes celulares começam a sofrer maiores deformações e os espaços vazios das células são reduzidos.

O processo de duas etapas, que consiste na densificação termomecânica e na modificação térmica da madeira, permite uma modificação da madeira sem que haja uma perda nas suas propriedades mecânicas, além de aumentar sua durabilidade (JANUS et al., 2018).

4.4 Estabilização da madeira termodensificada

A capacidade de ganhar ou perder água, que faz com que a madeira seja um material higroscópico, pode ser explicada pela sua constituição química, composta basicamente por hemicelulose, celulose e lignina. A hemicelulose é o polímero que mais contribui para a variação dimensional da madeira, pois é o componente mais hidrofílico. (BORGES; QUIRINO, 2004). Dessa forma, a degradação desse componente através do tratamento térmico é uma alternativa para reduzir a higroscopicidade da madeira pela alteração da afinidade pela água de seus constituintes.

O movimento da água na madeira depende da pressão, temperatura e gradiente de umidade, além das propriedades de cada material, e é comandado pela combinação do

movimento de vapor e transporte de líquido. (PFRIEM, 2011). Segundo os mesmos autores a taxa de absorção de água pela madeira apresenta diferença nas três direções, sendo maior no sentido longitudinal. No sentido radial a absorção ocorre em torno dos raios e é maior do que no sentido tangencial.

A hemicelulose, celulose e lignina, são os principais componentes da madeira, e quando modificados provocam grandes mudanças nas suas propriedades. O componente de maior influência na absorção de água é a hemicelulose. Ao entrar em contato com a umidade, a parede celular da madeira expande (ROWELL, 2006). A alteração no teor de umidade da madeira provoca alterações nas suas dimensões, inchando devido às ligações de hidrogênio das moléculas de água com os grupos hidroxila (OH) da madeira, e encolhendo quando a umidade é perdida e as ligações desfeitas (ROWELL, 1983).

A madeira compactada pela termodensificação apresenta melhorias nas suas propriedades mecânicas. Entretanto, sua capacidade de manter a compressão é instável, recuperando sua forma quando entra em contato com a umidade, fenômeno chamado de *springback* ou memória de forma. A principal causa desse efeito é a energia elástica armazenada nas microfibrilas semicristalinas e na lignina, que pode ser eliminado através do alívio das tensões internas de compressão, ou pela formação de novas ligações fortes entre os componentes da madeira densificada (NAVI; HEGER, 2004).

De acordo com Li et al., (2012), a tensão de compressão que permanece após a densificação é uma tensão residual causada por paredes celulares que ficam temporariamente “dobradas”. Ao entrar em contato com a umidade, um estresse interno é gerado para compensar o estresse externo provocado pela variação de umidade e a madeira, cujo teor de umidade está abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), incha.

Segundo os mesmo autores, tratamentos químicos, processos físicos e processos mecânicos podem ser utilizados para evitar que a madeira recupere sua forma original. Um processo bastante utilizado é o tratamento Termo-Hidro-Mecânico (THM), método que utiliza vapor e compressão para evitar o efeito *springback*, além de melhorar algumas propriedades mecânicas, físicas e resistência ao apodrecimento.

Fang et al. (2011) após aplicarem o tratamento Termo-Hidro-Mecânico em lâminas de *Populus tremuloides*, verificaram que o tratamento a óleo quente foi eficiente no aumento da estabilidade dimensional das lâminas densificadas. Foi observado uma significativa redução do efeito *springback*, sendo que quanto maior a temperatura e duração do tratamento, melhor o resultado.

A madeira densificada, sem nenhum pós-tratamento, apresenta uma maior sensibilidade à umidade. Uma alternativa para evitar a recuperação de forma, fator importante na estabilização dimensional, é o tratamento térmico, que tem como objetivo aliviar as tensões e fixar o estado comprimido da madeira (LAINE et al., 2016).

Em estudo realizado por Del Menezzi e Tomaselli (2006), ao aplicarem o tratamento térmico em amostras de OSB a 250°C, verificaram uma redução do inchamento em espessura, teor de umidade de equilíbrio e inchamento definitivo do painel. O tratamento aplicado foi capaz de liberar a tensão de compressão gerada durante a prensagem dos painéis, sendo que quanto maior a duração do tratamento maior foi a redução dessas propriedades. Segundo os autores, a redução do stress de compressão ocorre devido a redução da rigidez dos polímeros (principalmente lignina) e reorganização do colchão durante o aquecimento.

5. MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 2 apresenta um fluxograma que resume as etapas da metodologia utilizada no presente trabalho.

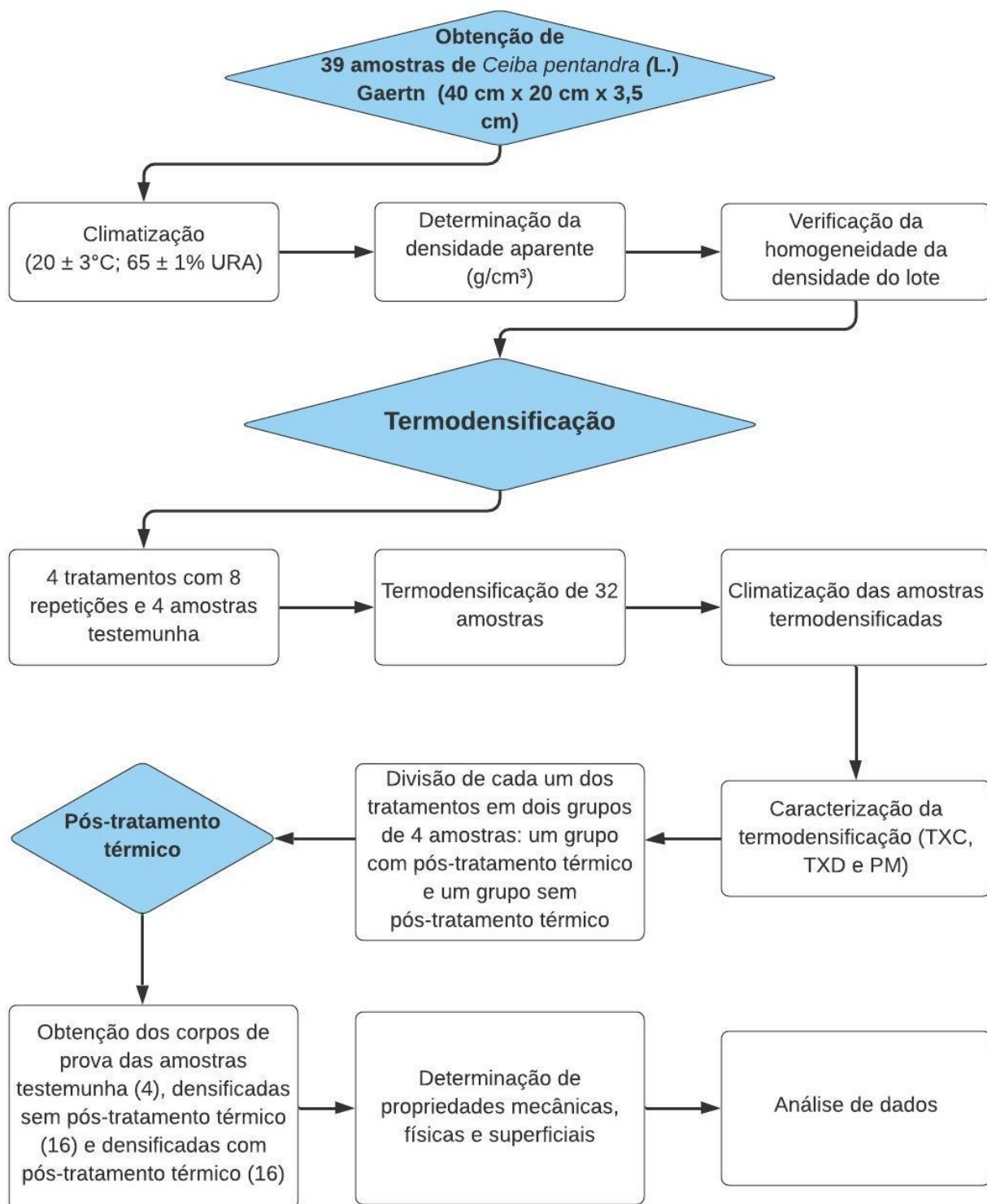


Figura 2. Fluxograma da metodologia utilizada.

5.1 Material

A madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn (sumaúma) foi adquirida no comércio de madeira do Distrito Federal, na empresa JB Madeiras. Foram obtidas 39 amostras nas dimensões 40 cm x 20 cm x 3,5 cm (comprimento x largura x espessura). As amostras foram mantidas em câmara climatizada ($20 \pm 3^\circ\text{C}$; $65 \pm 1\%$ de umidade relativa do ar) até que atingissem massa constante.

A densidade aparente (ρ) foi obtida antes e depois da termodensificação, conforme Equação 1. Foram medidas as espessuras (cm) em quatro pontos e as massas (g) das amostras.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Em que:

ρ = densidade aparente, g/cm^3 ;

M = massa, g;

V = volume, cm^3 .

A fim de verificar a homogeneidade do lote, as amostras foram numeradas de um a nove de forma sistemática, formando nove grupos de quatro amostras cada. Os grupos foram analisados pela ANOVA fator único ao nível de 5% de significância, verificando-se não haver diferença estatística significativa de densidade entre os tratamentos.

5.2 Determinação da pressão utilizada na prensa hidráulica

Com o objetivo de determinar a pressão utilizada na prensa durante a termodensificação, foi realizado um ensaio de compressão perpendicular às fibras ($f_{c,90^\circ}$). A pressão utilizada foi de 30 e 60% da $f_{c,90^\circ}$, que corresponde a 1,07 MPa e 2,15 MPa respectivamente. Foram obtidos sete corpos de prova de três amostras, nas dimensões 15 cm x 5 cm x 3,5 cm (C x L x E), segundo a norma ASTM D143 (2014).

A ($f_{c,90^\circ}$) foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$f_{c,90^\circ} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Em que:

$f_{c,90^\circ}$ = resistência à compressão perpendicular às fibras, MPa;

P = carga do limite proporcional, N;

A = área de compressão, mm².

A pressão utilizada foi calculada pela a Equação 3, conforme manual da prensa hidráulica.

$$PM = \frac{P_e \times A_c}{551,55} \quad (3)$$

Em que:

PM = pressão no manômetro da prensa, kgf/cm²;

P_e = pressão pretendida (30 ou 60% da $f_{c,90^\circ}$), kgf/cm²;

A_c = área da amostra comprimida, cm²;

551,55 = área do pistão da prensa, cm².

5.3 Termodensificação

A termodensificação foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira, localizado na Fazenda Água Limpa – FAL/UnB. Utilizou-se a prensa hidráulica (INDUMEC, 1000 kN), com controle de pressão, e o controle de temperatura foi feito através de um termômetro (CELTD890) (Figura 3).

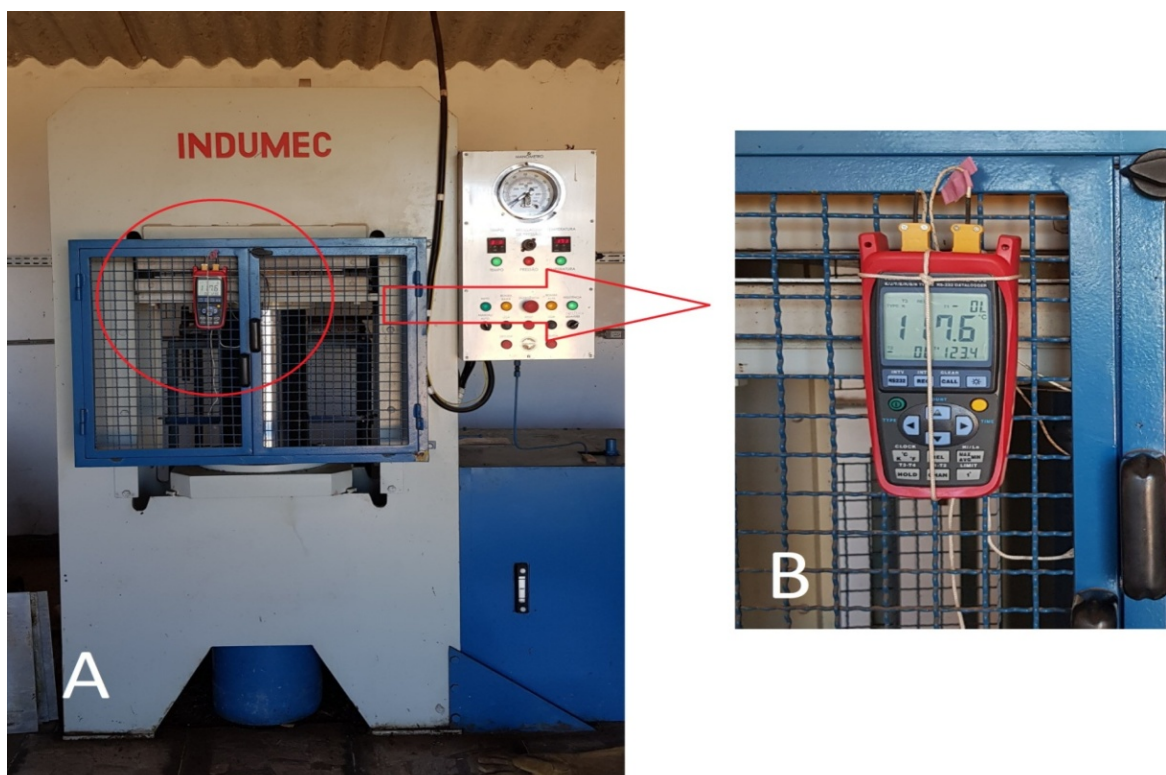


Figura 3. A: Prensa hidráulica INDUMEC; B: Datalogger CELTD890. Foto: o autor.

Foram realizados quatro tratamentos, resultantes da combinação de dois tempos (5 e 10 minutos) e duas pressões (1,07 MPa e 2,15 MPa), com oito repetições cada e quatro amostras foram mantidas como testemunha, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos aplicados.

Tratamento	Parâmetros				Número de repetições
	Temperatura (°C)	Tempo com pressão (min)	Tempo sem pressão (min)	Pressão (MPa)	
Testemunha	-	-	-	-	4
T1	180	5	10	1,07	8
T2	180	10	10	1,07	8
T3	180	5	10	2,15	8
T4	180	10	10	2,15	8

A prensa foi aquecida com os pratos até 180°C de temperatura antes do início do tratamento. Após atingida a temperatura desejada, a amostra foi posicionada na prensa com um termopar inserido na metade da sua espessura e o termômetro programado para registrar a temperatura interna a cada 20 segundos durante todo o tratamento. A amostra foi mantida sob pressão durante o tempo estabelecido para cada tratamento (5 e 10 minutos), após esse período foi retirada a pressão e a amostra foi mantida apenas em contato com os pratos quentes durante 10 minutos. Após o tratamento todas as amostras retornaram à câmara

climatizada ($20 \pm 3^\circ\text{C}$; $65 \pm 1\%$ de umidade relativa do ar). O esquema geral da termodensificação é apresentado na Figura 4.

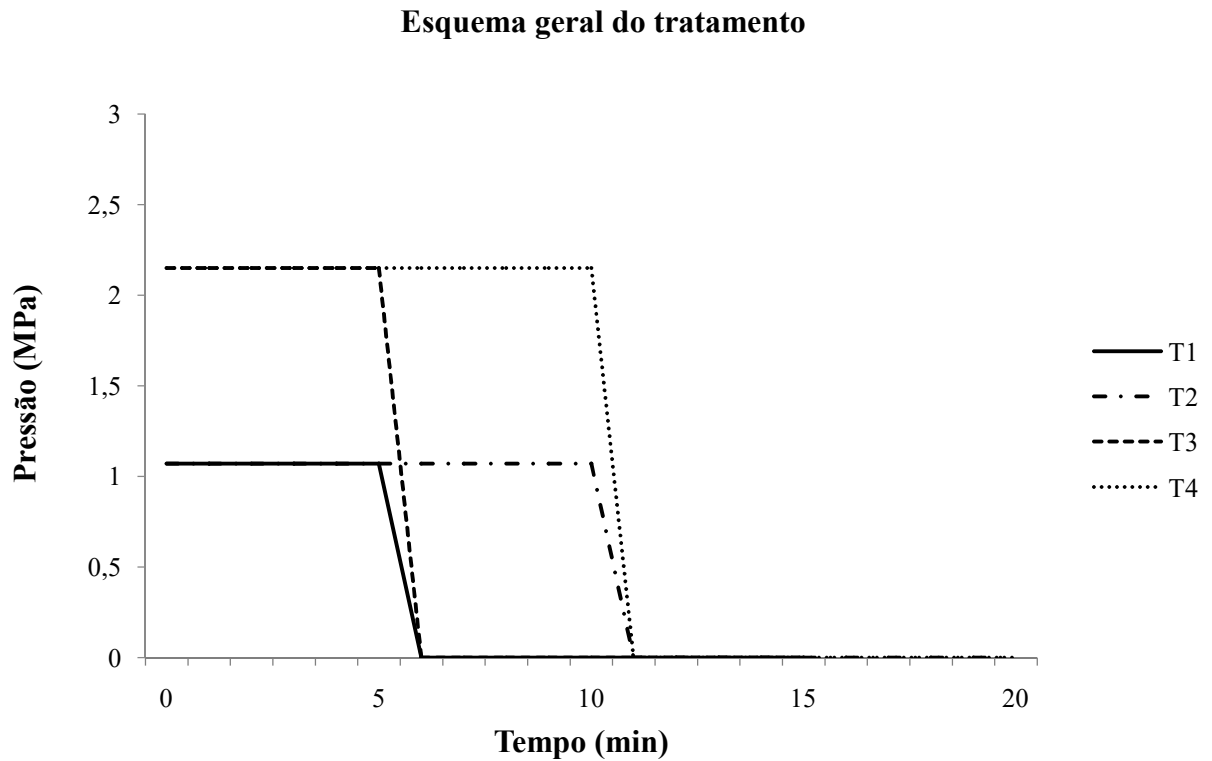


Figura 4. Esquema geral da termodensificação.

5.4 Caracterização da termodensificação

A caracterização do tratamento foi realizada por meio do cálculo da taxa de compactação (TXC), taxa de densificação (TXD) e perda de massa (PM), conforme Equações 4, 5 e 6 respectivamente.

$$\text{TXC} = \left(\frac{E_{\text{inicial}} - E_{\text{final}}}{E_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

TXC = taxa de compactação, %;

E_{inicial} = espessura média antes da termodensificação, cm;

E_{final} = espessura média depois da termodensificação, cm.

$$\text{TXD} = \left(\frac{\rho_{\text{final}} - \rho_{\text{inicial}}}{\rho_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Em que:

TXD = taxa de densificação, %;

ρ_{inicial} = densidade aparente antes da termodensificação, g/cm³;

ρ_{final} = densidade aparente depois da termodensificação, g/cm³.

$$\text{PM} = \left(\frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Em que:

PM = perda de massa, %;

M_{inicial} = massa antes da termodensificação, g;

M_{final} = massa depois da termodensificação, g.

As amostras foram classificadas por ordem crescente de TXD em cada tratamento, e divididas em dois grupos homogêneos de quatro amostras cada um para realização do pós-tratamento. Foi feita a ANOVA fator único para verificar diferença estatística entre os grupos, e eliminar a densidade após a termodensificação como fator de variação. Conforme Tabela 2, cada tratamento foi dividido em dois grupos: grupo 1 = sem pós-tratamento e grupo 2 = com pós-tratamento.

Tabela 2. Parâmetros da termodensificação e do pós-tratamento térmico.

Tratamento	Parâmetros				Repetições	
	Temperatura (°C)	Tempo total da termodensificação (min)	Tempo total do pós-tratamento térmico (min)	Pressão (MPa)	Grupo 1	Grupo 2
Testemunha	-	-	-	-	4	
T1	180	10	25	1,07	4	4
T2	180	15	25	2,15	4	4
T3	180	10	25	1,07	4	4
T4	180	15	25	2,15	4	4

5.5 Pós-tratamento térmico (PT)

Após permanecer em câmara climatizada até atingir massa constante, o segundo grupo, contendo quatro amostras por tratamento, recebeu o pós-tratamento térmico com o objetivo de eliminar as tensões de compressão da termodensificação. A prensa foi aquecida a 180°C e a amostra mantida apenas em contato com os pratos aquecidos durante 25 minutos. A temperatura interna foi controlada com um termopar inserido na metade da espessura e registrada a cada 20 segundos. Após realização do pós-tratamento, as amostras retornaram a câmara climatizada até que atingissem massa constante.

5.6 Determinação das propriedades

5.6.1 Obtenção dos corpos de prova

A Figura 5 apresenta o esquema de corte dos corpos de prova (CPs) utilizados na determinação das propriedades mecânicas, físicas e superficiais. Foram obtidos 17 corpos de prova de cada amostra de 40 cm x 20 cm e espessura variável, de acordo com o tratamento.

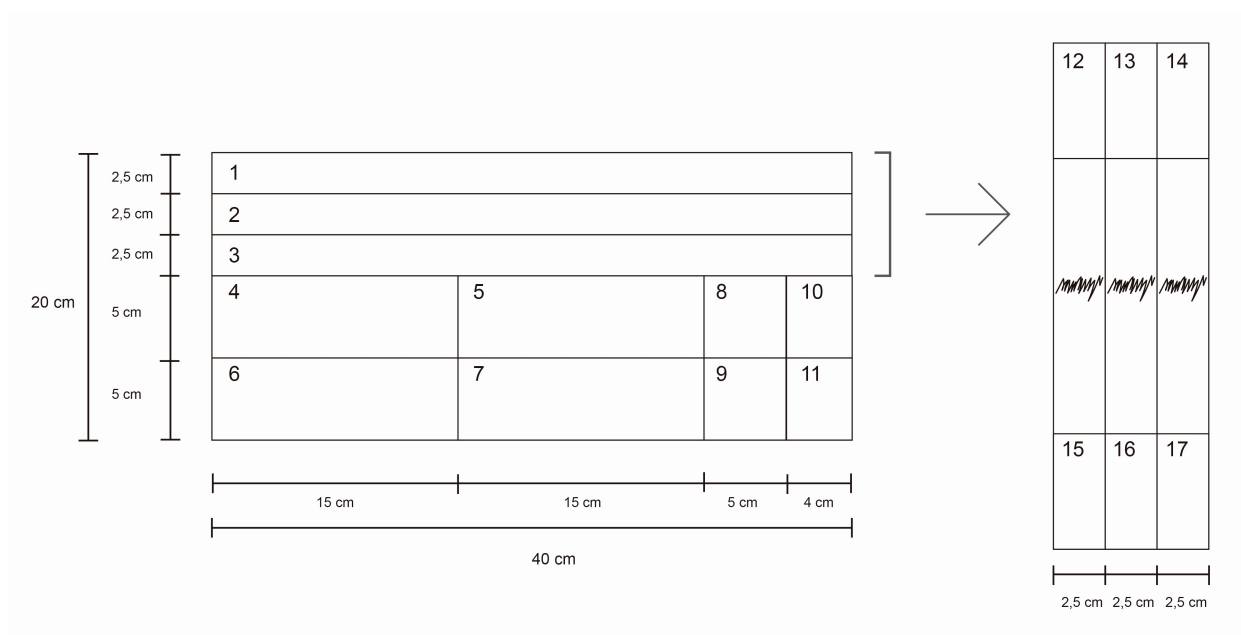


Figura 5. Esquema de confecção dos corpos de prova das análises das propriedades físicas, mecânicas e superficiais. 1,2 e 3: ensaio de flexão estática e módulo de elasticidade dinâmico; 4 e 5: ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras; 6 e 7: ensaio de dureza janka superficial; 8 e 9: ensaio de imersão; 10 e 11: colorimetria e rugosidade; 12 a 17: ensaio de resistência à compressão paralela às fibras, cuja porção central corresponde ao local de rompimento da amostra após o ensaio de flexão estática.

Na Tabela 3 é apresentado o número de CPs obtidos para determinação das propriedades mecânicas, físicas e superficiais.

Tabela 3. Número de CPs utilizados na caracterização das propriedades mecânicas, físicas e superficiais.

Ensaio	Número de repetições	
	Por amostra	Por tratamento
Flexão estática e <i>stress wave timer</i>	3	12
Compressão perpendicular às fibras	2	8
Compressão paralela às fibras	6	24
Dureza Janka superficial	2	8
Inchamento em espessura, absorção, taxa de não retorno em espessura e teor de umidade de equilíbrio	2	8
Colorimetria, molhabilidade e rugosidade	2	8

5.6.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas determinadas foram: resistência à compressão perpendicular às fibras ($f_{c,90^\circ}$), resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0^\circ}$), dureza janka superficial (f_H), módulo de ruptura em flexão estática (f_m), módulo de elasticidade em flexão estática (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d), obtido pelo ensaio não destrutivo de ondas de tensão longitudinal. As propriedades foram calculadas conforme Equações 7 a 11 de acordo com a norma ASTM D143 (2014).

Resistência à compressão perpendicular às fibras ($f_{c,90^\circ}$)

$$f_{c,90^\circ} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Em que:

$f_{c,90^\circ}$ = resistência à compressão perpendicular às fibras, MPa;

P = carga no limite proporcional, N;

A = área de compressão, mm².

Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0^\circ}$)

$$f_{c,0^\circ} = \frac{P}{A} \quad (8)$$

Em que:

$f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela às fibras, MPa;

P = força máxima, N;

A = área de compressão, mm².

Dureza Janka superficial (f_H)

$$f_H = P \quad (9)$$

f_H = dureza janka superficial, MPa

P = força necessária para que metade de uma esfera de 1 cm de diâmetro penetre na superfície do material, MPa.

Módulo de ruptura em flexão estática (f_m)

$$f_m = \frac{M}{w} \quad (10)$$

Em que:

f_m = módulo de ruptura em flexão estática, MPa;

M = momento fletor máximo [(P x L)/4], N.mm;

w = módulo de resistência [largura*(espessura²)]/6, mm³.

Módulo de elasticidade em flexão estática (E_m)

$$E_m = \frac{P \times L^3}{48 \times \Delta \times I} \quad (11)$$

Em que:

E_m = módulo de elasticidade em flexão estática, MPa;

P = carga no limite proporcional, N;

L = vão livre, mm;

Δ = deslocamento, mm;

I = momento de inércia $[(b \times h^3)/12]$, mm^4 .

Os ensaios destrutivos para obtenção das propriedades mecânicas $f_{c,90^\circ}$, $f_{c,0^\circ}$, f_H , f_m , e E_m foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio (EMIC DL 30000), conforme ilustrados na Figura 6.



Figura 6. 1: ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras; 2: ensaio de resistência a compressão paralela às fibras; 3: ensaio de dureza janka superficial; 4: ensaio de flexão estática. Foto: o autor.

O ensaio de ondas de tensão foi realizado com o equipamento *Stress wave timer Metriguard 239* (Figura 7), que fornece o tempo que uma onda de tensão longitudinal leva para passar da fonte geradora até a fonte receptora.

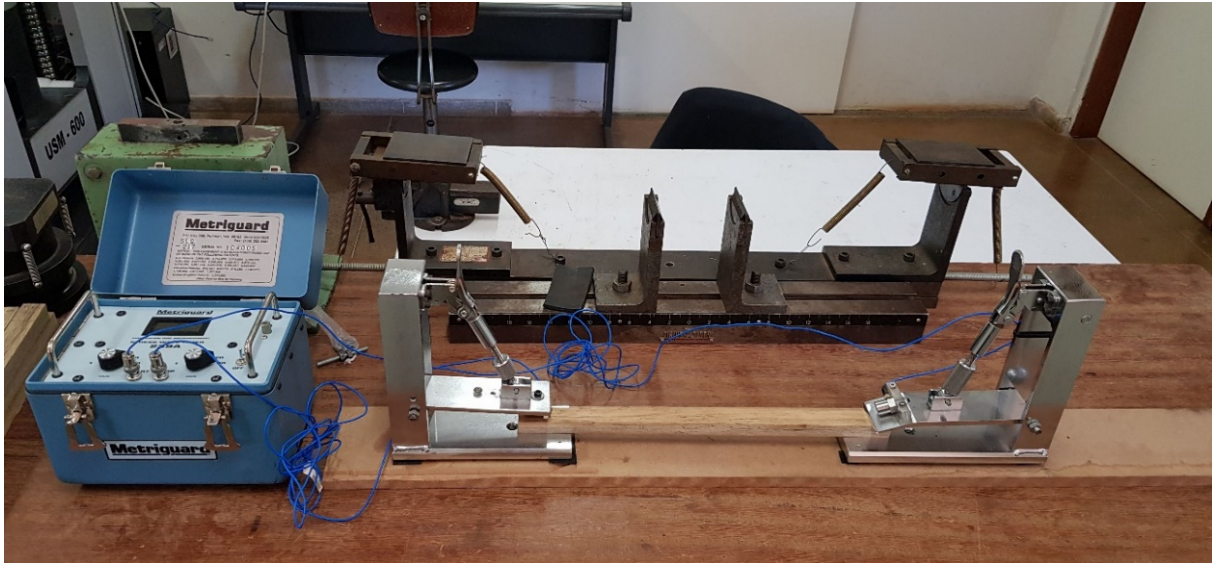


Figura 7. Ensaio não destrutivo de ondas de tensão realizado com o equipamento *Stress wave timer Metriguard 239*. Foto: o autor.

As garras do equipamento foram dispostas a uma distância de 30 cm (vão), e foram realizadas três leituras em cada CP, utilizados posteriormente no ensaio de flexão estática. Ao liberar o pêndulo este equipamento mede o tempo de passagem da onda entre a fonte geradora e a fonte receptora. Utilizando-se dos dados de densidade aparente (kg/m^3) e velocidade de propagação da onda, o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado através da Equação 12.

$$E_d = v^2 \times \rho \quad (12)$$

Em que:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, convertido em MPa;

v = velocidade (distância/tempo), m/s;

ρ = densidade aparente do painel, kg/m^3 .

5.6.3 Propriedades físicas

As seguintes propriedades físicas foram determinadas: inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão (IE2H e IE24H), absorção de água após 2 e 24 horas de imersão (ABS2H e ABS24H), taxa de não retorno em espessura (TNRE) e teor de umidade de equilíbrio (TUE), conforme Equações 13, 14, 15 e 16.

$$IE = \left(\frac{E_{final} - E_{inicial}}{E_{inicial}} \right) \times 100 \quad (13)$$

Em que:

IE = inchamento em espessura após duas ou 24 horas de imersão, %;

$E_{inicial}$ = média das espessuras de cinco pontos antes da imersão, mm;

E_{final} = média das espessuras de cinco pontos após duas horas de imersão, mm.

$$ABS = \left(\frac{M_{final} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad (14)$$

Em que:

ABS2H = absorção de água após duas ou 24 horas de imersão, %;

$M_{inicial}$ = massa antes da imersão, g;

M_{final} = massa após a imersão, g.

$$TNRE = \left(\frac{E_{final} - E_{inicial}}{E_{inicial}} \right) \times 100 \quad (15)$$

Em que:

TNRE = taxa de não retorno em espessura, %;

$E_{inicial}$ = média das espessuras nos cinco pontos após a imersão e seca em estufa, mm;

E_{final} = média das espessuras nos cinco pontos antes da imersão, mm.

$$TUE = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{final}} \right) \times 100 \quad (16)$$

Em que:

TUE = teor de umidade de equilíbrio, %;

$M_{inicial}$ = massa antes da imersão, g;

M_{final} = massa após secagem em estufa a 0%, g.

5.6.4 Propriedades superficiais

5.6.4.1 Propriedades colorimétricas

A análise colorimétrica foi realizada com o equipamento espectrofotômetro *Color Eye XTH-X-Rite* (Figura 8), com resolução de 3 nm, equipado com uma esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, conectado a um microcomputador. Foram realizadas cinco leituras em cada face que esteve em contato com os pratos quentes durante o tratamento, totalizando dez leituras por amostra.



Figura 8. Espectrofotômetro *Color Eye XT-X-Rite*. Foto: o autor.

A caracterização da cor da madeira foi realizada utilizando-se o sistema CIELAB (1976) por meio da determinação dos parâmetros colorimétricos L^* (claridade), coordenadas

a^* (coloração verde-vermelho) e b^* (coloração azul-amarelo). Os parâmetros C (saturação) e h° (ângulo de tinta) foram obtidos por meio das Equações 17 e 18.

$$C = \left(\frac{a^{*2} + b^{*2}}{2} \right) \quad (17)$$

Em que:

C = saturação;

a^* = matriz do eixo vermelho-verde;

b^* = matriz do eixo amarelo-verde;

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \times 100 \quad (18)$$

Em que:

h° = ângulo de tinta

As alterações na cor após a termodensificação e o pós-tratamento térmico foram avaliadas utilizando-se a variação total da cor (ΔE^*), conforme Equação 19. Através dessa metodologia é possível ter uma visão ampla das modificações decorrentes do tratamento.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (19)$$

Em que:

ΔE^* = variação total da cor;

ΔL^* = variação da luminosidade (amostra tratada menos testemunha/amostra após pós-tratamento menos amostra termodensificada);

Δa^* e Δb^* = variação das coordenadas cromáticas (amostra tratada menos testemunha/amostra após pós-tratamento menos amostra termodensificada);

5.6.4.2 Rugosidade

A rugosidade foi obtida utilizando-se o rugosímetro *Surftest* modelo SJ - 400 (*Mitutoyo*) acoplado a um computador com software instalado (Figura 9). A rugosidade foi medida de acordo com a norma JIS B 0601 (2001), com percurso de avaliação perpendicular à grã de 8 mm.



Figura 9. Ensaio de rugosidade superficial realizado com o equipamento Rugosímetro *Surftest* modelo SJ - 400 (*Mitutoyo*). Foto: o autor.

Foram realizadas seis leituras em cada amostra em diferentes posições dos corpos de prova e determinados os parâmetros R_a (rugosidade média), R_z (rugosidade de profundidade média) e R_q (rugosidade média quadrática), de acordo com as Equações 20, 21 e 22 respectivamente.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (20)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Y_{pi}| + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Y_{vi}| \quad (21)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (22)$$

Em que:

R_a = rugosidade média, μm ;

R_z = rugosidade de profundidade média, μm ;

R_q = rugosidade média quadrática, μm ;

Y_i = desvios do perfil, μm ;

Y_{pi} = picos mais altos, μm ;

Y_{vi} = vales mais profundos, μm ;

5.6.5 Análise de dados

A caracterização do tratamento foi analisada pelo teste de média de Tukey, em que avaliou-se a diferença entre os quatro tratamentos e pela ANOVA fatorial, em que avaliou-se o efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades.

As propriedades mecânicas, físicas e superficiais foram analisadas pelo teste de Dunnett, que faz a comparação par a par dos tratamentos com a testemunha, e pela ANOVA fatorial, em que avaliou-se o efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades.

O efeito do pós-tratamento foi analisado pela ANOVA, em que foram comparadas as diferenças entre os tratamentos que não receberam o pós-tratamento e os tratamentos que receberam. Todas as análises foram realizadas ao nível de 5% de significância pelo *software IBM SPSS Statistic 20.0*.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização das amostras antes da densificação

Na Tabela 4 estão os valores de densidade aparente (ρ), desvio padrão e coeficiente de variação das amostras. A densidade média das amostras foi de 0,342 g/cm³, portanto dentro da faixa encontrada na literatura para a espécie *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., que pode variar de 0,250 a 0,391 g/cm³ dependendo do local de plantio (CALIRI et al., 1993).

Tabela 4. ANOVA da densidade das amostras da testemunha e daquelas alocadas para os quatro tratamentos.

Tratamento	Densidade		
	ρ (g/cm ³)	Desvio Padrão	CV (%)
Testemunha	0,344 ^a	0,036	10,437
T1 (5 min – 1,07 MPa)	0,341 ^a	0,034	9,978
T2 (10 min – 1,07 MPa)	0,338 ^a	0,025	7,272
T3 (5 min – 2,15 MPa)	0,342 ^a	0,025	7,389
T4 (10 min – 2,15 MPa)	0,345 ^a	0,027	7,945
Média	0,342	0,029	8,604

A homogeneidade das amostras quanto à densidade foi confirmada através da ANOVA, que não mostrou diferença estatisticamente significativa entre as médias dos tratamentos.

6.1.1 Termodensificação

6.1.2 Temperatura interna das amostras

A Figura 10 apresenta a temperatura interna das amostras durante a termodensificação. O gráfico apresenta o valor médio das oito repetições de cada tratamento.

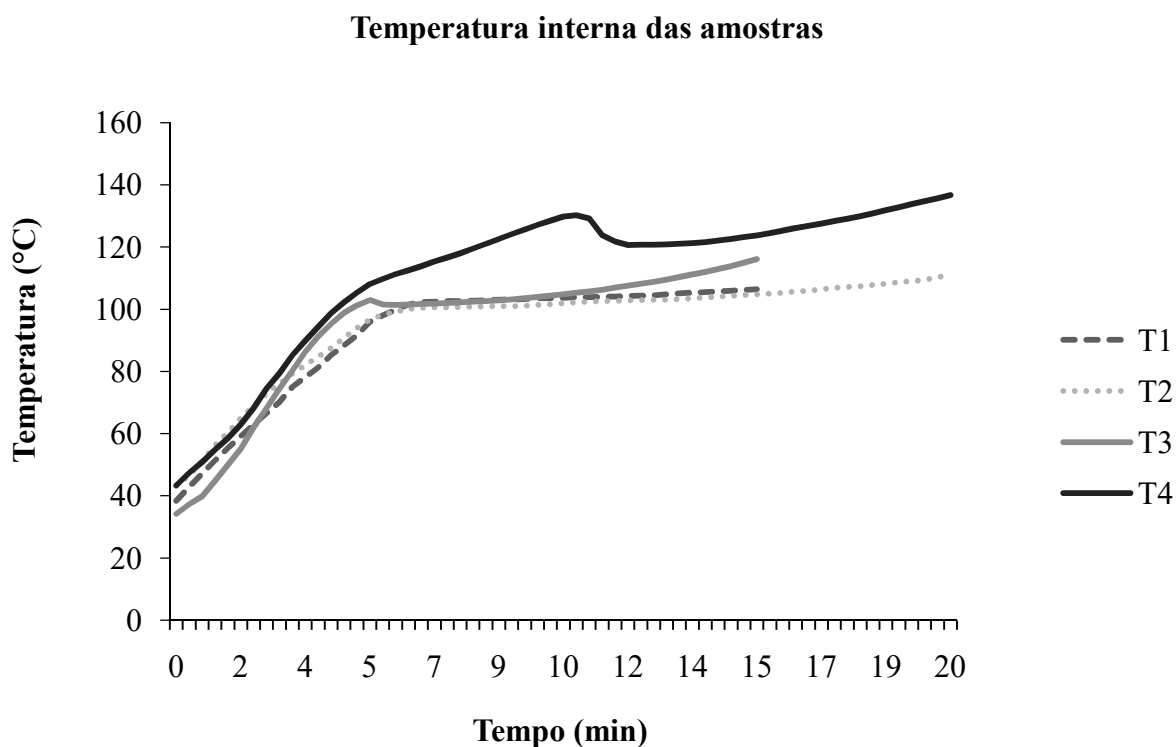


Figura 10. Temperatura interna das amostras durante a termodensificação.

Observou-se que a taxa de aquecimento das amostras foi crescente em todos os tratamentos até a temperatura de 100°C, atingida após cinco minutos de tratamento. Após esse período a taxa de aquecimento diminuiu e se manteve estável até o fim do tratamento. Arruda et al, (2015) encontraram resultados semelhantes ao densificarem amostras de cedrinho, angelim, tachi preto e mandioqueira. Os autores observaram que o tempo levado para as amostras atingirem a temperatura interna de 100°C foi de cinco a dez minutos.

Em estudo de Poletto et al. (2012), em que foi realizada a análise termogravimétrica de quatro espécies provenientes de resíduos da indústria brasileira (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Mezilaurus itauba* and *Dipteryx odorata*), observou-se que a perda de água ocorre a 100°C e posteriormente ocorre a degradação dos principais componentes da madeira (hemicelulose, celulose e lignina). A degradação desses componentes ocorre em intervalos de temperatura que se sobrepõem parcialmente, não havendo assim um momento exato em que um componente acaba de ser degradado e o outro começa.

Segundo Navi e Sandberg (2011), durante o aquecimento da madeira ocorrem reações endotérmicas e exotérmicas simultaneamente, sendo quase impossível determinar a temperatura em que cada reação começa. Tais reações dependem tanto da composição da madeira quanto das condições em que o tratamento é realizado.

O tratamento apresentou duas fases distintas de aquecimento evidenciadas pela inclinação da curva. Inicialmente, as amostras possuíam um teor de umidade maior que contribuiu para a elevada taxa de aquecimento na primeira fase, até atingir 100°C. Após atingir 100°C, a taxa de aquecimento diminuiu e se manteve constante até o fim do tratamento.

A temperatura máxima atingida pelas amostras nos tratamentos T1 (1,07 MPa - 5 min), T2 (1,07 MPa - 10 min), T3 (2,15 MPa - 5 min) e T4 (2,15 MPa - 10 min) foi de 115,4°C, 118,9°C, 127,7°C e 160°C respectivamente. Isso indica que o aumento da severidade do tratamento causou o aumento da temperatura máxima atingida.

6.1.3 Caracterização da termodensificação

A Figura 11 apresenta as médias da TXC dos quatro tratamentos analisadas pelo teste de média de Tukey, propriedade que expressa a redução da espessura do painel.

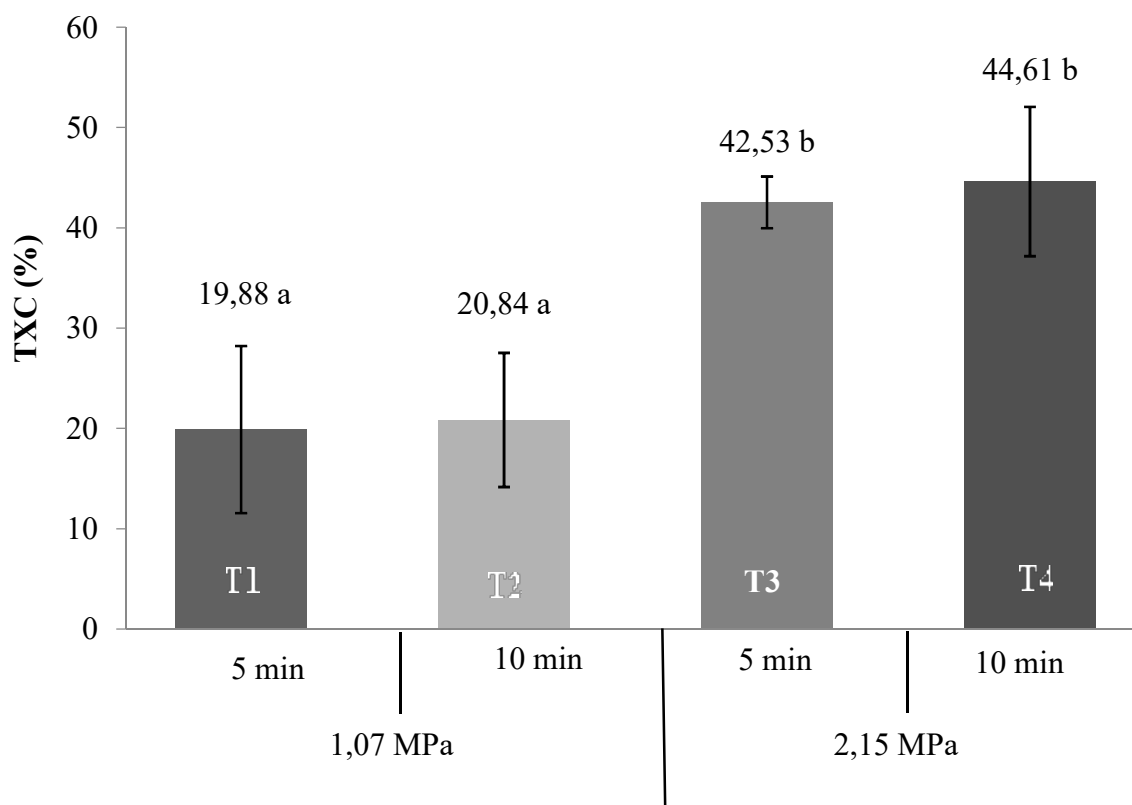


Figura 11. Taxa de compactação (TXC). Análise estatística pelo teste de média de Tukey, ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.

A TXC foi estatisticamente igual para os tratamentos T1 e T2, e para os tratamentos T3 e T4. Entretanto, considerando os tratamentos de mesma duração o aumento da TXC do

T1 para o T3 foi de 113,96% e do T2 para o T4 de 114,13%, indicando que o aumento da pressão, quando mantida a duração do tratamento, provocou uma maior redução na espessura da amostra.

Como esperado, o aumento da severidade do tratamento causou um aumento na TXC, devido à compressão que reduziu os espaços vazios no lúme e entre as células. De acordo com Arruda et al. (2015), o efeito da densificação pode ser verificado nos valores da redução da espessura, expressos na TXC, como observado no presente trabalho.

A Figura 12 mostra a diferença de espessura entre as quatro amostras de cada tratamento comparadas à testemunha. Observou-se uma redução da espessura das amostras com o aumento da severidade do tratamento, sendo que a mudança foi mais perceptível quando aumentada a pressão do tratamento de 1,07 MPa (T1 e T2) para 2,15 MPa (T3 e T4).



Figura 12. TE = Testemunha; T1 = amostra do tratamento 1; T2 = amostra do tratamento 2; T3 = amostra do tratamento 3; T4 = amostra do tratamento 4. Foto: o autor.

A Figura 13 apresenta as médias da TXD analisadas pelo teste de Tukey, propriedade que expressa o aumento da densidade da amostra.

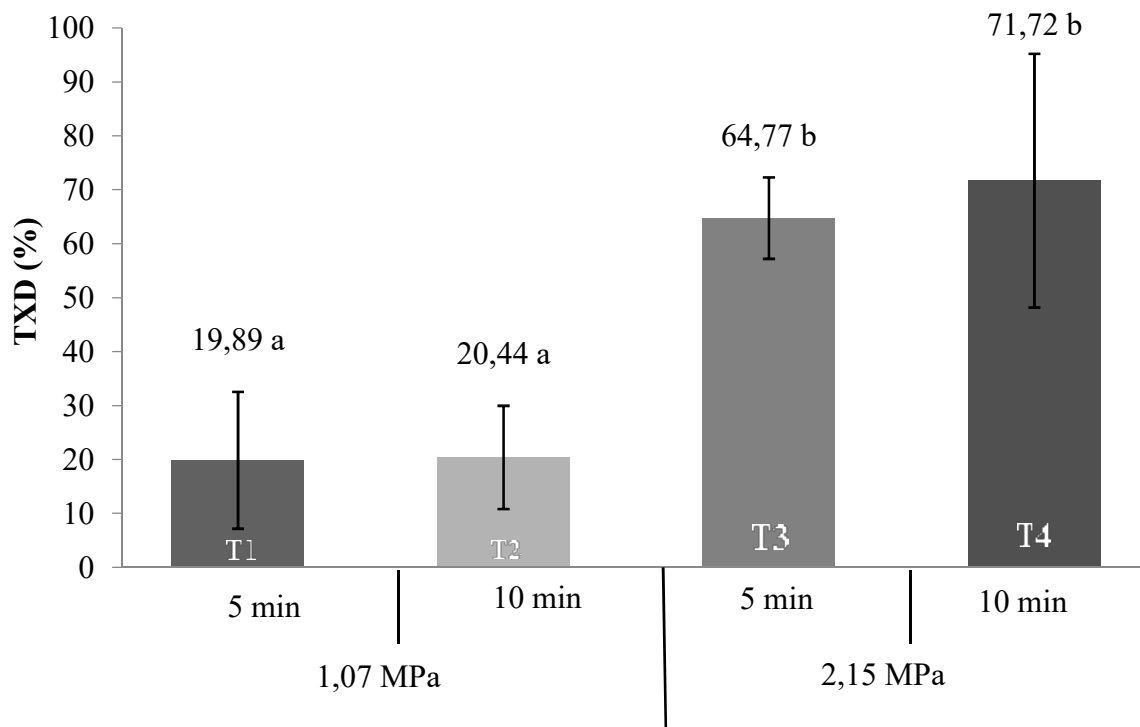


Figura 13. Taxa de densificação (TXD). Análise estatística pelo teste de média de Tukey ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.

A Tabela 5 apresenta a densidade dos quatro tratamentos antes e depois da densificação analisadas pela ANOVA.

Tabela 5. ANOVA da densidade dos quatro tratamentos antes e depois da densificação.

Tratamento	Densidade (g/cm ³)	
	Antes	Depois
T1 (5 min – 1,07 MPa)	0,34	0,41*
T2 (10 min – 1,07 MPa)	0,34	0,41*
T3 (5 min – 2,15 MPa)	0,34	0,56*
T4 (10 min – 2,15 MPa)	0,34	0,57*

*valores significativos ao nível de 5% de significância.

A TXD apresentou comportamento semelhante à TXC. Os tratamentos T1 e T2 apresentaram valores estatisticamente iguais assim como os tratamentos T3 e T4, com ganhos de 2,77% e 10,74% respectivamente. O aumento da pressão, quando mantida a duração do

tratamento, foi de 225,67% do T1 para o T3 e 250,90% do T2 para o T4, indicando que a pressão possui papel fundamental no aumento da densidade.

O comportamento semelhante à TXC foi observado pela redução da espessura com pouca perda de massa, causando um aumento na densidade da amostra. Arruda et al. (2015) explicaram que a densificação da madeira ocorre devido ao comportamento viscoelástico dos polímeros amorfos presentes na madeira, que mudam de um estado mais rígido para um estado viscoso ao atingirem a temperatura de transição vítrea (T_g).

A Figura 14 apresenta as médias de PM dos quatro tratamentos analisadas pelo teste de média de Tukey.

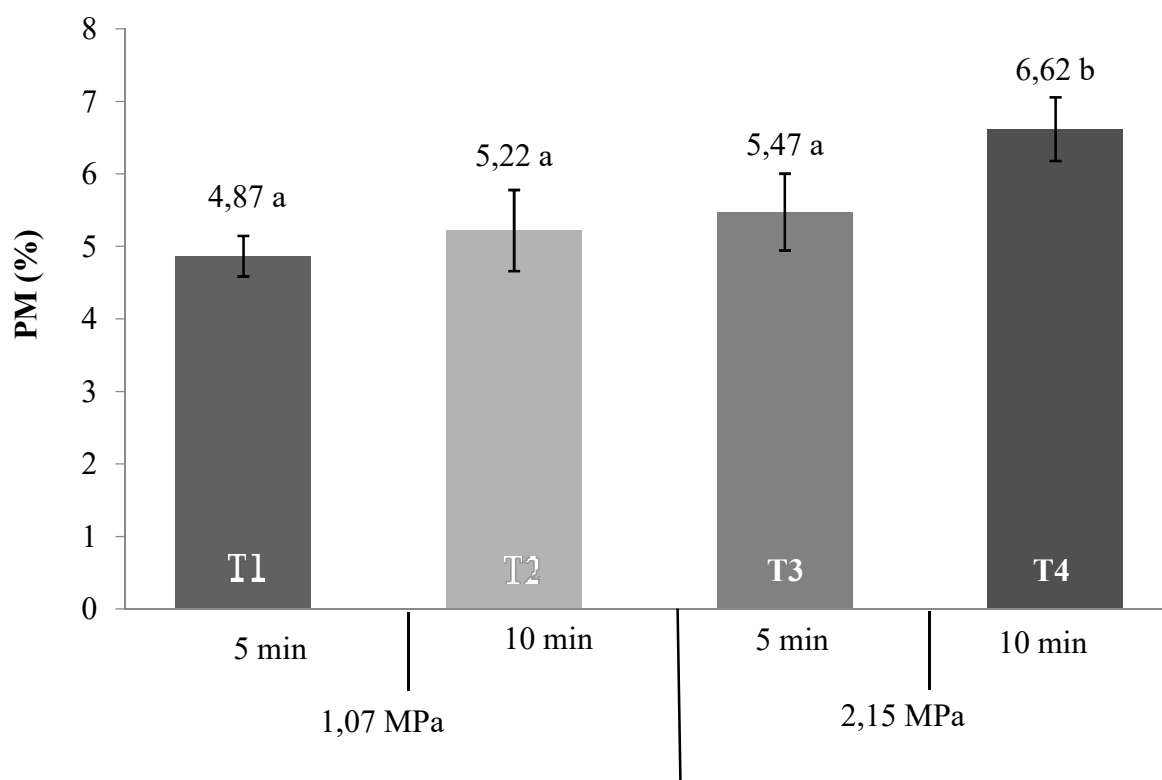


Figura 14. Perda de massa (PM). Análise estatística pelo teste de média de Tukey, ao nível de 5% de significância, em que letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. As barras acima das colunas indicam os desvios padrão.

Os tratamentos T1, T2 e T3 foram estatisticamente iguais para a PM. O aumento da pressão influenciou a PM apenas no tratamento de maior duração (tratamento que atingiu maior temperatura final). Em estudo realizado por Čermak et al. (2015) as madeiras de *Fagus sylvatica* L., *Populus alba* L., e *Picea abies* L. Karst., apresentaram os maiores valores de PM quando tratadas a temperaturas mais altas (200°C). Segundo os autores, o fator de maior

influência na PM é a temperatura, variando também de acordo com a espécie e tempo de tratamento.

No presente trabalho observou-se que o tratamento de maior severidade (T4) no qual foi usado 2,15 MPa de pressão durante dez minutos, a PM foi estatisticamente diferente dos demais tratamentos. A maior temperatura interna atingida foi no T4, chegando a 160°C, como observado na Figura 10. Segundo Poletto et al. (2012) a perda de água ocorre a partir de 100°C, em seguida começa a ocorrer a degradação dos polímeros da madeira.

A degradação dos polímeros depende da temperatura de transição vítrea (T_g), que é o limite entre um estado vítreo, duro e quebradiço, e um estado menos rígido. No estado vítreo os movimentos moleculares são de baixa amplitude e o material apresenta propriedades físicas semelhantes a um material sólido. Já na fase “amolecida”, os movimentos moleculares são de maior amplitude pois a ação da temperatura diminui a coesão inter e intramolecular. A T_g da celulose varia de 200 a 250°C, enquanto a T_g da hemicelulose ocorre em temperaturas mais baixas, entre 150 e 220°C (MILITZ, 2012a).

Juizo et al. (2018) e Brito et al. (2008), observaram que amostras de *E. saligna* e *P. caribaea* var. *hondurensis* tratadas termicamente a 120, 140, 160 e 180°C, apresentaram maior PM a 180°C. A análise química mostrou que o teor dos principais grupos responsáveis pela formação da hemicelulose, arabinose, manose, galactose e xilose, com exceção da glucose, apresentou uma redução significativa.

A ANOVA fatorial, apresentada na Tabela 6, mostra o efeito dos fatores tempo e pressão nas propriedades de caracterização do tratamento.

Tabela 6. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as variáveis de caracterização da termodensificação.

Propriedade (%)	Fator			
	Tempo (min)		Pressão (MPa)	
	5	10	1,07	2,15
TXC	31,20 ^{NS}	32,88 ^{NS}	20,36*	43,72*
TXD	42,33 ^{NS}	46,10 ^{NS}	20,16*	68,27*
PM	5,17*	5,87*	5,04*	6,01*

TXC = taxa de compactação; TXD = taxa de densificação; PM = perda de massa; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada fator e propriedade; NS = não significativo.

Os resultados da ANOVA fatorial confirmaram o que foi observado no teste de média de Tukey. A TXC e TXD foram influenciadas apenas pela pressão, indicando que os tratamentos podem ter uma menor duração e apresentarem o mesmo resultado quanto a essas

propriedades. Assim, o melhor tratamento foi o T3 (cinco minutos de duração e 2,15 MPa de pressão).

Em estudo realizado por Brito et al. (2006), em que foi realizada o tratamento térmico da madeira de *Eucalyptus grandis*, utilizando-se cinco temperaturas diferentes (120°C, 140°C, 160°C, 180°C e 200°C), foi possível observar que o tratamento térmico não exerceu influência significativa na densidade básica da madeira. Os resultados do presente trabalho indicam que a ação das forças de compressão foi responsável pelo aumento na densidade.

Os resultados indicaram que apenas o aumento da duração do tratamento não foi suficiente para um aumento significativo nas TXD e TXC, foi necessário também um aumento na pressão. De acordo com Militz (2012a), a partir de certo momento as células da madeira cedem e o esforço necessário para que a compressão continue ocorrendo aumenta, pois as paredes celulares estão cada vez mais próximas. Entretanto, aumentar a pressão pode comprometer a microestrutura das paredes celulares.

A PM foi influenciada por ambos os fatores temperatura e pressão. Como observado na análise realizada pelo teste de média de Tukey, o aumento da pressão juntamente com o aumento da duração do tratamento contribuíram para uma maior PM no T4. Entretanto, a maior PM no T4 não afetou negativamente a TXC e a TXD, e o T4 foi o de maior TXC e TXD.

6.2 Efeito da termodensificação sobre as propriedades da madeira de sumaúma

6.2.1 Propriedades mecânicas

Observa-se que, de modo geral, as propriedades mecânicas apresentaram um aumento significativo decorrente do aumento na densidade, expresso pela TXD. Segundo Taghiyari et al. (2017) isso ocorre porque essas propriedades estão positivamente relacionadas à densidade.

A Tabela 7 a seguir apresenta as médias das propriedades mecânicas analisadas pelo teste de Dunnett, em que cada tratamento foi comparado à testemunha.

Tabela 7. Análise das propriedades mecânicas pelo teste de Dunnett.

Tratamento	Propriedades mecânicas (MPa)					
	$f_{c,90^\circ}$	$f_{c,0^\circ}$	f_H	f_m	E_m	E_d
Testemunha	4,99 (13,89)	21,25 (10,73)	13,86 (21,17)	38,12 (10,44)	4987,60 (11,37)	5154,47 (9,86)
T1 (5 min – 1,07 MPa)	6,03 ^{NS} (16,75)	28,62* (7,83)	18,73* (10,75)	53,13* (11,34)	6278,67* (9,63)	5880,58* (13,54)
T2 (10 min – 1,07 MPa)	6,12 ^{NS} (16,07)	29,19* (6,85)	19,81* (9,68)	49,71* (11,23)	5803,02* (6,96)	5252,36 ^{NS} (9,39)
T3 (5 min – 2,15 MPa)	7,12 ^{NS} (30,49)	36,81* (11,00)	25,79* (13,30)	67,41* (8,70)	7383,92* (15,14)	8377,29* (7,74)
T4 (10 min – 2,15 MPa)	8,21* (38,73)	36,19* (13,68)	29,88* (7,61)	65,76* (11,22)	6494,83* (10,62)	8862,41* (7,28)

$f_{c,90^\circ}$ = resistência à compressão perpendicular às fibras; $f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela às fibras; f_H = dureza janka superficial; f_m = módulo de ruptura em flexão estática; E_m = módulo de elasticidade em flexão estática; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada coluna; NS = valores não significativos; valores entre parênteses = desvio padrão.

A $f_{c,90^\circ}$ apresentou diferença estatisticamente significativa apenas no T4, com um aumento de 64,53%. Os demais tratamentos tiveram aumentos não significativos, indicando que para que haja um aumento nessa propriedade faz-se necessário aplicar elevadas cargas de compressão por períodos mais longos dentro do limite proporcional.

A termodensificação causou aumento significativo na $f_{c,0^\circ}$ em todos os tratamentos, sendo que o melhor foi o T3, com um aumento de 73,22% nessa propriedade. Em estudo realizado por Santos et al. (2012) a termodensificação aplicada à madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* provocou um aumento de em média 10,5% da $f_{c,0^\circ}$.

O teste de f_H mostrou um ganho significativo em todos os tratamentos comparados à testemunha, sendo o tratamento mais severo (T4) o que apresentou o maior ganho (115,58%). Fang et al. (2012) ao estudarem o efeito da densificação de lâminas de *Populus tremuloides* e de híbridos de (*Populus maximowiczii* × *Populus balsamifera*) nas propriedades mecânicas observaram um aumento de até três vezes na dureza quando comparados às amostras não tratadas, devido ao empacotamento das fibras.

No ensaio de flexão estática observou-se um aumento significativo do f_m e E_m em todos os tratamentos. Mantendo-se a pressão a 1,07 MPa o melhor tratamento para o f_m foi o T1 com um aumento de 39,38% em comparação ao T2 que apresentou um aumento de 30,40%. O mesmo comportamento foi observado quando utilizado 2,15 MPa de pressão, em que o T3 apresentou maior ganho que o T4, 76,84% e 72,51% respectivamente, indicando um menor ganho nessa propriedade ao aumentar-se o tempo de tratamento.

Em estudo realizado por Juizo et al. (2018), a madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico apresentou um decréscimo no f_m à medida que a temperatura e o tempo do tratamento aumentou, reduzindo em até 73,34%. No presente trabalho, entretanto, a ação da pressão compensou as perdas características dos tratamentos térmicos, melhorando essa propriedade quando comparado a testemunha.

O E_m apresentou o mesmo comportamento, os melhores resultados foram os tratamentos de menor duração quando mantida a pressão. A 1,07 MPa o T1 apresentou um aumento de 25,89% enquanto o T2 apresentou um aumento de 16,35%. Mantendo-se a pressão de 2,15 MPa o T3 apresentou um aumento de 48,05% e o T4 de 30,22%. Esses resultados confirmam o efeito negativo da maior duração do tratamento nessas propriedades, o que pode ser explicado pela maior temperatura alcançada pelas amostras.

Em estudo realizado por Fang et al. (2012), a densificação combinada com calor e vapor, provocou um aumento significativo do E_m em amostras de *Populus tremuloides* e *Populus maximowiczii* × *Populus balsamifera*. Segundo Navi e Heger (2004) a presença de vapor quente faz com que a madeira se torne mais plástica e a compressão ocorra sem formação de rachaduras.

Mantendo-se a pressão, o aumento da duração do tratamento provoca uma redução nessas propriedades. Este fato pode ser explicado pelo aumento da temperatura devido à duração do tratamento e conseqüentemente pela degradação dos polímeros da madeira, resultando em uma menor resistência mecânica. Além disso, segundo Bao et al. (2017), uma elevada taxa de compressão pode provocar uma deformação celular alta e comprometer a resistência da madeira.

Sozbir et al. (2019), compararam o efeito do tratamento térmico e da densificação nas propriedades mecânicas da madeira de *Populus usbekistanica*. Foi observado que apenas o tratamento térmico provocou uma redução nas propriedades f_m e E_M com o aumento da temperatura, enquanto a aplicação da densificação provocou um aumento nessas propriedades.

A termodensificação provocou aumento significativo do E_d nos tratamentos T1, T3 e T4. O melhor resultado para essa propriedade foi observado no tratamento T4, com um aumento de 71,94%. Resultados semelhantes foram observados por Sotomayor e Castellanos (2017) em tratamento termo-hidro-mecânico realizado com a madeira de *G. americanos*, em que a densificação aumentou a densidade e provocou um aumento de 91,8% no E_d .

Em estudo realizado por Cadermatori et al. (2015), o tratamento térmico aplicado às madeiras de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden e *Eucalyptus saligna* Sm, provocou uma

perda significativa nas propriedades mecânicas em função da temperatura. No presente trabalho a ação da compressão foi capaz de compensar o efeito negativo da temperatura, melhorando significativamente as propriedades mecânicas analisadas.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados da ANOVA fatorial das propriedades mecânicas.

Tabela 8. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades mecânicas.

Propriedade (Mpa)	Fator			
	Tempo (min)		Pressão (MPa)	
	5	10	1,07	2,15
$f_{c,90^\circ}$	6,57 ^{NS}	7,17 ^{NS}	6,07*	7,67*
$f_{c,0^\circ}$	32,71 ^{NS}	32,77 ^{NS}	28,90*	36,50*
f_H	22,26*	24,51*	19,27*	27,70*
f_m	60,27 ^{NS}	57,74 ^{NS}	51,42*	66,59*
E_m	6831,29*	6163,97*	6051,19*	6939,37*
E_d	7128,93 ^{NS}	7135,86 ^{NS}	5580,12*	8519,85*

$f_{c,90^\circ}$ = resistência à compressão perpendicular às fibras; $f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela às fibras; f_H = dureza janka superficial; f_m = módulo de ruptura em flexão estática; E_m = módulo de elasticidade em flexão estática; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada fator e propriedade; NS = valores não significativos;

As propriedades $f_{c,90^\circ}$ e $f_{c,0^\circ}$ sofreram efeito significativo apenas da pressão, sendo o T4 o que apresentou os melhores resultados para essas propriedades. A f_H sofreu influência significativa de ambos os fatores. De acordo com Fang et al. (2012) o aumento da temperatura pode causar uma degradação mais intensa da hemicelulose e lignina, e reduzir a dureza. No presente trabalho o aumento da duração do tratamento, que causou também o aumento da temperatura, não provocou efeito negativo na f_H . Isso pode ser explicado pela temperatura máxima alcançada pelos tratamentos, que talvez não tenha sido suficientemente alta para provocar a degradação dos polímeros, e pelo efeito da compressão.

No ensaio de flexão estática, a ANOVA fatorial mostrou que apenas a pressão teve efeito significativo na f_m . Apesar de não significativo, foi possível observar que nos tratamentos de menor pressão, a duração do tratamento apresentou um efeito negativo. O E_m sofreu influência significativa de ambos os fatores. Como observado na f_m , o E_m apresentou uma redução ao se aumentar a duração do tratamento quando termodensificada a 1,07 MPa.

Korkut e Hiziroglu (2009) observaram uma redução na f_m e E_m da madeira de *Corylus coluna* L. com o aumento da temperatura e duração do tratamento. A perda nas propriedades de resistência da madeira pode ser explicada pela taxa de degradação da hemicelulose. O

mesmo comportamento foi observado por Srinivas e Pandey (2012) em tratamento térmico aplicado à madeira de *Hevea brasiliensis* e *Grevillea robusta*.

Calonego et al. (2012) verificaram que apenas o tratamento térmico aplicado a madeira de *Eucalyptus grandis* reduziu em 52,3% a f_m . No presente trabalho, as amostras termodensificadas a uma pressão de 1,07 MPa apresentaram uma redução nessa propriedade quando o tratamento teve maior duração, demonstrando que pode haver efeito negativo da temperatura sobre essa propriedade. Entretanto, o aumento da duração do tratamento para as amostras termodensificadas com uma pressão de 2,15 MPa proporcionou um aumento nessa propriedade, mostrando que o efeito negativo da temperatura foi compensado pela força de compressão aplicada.

Segundo Ebenezer e Babatola (2016), o E_M de madeiras tratadas termicamente aumenta com o aumento da temperatura, mas diminui conforme a duração do tratamento aumenta. A altas temperaturas ocorre uma redução no E_M devido a alteração na composição e perda de hemicelulose, fazendo com que haja perda de rigidez e resistência mecânica.

O E_d sofreu efeito significativo apenas da pressão. Segundo Cunha e Matos (2010) o E_d depende diretamente da velocidade de propagação da onda e da densidade do material. Quanto maior a densidade do material maior é o E_d , dessa forma, no presente trabalho observou-se que o aumento da densidade provocado pela densificação foi o maior responsável pelo aumento do E_d e aumento da rigidez do material.

6.2.2 Propriedades físicas

A Tabela 9 apresenta as médias das propriedades físicas, utilizadas na caracterização da estabilidade dimensional, analisadas pelo teste de Dunnett em que cada tratamento foi comparado à testemunha.

Tabela 9. Propriedades físicas analisadas pelo teste de Dunnett.

Tratamento	Propriedade (%)					
	IE2H	ABS2H	IE24H	ABS24H	TNRE	TUE
Testemunha	1,10 (16,44)	22,21 (13,79)	2,27 (16,83)	75,42 (13,06)	-1,16 (22,05)	15,37 (2,99)
T1 (5 min – 1,07 MPa)	4,77 ^{NS} (32,67)	21,79 ^{NS} (4,90)	17,30* (43,02)	79,92 ^{NS} (15,51)	16,80* (54,23)	11,54* (1,49)
T2 (10 min – 1,07 MPa)	2,96 ^{NS} (24,56)	18,90 ^{NS} (8,60)	17,94* (64,06)	88,17 ^{NS} (39,44)	17,78* (61,97)	11,36* (4,32)
T3 (5 min – 2,15 MPa)	12,25* (28,97)	23,43 ^{NS} (24,35)	45,37* (24,54)	114,45* (23,62)	44,86* (27,46)	10,41* (5,39)
T4 (10 min – 2,15 MPa)	13,00* (52,97)	26,86 ^{NS} (40,90)	39,40* (11,63)	113,48* (11,59)	34,23* (25,86)	10,20* (3,44)

IE2H = inchamento em espessura após 2 horas de imersão; IE24H = inchamento em espessura após 24 horas de imersão; ABS2H = absorção após 2 de imersão; ABS24H = absorção após 24 de imersão; TNRE = taxa de não retorno em espessura; TUE = teor de umidade de equilíbrio; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada coluna; NS = valores não significativos; valores entre parênteses = desvio padrão.

O IE apresentou aumento significativo nas 2 horas e 24 horas de imersão, com exceção do IE2H no T1 e T2, que apresentaram aumento não significativo. De acordo com Sozbir e Bektas (2017) o inchamento pode ser reduzido através do tratamento térmico apenas com temperaturas a partir de 200°C. No caso de madeiras termodensificadas o inchamento é maior devido ao efeito *springback*, no qual ocorre a recuperação da forma decorrente da tensão de compressão interna do material, além do inchamento característico da madeira.

Foi possível observar que o aumento da severidade do tratamento acarretou no aumento do inchamento, evidenciado principalmente pelo aumento da pressão. Mantendo-se a pressão a 2,15 MPa, o aumento da duração do tratamento provocou uma pequena redução do inchamento no T4, em comparação ao T3, de 13,16%. Isso pode ser explicado pela temperatura máxima de 160°C atingida pelo T4, enquanto o T3 atingiu 127,7°C, mostrando uma redução no inchamento devido à degradação da hemicelulose e redução da higroscopicidade.

Segundo Hill (2006b), a partir de 140°C o tratamento térmico produz produtos derivados da degradação dos elementos mais instáveis da madeira, as hemiceluloses, de forma mais significativa. A partir desse momento reações de desidratação começam a ocorrer devido à perda de água de constituição, provocando a redução do teor de grupos OH, grupo responsável pela ligação de hidrogênio com a água. Entretanto, não se sabe a temperatura exata para o início da degradação desses componentes.

De acordo com Arruda et al. (2015), uma melhoria na estabilidade dimensional após a densificação pode ser alcançada quando o IE é menor que a taxa de compressão, indicando que a forma comprimida é parcialmente mantida mesmo após imersão em água.

A ABS2H apresentou redução nos tratamentos T1 e T2, e um aumento nos tratamentos T3 e T4. Entretanto, nenhum desses resultados foi estatisticamente significativo. A ABS24H apresentou aumento em todos os tratamentos, sendo que apenas para o T3 e T4 foi significativo, com um aumento na absorção de 51,75% e 50,46% respectivamente.

Em estudo realizado por Unsal et al. (2009), a madeira de *Pinus sylvestris* L densificada a 120°C apresentou menor absorção do que a tratada a 150°C, ambas durante 60 minutos. Este resultado pode indicar que é possível obter melhores resultados a temperaturas mais baixas.

Na Figura 15 observa-se o aspecto visual das amostras após 24 horas de imersão comparadas à amostras do mesmo tratamento antes da imersão.

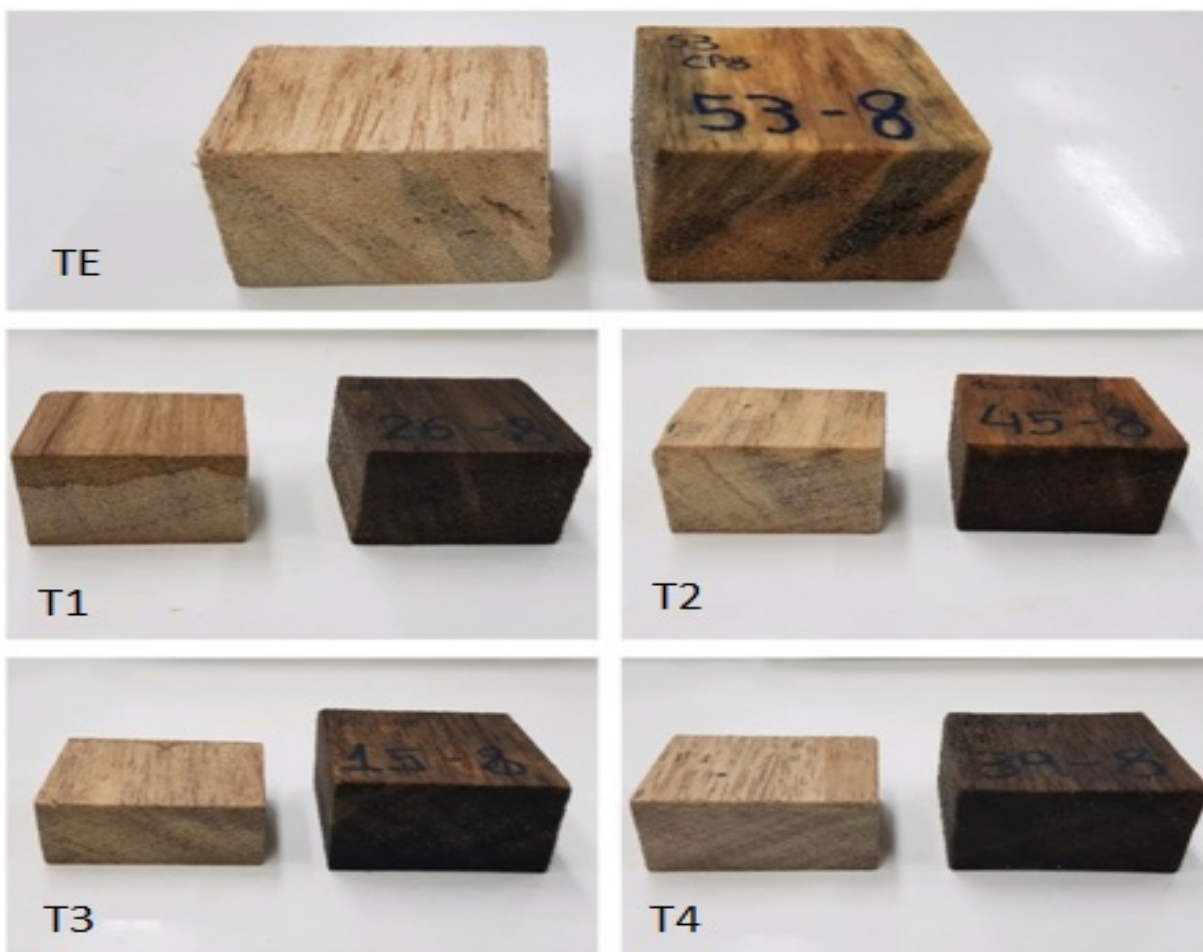


Figura 15. Amostras após 24 horas de imersão comparadas a amostras do mesmo tratamento antes da imersão. TE: testemunha; T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4.

O inchamento definitivo da madeira é expresso pela TNRE. Como observado, a TNRE apresentou comportamento semelhante ao IE24H. Houve um aumento significativo em todos os tratamentos com o aumento da severidade do tratamento e uma pequena redução do T4 em comparação ao T3 de 23,70%, confirmando o efeito da maior temperatura alcançada pelo tratamento T4.

O TUE apresentou redução significativa em todos os tratamentos. Observou-se que quanto mais severo o tratamento, maior foi a redução dessa propriedade, sendo o tratamento T4 o de maior redução (33,64%). O mesmo resultado foi encontrado por Menezes et al. (2014) ao aplicarem o tratamento térmico em amostras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*. As amostras foram submetidas a tratamentos com três temperaturas diferentes (140°C, 160°C e 180°C) e observou-se uma redução maior no tratamento de maior temperatura, confirmando o efeito do tratamento na higroscopicidade da madeira.

Em estudo realizado por Santos et al. (2014) o tratamento térmico realizado na madeira de Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis*) e cedro-marinheiro (*Guarea trichilioides*) o TUE reduziu linearmente à medida que a temperatura do tratamento aumentava. Segundo os autores, o aumento da temperatura provocou uma maior degradação dos carboidratos hidrofílicos contribuindo na redução do TUE. Entretanto, a redução no TUE varia de acordo com a estrutura da parede celular de cada espécie, devido ao grau de cristalização da celulose após o tratamento e da temperatura necessária para degradação dos polímeros em cada espécie.

A termodensificação não foi capaz de melhorar a estabilidade dimensional, resultado encontrado também por Santos et al. (2012). Segundo os autores, isso pode ser explicado pelas condições do tratamento, que não foram severas o suficiente para melhorar a estabilidade dimensional, e pela ausência de um pós-tratamento.

A Tabela 10 apresenta os resultados da ANOVA fatorial das propriedades físicas, na qual foi observado o efeito dos fatores tempo e pressão sobre essas propriedades.

Tabela 10. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre as propriedades físicas.

Propriedade	Fator			
	Tempo (min)		Pressão (MPa)	
	5	10	1,07	2,15
IE2H	8,51 ^{NS}	7,98 ^{NS}	3,87*	12,62*
ABS2H	22,73 ^{NS}	22,88 ^{NS}	20,13 ^{NS}	25,15 ^{NS}
IE24H	31,33 ^{NS}	27,95 ^{NS}	17,62*	42,59*
ABS24H	97,19 ^{NS}	99,98 ^{NS}	84,04*	114,00*
TNRE	30,83 ^{NS}	26,00 ^{NS}	17,29*	39,54*
TUE	10,97 ^{NS}	10,78 ^{NS}	11,45*	10,31*

IE2H = inchamento em espessura após 2 horas de imersão; IE24H = inchamento em espessura após 24 horas de imersão; ABS2H = absorção após 2 horas de imersão; ABS24H = absorção após 24 horas de imersão; TNRE = taxa de não retorno em espessura; TUE = teor de umidade de equilíbrio; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada fator e propriedade; NS = valores não significativos.

A ANOVA fatorial mostrou que apenas a pressão teve influência nas propriedades físicas da madeira de sumaúma termodensificada, com exceção da ABS2H, que não sofreu efeito significativo de nenhum dos fatores. Como esperado, o aumento da pressão provocou um aumento na instabilidade dimensional, provocado pelo aumento das tensões internas de compressão, liberadas quando as amostras entraram em contato com a água.

O aumento da higroscopicidade ocorre principalmente pela degradação da hemicelulose, componente mais hidrofílico da madeira e o principal responsável pela adsorção de água. No presente trabalho os tratamentos não atingiram a temperatura necessária para provocar a degradação necessária da hemicelulose e compensar o efeito negativo que as tensões internas de compressão provocam na madeira termodensificada.

6.2.3 Propriedades superficiais

6.2.3.1 Colorimetria

A Tabela 11 apresenta as médias dos parâmetros colorimétricos analisados pelo teste de Dunnett, em que cada tratamento foi comparado à testemunha.

Tabela 11. Médias dos parâmetros colorimétricos analisados pelo teste de Dunnett.

Tratamento	Parâmetros colorimétricos				
	L*	a*	b*	C	h°
Testemunha	62,53 (8,86)	4,49 (34,83)	17,24 (7,08)	17,78 (7,50)	76,18 (5,02)
T1 (5 min – 1,07 MPa)	54,60* (7,75)	6,99* (22,54)	22,01* (12,40)	23,11* (12,95)	72,27* (3,08)
T2 (10 min – 1,07 MPa)	55,82* (8,46)	8,67* (15,28)	24,41* (8,09)	25,93* (8,31)	70,45* (3,08)
T3 (5 min – 2,15 MPa)	56,05* (8,42)	6,77* (16,83)	22,30* (9,99)	23,36* (10,29)	73,20* (2,50)
T4 (10min – 2,15 MPa)	55,59* (4,28)	7,13* (28,33)	22,27* (13,77)	23,41* (14,91)	72,60* (4,00)

L* = claridade; a* = coordenada cromática vermelho-verde; b* = coordenada cromática azul-amarelo; C = saturação; h = tonalidade; *valores significativos ao nível de 5% de significância; valores entre parênteses = desvio padrão.

De acordo com a tabela de classificação proposta por Camargos e Gonzalez (2001), a madeira de sumaúma não tratada (testemunha) é classificada como cinza-rosado. A Figura 16 apresenta a imagem das leituras obtidas na análise colorimétrica das amostras testemunha.

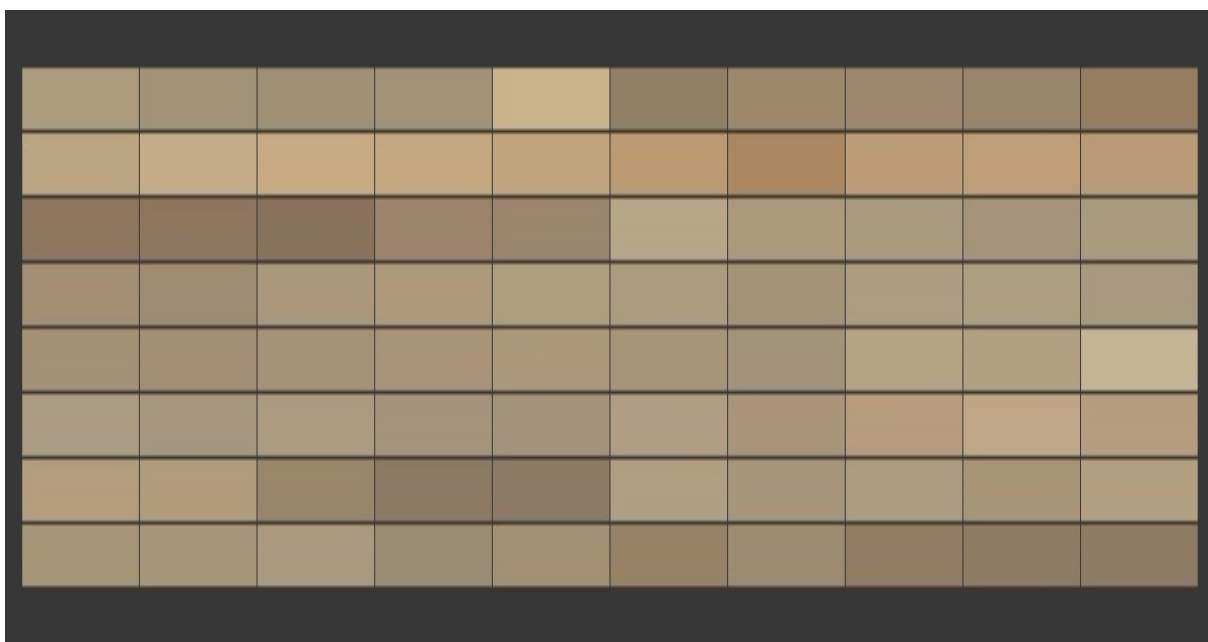


Figura 16. Análise colorimétrica da testemunha da madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.

A termodensificação provocou o escurecimento da madeira de sumaúma, evidenciado pela diminuição dos valores de L*, que caracteriza a luminosidade do material, resultado encontrado também por Santos et al. (2014) e Pertuzzatti et al. (2015). Os tratamentos que apresentaram os menores valores de L* foram os T1 e T4, com uma redução de 12,68% e 11,10% respectivamente. De acordo com Matsuo et al. (2011) a ação do calor na madeira, em

condições secas, provoca a oxidação dos polímeros, enquanto em condições úmidas a reação que ocorre em maior proporção é a hidrólise.

A coordenada a^* , responsável pela coloração que vai do verde ($-a^*$) ao vermelho ($+a^*$), apresentou um aumento significativo em todos os tratamentos, com um aumento de 50,78% (T3) a 93,10% (T2). Foi possível observar que o aumento na severidade do tratamento provocou um aumento nos valores dessa coordenada, indicando que a cor da madeira foi se aproximando mais da cor vermelha.

A coordenada b^* apresentou o comportamento semelhante à coordenada a^* . Todos os tratamentos foram significativos, com um aumento de 27,67% (T1) a 41,59% (T2). Essa coordenada é responsável pela coloração que vai do azul ($-b^*$) ao amarelo ($+b^*$). Os resultados indicaram que a madeira de sumaúma tratada se aproximou mais da coloração amarela. Segundo Lopes et al. (2014) o aumento da temperatura no tratamento térmico aplicado à madeira de teca tende a diminuir os valores de b^* , reduzindo a tonalidade amarela, resultados contrários aos obtidos no presente trabalho. Dessa forma, a ação da temperatura na coloração da madeira depende da estrutura e composição química da espécie.

O aumento nas coordenadas a^* e b^* foi maior quando comparado à redução da luminosidade L^* , indicando que o escurecimento da madeira foi mais influenciado pela mudança de tonalidade do que pela redução de luminosidade. Em estudo realizado por Srinivas e Pandey (2012), o tratamento térmico aplicado à madeira de *Hevea brasiliensis* e *Grevillea robusta* reduziu a luminosidade de forma uniforme conforme foi aumentada a severidade do tratamento. Segundo os autores, as coordenadas a^* e b^* apresentaram um aumento no início do tratamento, assim como no presente trabalho. Entretanto, o aumento da duração e temperatura provocou uma posterior redução desses parâmetros.

Em estudo realizado por Matsuo et al. (2011), assim como no presente trabalho, a madeira de *Chamaecyparis obtusa* Endl. apresentou um decréscimo do parâmetro L^* e aumento dos valores das coordenadas a^* e b^* após tratamento térmico. De acordo com os autores, essas mudanças são provocadas principalmente pela oxidação térmica, que causa um escurecimento da madeira.

A cromaticidade ou saturação (C) sofreu aumento significativo em todos os tratamentos, sendo o menor aumento no T1 (29,98%) e o maior aumento no T2 (45,84%). Segundo Cademartori et al. (2013) a cromaticidade indica a pureza em relação ao branco, sendo que quanto maior o valor desse parâmetro, mais próxima a cor da madeira está do amarelo. De acordo com os autores, essas modificações ocorrem devido à oxidação térmica.

A saturação C está diretamente relacionada às coordenadas a* e b*, ou seja, a matriz amarelo (b*) tem maior influência na saturação, pois apresenta valores maiores que a coordenada a*.

O ângulo de tinta (h°) apresentou reduções significativas em todos os tratamentos, sendo a maior redução no T2 (7,52%). De acordo com Cademartori et al. (2013) a redução desse parâmetro indica que o ângulo da matriz se aproximou das cores amarelo e vermelho, explicando o escurecimento da madeira.

A Tabela 12 apresenta a ANOVA fatorial dos parâmetros colorimétricos.

Tabela 12. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre os parâmetros colorimétricos.

Parâmetros colorimétricos	Fator			
	Tempo (min)		Pressão (MPa)	
	5	10	1,07	2,15
L*	55,34 ^{NS}	55,71 ^{NS}	55,23 ^{NS}	55,83 ^{NS}
a*	6,88*	7,90*	7,83*	6,95*
b*	22,16*	23,33*	23,20*	22,29*
C	23,23*	24,66*	24,51*	23,38*
h°	72,74*	71,53*	71,33*	72,90*

L* = claridade; a* = coordenada cromática vermelho-verde; b* = coordenada cromática azul-amarelo; C = saturação; h° = tonalidade. *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada fator e propriedade; NS = valores não significativos.

A ANOVA fatorial indicou que a luminosidade (L*) não sofreu influência significativa de nenhum dos fatores. Todos os demais parâmetros sofreram influência tanto do tempo como da pressão utilizados na densificação.

Segundo Diouf et al. (2011), o principal fator responsável pelo escurecimento da madeira é a degradação térmica. O aumento da temperatura provoca um aumento na intensidade do escurecimento, pois provoca reações de hidrólise da hemicelulose e aumenta o teor de lignina. Para Lopes et al. (2014), quanto maior a temperatura do tratamento maior é a formação do pigmento vermelho, muitas vezes associado ao teor de extrativos, após o tratamento.

A Tabela 13 apresenta a variação dos parâmetros colorimétricos e a variação total de cor (ΔE^*), em que o sinal negativo indica que houve redução e o sinal positivo indica aumento do parâmetro.

Tabela 13. Variação dos parâmetros colorimétricos dos tratamentos em relação aos da testemunha.

Parâmetros colorimétricos	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC	Δh°	ΔE^*
T1 (5 min – 1,07 MPa)	-7,93	2,50	4,76	5,33	-3,91	9,58
T2 (10 min – 1,07 MPa)	-6,70	4,18	7,17	8,15	-5,73	10,66
T3 (5 min – 2,15 MPa)	-6,48	2,28	5,06	5,57	-2,98	8,53
T4 (10 min – 2,15 MPa)	-6,93	2,64	5,02	5,62	-3,57	8,96

A variação dos parâmetros colorimétricos apresentou valores próximos, exceto para o T2, no qual a variação dos parâmetros a^* , b^* , C e h° foi maior. Em estudo realizado por Zanuncio et al. (2014), observou-se que a degradação dos extrativos e das hemiceluloses ocorreu mais lentamente a temperaturas baixas (140, 170 e 200°C) em tratamento térmico aplicado à madeira de *Eucalyptus grandis*, causando diferenças significativas entre os tratamentos. A 230°C as reações ocorrem de forma mais rápida e os tratamentos de diferentes durações se apresentam muito semelhantes.

De acordo com a tabela de classificação proposta por Camargos e Gonzalez (2001), as amostras dos tratamentos T1, T2, T3 e T4 são classificadas como oliva-amarelado, mostrando a eficiência do tratamento na alteração da cor da madeira de sumaúma. A Figura 17 apresenta o aspecto das amostras após o tratamento.



Figura 17. Aspecto das amostras termodensificadas comparadas à testemunha. TE: testemunha; T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4.

6.2.3.2 Rugosidade

A Tabela 14 a seguir apresenta as médias dos parâmetros de rugosidade analisados pelo teste de Dunnett, em que cada tratamento foi comparado à testemunha.

Tabela 14. Médias dos parâmetros de rugosidade analisadas pelo teste de Dunnett.

Tratamento	Parâmetro de rugosidade		
	Ra	Rz	Rq
Testemunha	13,16 (21,13)	70,23 (17,65)	16,59 (20,47)
T1 (5 min – 1,07 MPa)	9,58* (33,59)	54,54* (31,95)	12,37* (33,52)
T2 (10 min – 1,07 MPa)	8,18* (32,80)	47,36* (34,18)	10,64* (33,56)
T3 (5 min – 2,15 MPa)	6,90* (31,88)	38,35* (25,97)	8,96* (32,10)
T4 (10 min – 2,15 MPa)	6,28* (38,28)	35,50* (32,86)	8,10* (37,96)

Ra = rugosidade média; Rz = rugosidade de profundidade média; Rq = rugosidade média quadrática.
*valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada coluna; valores entre parênteses = desvio padrão.

Verificou-se que a termodensificação provocou redução significativa dos parâmetros de rugosidade nos quatro tratamentos. O tratamento de menor redução na rugosidade média (Ra) foi o T1, com uma redução de 27,20%, e o de maior redução foi o T4, com uma redução de 52,28%. O aumento da severidade do tratamento provocou a redução nos valores dos parâmetros de rugosidade, tornando a superfície da madeira de sumaúma menos áspera e irregular.

Os parâmetros Rz e Rq apresentaram o mesmo comportamento, confirmando os resultados da rugosidade média. Para o Rz o tratamento de menor redução foi o T1 (22,34%) e o de maior redução foi o T4 (49,45%). O tratamento de menor redução no parâmetro Rq foi o T1, com uma redução de 25,44% e o de maior redução o T4, com uma redução de 51,18%.

A Figura 18 mostra os perfis Ra de rugosidade das superfícies da madeira de sumaúma não tratada (testemunha) e termodensificadas (T1, T2, T3 e T4).

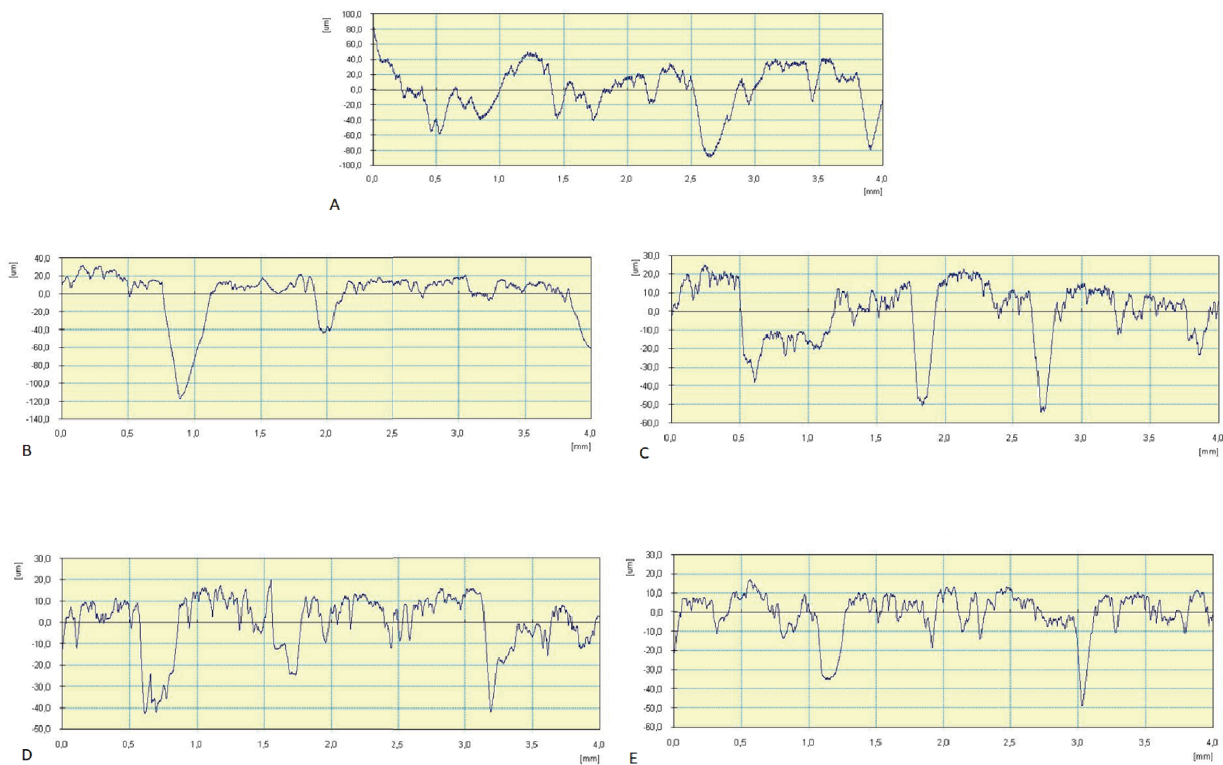


Figura 18. A: testemunha; B: tratamento 1; C: tratamento 2; D tratamento 3; E: tratamento 4.

Observou-se que o aumento da severidade do tratamento provocou uma redução na distância entre os picos e vales, indicando que houve um aumento na uniformidade da superfície da madeira.

A causa da rugosidade da madeira pode ser devido à usinagem ou à estrutura anatômica, que depende principalmente do número de vasos e porção de lenho juvenil e lenho tardio (CSANÁDY; MAGOSS, 2013). Em estudo realizado por Santos et al. (2012) observou-se que a termodensificação aplicada a madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* provocou uma inativação da superfície da madeira, tornando-a mais lisa após a densificação.

Na Tabela 15 é apresentada a ANOVA fatorial dos parâmetros de rugosidade da madeira de sumaúma termodensificada.

Tabela 15. ANOVA fatorial do efeito dos fatores tempo e pressão sobre os parâmetros de rugosidade.

Parâmetro de rugosidade	Fator			
	Tempo (min)		Pressão (MPa)	
	5	10	1,07	2,15
Ra	8,27*	7,23*	8,89*	6,59*
Rz	46,80*	41,49*	50,95*	36,88*
Rq	10,70*	9,37*	11,52*	8,53*

Ra = rugosidade média; Rz = rugosidade de profundidade média; Rq = rugosidade média quadrática.
*valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada fator e parâmetro de rugosidade.

A ANOVA fatorial mostrou que ambos os fatores tempo e pressão influenciaram a redução da rugosidade. Isso indica que a ação do tempo juntamente com a compressão foi capaz de reduzir significativamente os picos e vales presentes na superfície, tornando-a mais lisa.

Em estudo realizado por Bekhta et al. (2014) observou-se que a redução dos parâmetros de rugosidade em a termodensificações está relacionado à temperatura e à pressão utilizada. No presente trabalho, observou-se que o aumento da duração do tratamento está relacionado ao aumento da temperatura de cada tratamento, corroborando com esses resultados.

Segundo os mesmos autores, uma mudança mínima da rugosidade já pode ser observada a altas temperaturas (200°C). Isso indica que a pressão utilizada na densificação tem maior influência nas alterações anatômicas internas (aumento da densidade), enquanto a temperatura apresenta maior efeito na rugosidade.

De acordo com Dias et al. (2015), menores valores de rugosidade expressam uma superfície que apresenta melhor aceitação de produtos impermeabilizantes como tintas, colas e vernizes. Nesse sentido, os parâmetros da termodensificação podem ser combinados de diversas formas de acordo com o uso final, para que se chegue a uma superfície mais lisa e um material com as propriedades desejadas.

6.3 Escolha dos parâmetros (tempo e pressão) da termodensificação

A Tabela 16 apresenta um resumo dos resultados obtidos na ANOVA fatorial para as propriedades mecânicas, físicas e superficiais após a densificação, a fim determinar os melhores parâmetros as serem utilizados, conforme proposto por Del Menezzi (2004).

Tabela 16. Resumo do efeito do tempo e da pressão sobre as propriedades mecânicas, físicas e superficiais.

Propriedade	Tempo (min)			Pressão (MPa)			
	Tendência	5	10	Tendência	1,07	2,15	
Mecânicas	$f_{c,90^\circ}$	↔	a	a	↑	a	b
	$f_{c,0^\circ}$	↔	a	a	↑	a	b
	f_H	↑	a	b	↑	a	b
	f_m	↔	a	a	↑	a	b
	E_m	↑	a	b	↑	a	b
	E_d	↔	a	a	↑	a	b
Físicas	IE2H	↔	a	a	↑	a	b
	ABS2H	↔	a	a	↔	a	a
	IE24H	↔	a	a	↑	a	b
	ABS24H	↔	a	a	↑	a	b
	TNRE	↔	a	a	↑	a	b
	TUE	↔	a	a	↓	a	b
Superficiais	L^*	↔	a	a	↔	a	a
	a^*	↑	a	b	↓	a	b
	b^*	↑	a	b	↓	a	b
	C	↑	a	b	↓	a	b
	h°	↓	a	b	↑	a	b
	Ra	↓	a	b	↓	a	b
	Rz	↓	a	b	↓	a	b
	Rq	↓	a	b	↓	a	b

NOTA: tendência de acréscimo (↑), decréscimo (↓), ou sem tendência (↔) na propriedade quando aumentado o tempo ou pressão de tratamento. Letras iguais dentro de cada fator e propriedade indicam ausência de diferença significativa.

Observou-se que para as propriedades $f_{c,90^\circ}$, $f_{c,0^\circ}$, f_m e E_d os melhores resultados foram obtidos quando utilizado o tratamento de maior pressão (2,15 MPa) e menor tempo (5 min), visto que foi possível obter os mesmos ganhos nessas propriedades com uma duração menor da termodensificação, sendo o melhor tratamento para essas propriedades o T3. As propriedades f_H e E_m apresentaram os melhores resultados nos tratamentos de maior duração e

maior pressão, indicando que o T4 (10 min – 2,15 MPa) foi o melhor tratamento para a melhoria dessas propriedades.

As propriedades físicas não apresentaram tendência ao se aumentar a duração do tratamento de cinco para 10 minutos. Entretanto, o aumento da pressão provocou efeito negativo nessas propriedades, evidenciada pela tendência de acréscimo, que representa uma piora na estabilidade dimensional, exceto para o TUE, que apresentou tendência de decréscimo.

Quanto à análise colorimétrica, o parâmetro L^* (luminosidade) não apresentou tendência, tanto para o aumento da duração quanto para o aumento da pressão utilizada. Os parâmetros a^* , b^* e C apresentaram tendência de acréscimo ao se aumentar a duração do tratamento, e tendência de decréscimo ao se aumentar a pressão do tratamento, indicando que a duração tem maior efeito na mudança de tonalidade da madeira de sumaúma. O parâmetro C apresentou tendência de acréscimo ao se aumentar a duração do tratamento e de decréscimo ao de aumentar a pressão, comportamento oposto ao observado para o ângulo de tinta (h°).

Os parâmetros de rugosidade apresentaram tendência de decréscimo para ambos os fatores tempo e pressão, indicando que para se obter uma superfície mais lisa, deve ser aplicado o T4 (10 min – 2,15 MPa).

Dessa forma, a escolha do melhor tratamento deve levar em consideração o uso final do produto. Para finalidades em que a resistência mecânica é fundamental e não haja contato com umidade, o melhor tratamento é o T4 (10 min – 2,15 MPa).

6.4 Efeito do pós-tratamento térmico sobre as propriedades das amostras termodensificadas

6.4.1 Temperatura interna das amostras

A Figura 19 apresenta a temperatura interna das amostras durante o pós-tratamento térmico. O gráfico apresenta o valor médio das quatro repetições de cada tratamento que foram submetidas ao pós-tratamento. A temperatura máxima atingida pelas amostras após 25 minutos de tratamento foi de 130,4°C (T1), 131,3°C (T2), 165,5°C (T3) e 175,3°C (T4).

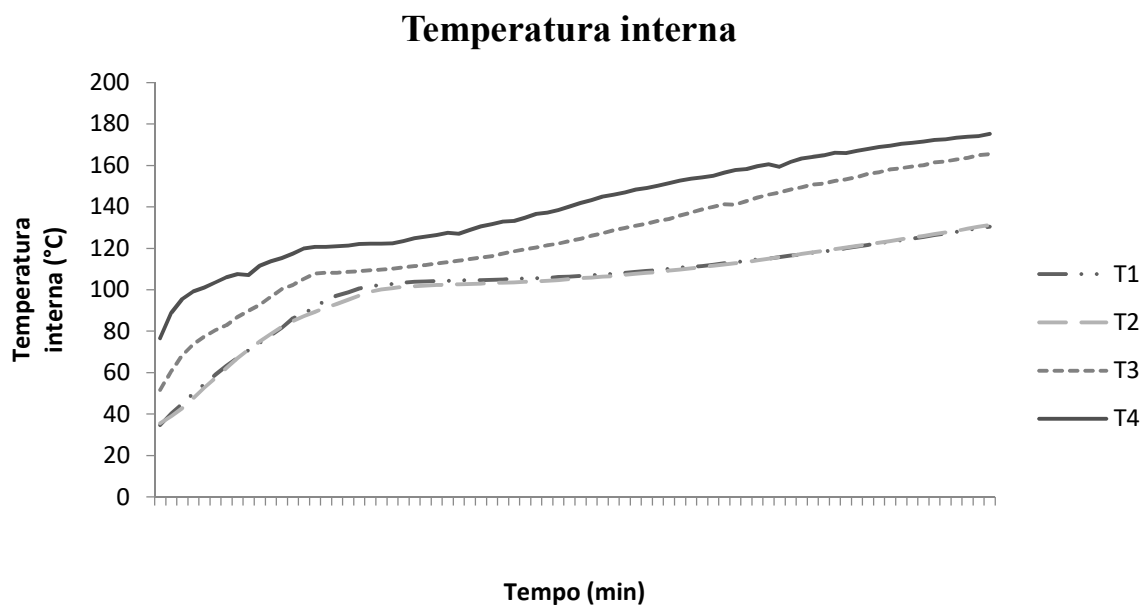


Figura 19. Temperatura interna das amostras durante o pós-tratamento térmico.

Observa-se que a temperatura interna máxima de cada tratamento aumentou em relação à análise da temperatura interna durante a termodensificação, presente na Figura 8, indicando que a amostra termodensificada atinge maiores temperaturas devido à redução dos espaços vazios provocada pela termodensificação, aumentando a condutividade térmica.

6.4.2 Propriedades mecânicas

A Tabela 17 apresenta os valores médios da ANOVA que compara as propriedades antes e depois do pós-tratamento térmico.

Tabela 17. ANOVA das propriedades mecânicas antes e depois do pós-tratamento térmico.

Propriedades mecânicas (MPa)		Tratamento			
		T1	T2	T3	T4
$f_{c,90^\circ}$	Antes PT	6,03	6,12	7,12	8,21
	Depois PT	7,94*	6,78 ^{NS}	9,28*	11,93*
$f_{c,0^\circ}$	Antes PT	28,62	29,19	36,81	36,19
	Depois PT	30,20*	32,25*	43,25*	44,77*
f_H	Antes PT	18,73	19,81	25,79	29,88
	Depois PT	22,90*	22,76*	33,60*	33,47*
f_m	Antes PT	53,13	49,71	67,41	65,76
	Depois PT	48,17*	56,41*	68,57 ^{NS}	75,44*
E_m	Antes PT	6278,67	5803,02	7383,92	6494,83
	Depois PT	4674,48*	5265,04 ^{NS}	5622,11*	5923,74*
E_d	Antes PT	5880,58	5252,36	8377,29	8862,41
	Depois PT	6543,70*	6732,22*	9468,84*	10429,22*

$f_{c,90^\circ}$ = resistência à compressão perpendicular às fibras; $f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela às fibras; f_H = dureza janka superficial; f_m = módulo de ruptura em flexão estática; E_M = módulo de elasticidade em flexão estática; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; *valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada tratamento e propriedade; NS = valores não significativos.

O pós-tratamento térmico aplicado à madeira de sumaúma apresentou melhoria significativa em todas as propriedades mecânicas, exceto no E_m . Isso indica que o tratamento térmico quando aplicado após a densificação não causou o efeito negativo nas propriedades mecânicas característico da temperatura. Nesse caso, as propriedades mecânicas melhoradas pela densificação foram potencializadas após o pós-tratamento.

A $f_{c,90^\circ}$ apresentou melhora em todos os tratamentos exceto no T2 (10 min – 1,07 MPa), com ganho não significativo de apenas 10,78%. O maior ganho foi no tratamento T4, que teve um aumento de 45,31% em relação à amostra termodensificada. O menor ganho foi o T3, com um aumento de 30,34%.

A $f_{c,0^\circ}$ apresentou melhora significativa em todos os tratamentos. Nesse caso, o ganho foi crescente do T1 ao T4, sendo o de menor ganho (5,52%) o T1 e o de maior ganho (23,71%) o T4.

A f_H após a termodensificação, sem o pós-tratamento, apresentou um ganho linear com o aumento da severidade do tratamento, sendo o tratamento T1 o de menor ganho e o T4 o de

maior ganho. Após o pós-tratamento todos tratamentos apresentaram aumento estatisticamente significativo, sendo que os tratamentos de menor duração, quando mantida a mesma pressão, apresentaram melhores resultados. Os maiores ganhos foram os tratamentos T1, com um aumento de 22,26% e o T3, com um aumento de 30,28%. Em estudo realizado por Esteves et al. (2017), observou-se que a madeira densificada *Pinus pinaster* Ait, após receber pós-tratamento, a 190°C, apresentou um aumento de até 220% na dureza em duas e quatro horas de tratamento, reduzindo posteriormente.

O f_m apresentou comportamento diferente. O tratamento de menor duração de densificação (T1) teve uma redução significativa de 9,34% nessa propriedade após o pós-tratamento térmico, confirmando o efeito negativo da temperatura sobre a resistência da madeira termodensificada. O aumento nessa propriedade não foi linear em relação à severidade da densificação, o T2 e T4 apresentaram um ganho significativo de 13,48% e 14,72%, respectivamente, enquanto o T3 sofreu um ganho de apenas 1,72%.

No ensaio de flexão estática o E_m apresentou redução significativa em todos os tratamentos exceto no T2. Observou-se que as maiores perdas nessa propriedade, T1 (25,55%) e T3 (23,86%) corresponderam aos maiores ganhos na f_H . Segundo Mendez e Moya (2018) as propriedades mecânicas são reduzidas devido às modificações químicas decorrentes da degradação térmica, variando de acordo com a temperatura utilizada.

O E_d teve aumento significativo em todos os tratamentos, sendo o T2 o de maior ganho (28,18%).

6.4.3 Propriedades físicas

A Tabela 18 apresenta a ANOVA das propriedades físicas comparadas antes e depois do pós-tratamento.

Tabela 18. ANOVA das propriedades físicas antes e depois do pós-tratamento térmico.

Propriedade (%)		Tratamento			
		T1	T2	T3	T4
IE2H	Antes PT	4,77	2,96	12,25	13
	Depois PT	3,67 ^{NS}	4,10*	7,74*	5,76*
ABS2H	Antes PT	21,79	18,9	23,43	26,86
	Depois PT	19,04 ^{NS}	28,57*	21,58 ^{NS}	20,85 ^{NS}
IE24H	Antes PT	17,3	17,94	45,37	39,4
	Depois PT	19,06 ^{NS}	18,68 ^{NS}	48,98 ^{NS}	42,73 ^{NS}
ABS24H	Antes PT	79,92	88,17	114,45	113,48
	Depois PT	81,76 ^{NS}	94,76 ^{NS}	132,49 ^{NS}	108,65 ^{NS}
TNRE	Antes PT	16,8	17,78	44,86	34,23
	Depois PT	19,83 ^{NS}	17,81 ^{NS}	48,54 ^{NS}	35,24 ^{NS}
TUE	Antes PT	11,54	11,36	10,41	10,2
	Depois PT	8,93*	8,90*	8,77*	8,14*

IE2H = inchamento em espessura após 2 horas de imersão; IE24H = inchamento em espessura após 24 horas de imersão; ABS2H = absorção após 2 de imersão; ABS24H = absorção após 24 de imersão; TNRE = taxa de não retorno em espessura; TUE = teor de umidade de equilíbrio; S/ PT = sem pós tratamento; C/ PT = com pós-tratamento*valores significativos ao nível de 5% de significância dentro de cada tratamento; NS = valores não significativos.

O IE2H apresentou reduções significativas nos tratamentos T3 e T4, com uma melhora de 36,82% e 55,69%, respectivamente. O tratamento T1 apresentou redução não significativa e o T2 apresentou um aumento significativo de 38,51%. Observou-se que os tratamentos densificados à pressão mais alta (2,15 MPa) sofreram melhora após o pós-tratamento, indicando que a temperatura teve efeito positivo na estabilização da madeira submetida ao menor período de imersão (2 horas). A ABS2H apresentou um aumento significativo de 51,16% no T2, os demais tratamentos apresentaram reduções não significativas dessa propriedade.

O IE24H apresentou aumento não significativo em todos os tratamentos após o pós-tratamento, indicando que o tratamento térmico não foi eficiente na eliminação das tensões internas geradas pela compressão. A ABS24H apresentou o mesmo comportamento, exceto pelo T4 que apresentou redução, também não significativa.

Em estudo realizado por Laine et al. (2016), a madeira de pinho escocês densificada a uma taxa de 40 e 50% teve sua memória de forma quase eliminada completamente após

receber seis horas de pós-tratamento a 200°C com injeção de vapor. A análise SEM mostrou que as células densificadas mantiveram sua forma após imersas em água por 24 horas e secas, enquanto as células das amostras densificadas que não receberam o pós tratamento recuperaram quase completamente sua forma inicial. Os resultados do presente trabalho indicam que para que as tensões internas sejam liberadas são necessários tratamentos de maior duração e maior temperatura.

Segundo Navi e Heger (2004) a recuperação de forma da madeira densificada ocorre porque não há uma deformação plástica nas regiões cristalinas das microfibrilas. Para que não haja a recuperação, a interconexão do sistema celulose-hemicelulose-lignina deve ser quebrada para que as microfibrilas deformem de forma independente da lignina e as tensões internas sejam liberadas. Os mesmos autores relatam que a forma comprimida pode ser mantida aplicando-se pós-tratamentos a 165°C durante 30 minutos, 190°C durante oito minutos e 200°C durante dois minutos, em que há uma diminuição do tempo com o aumento da temperatura.

A TNRE apresentou aumento não significativo em todos os tratamentos, quando comparados às amostras que não receberam o pós-tratamento. Esse resultado indica que o inchamento definitivo na madeira foi maior, embora não significativo, resultando em um aumento da instabilidade da madeira.

O TUE teve redução significativa em todos os tratamentos. Observou-se que quanto maior o TUE da amostra que não recebeu o pós-tratamento, maior a redução dessa propriedade após o pós-tratamento. Os resultados indicaram que o pós-tratamento térmico provocou uma redução significativa da higroscopicidade da madeira termodensificada, potencializando o efeito já observado anteriormente. Borges e Quirino (2004) explicam que a higroscopicidade da madeira pode ser alterada através do tratamento térmico pela degradação dos constituintes hidrofílicos, alterando a afinidade da madeira pela água. Com isso, a madeira troca menores quantidades de água com o meio, tornando-se mais estável.

De acordo com Li et al. (2012) a tensão residual gerada pela compressão é composta pela tensão residual induzida fisicamente, que está presente naturalmente na madeira, e pela tensão residual induzida mecanicamente, decorrente da densificação. Segundo os autores, a tensão residual total está diretamente ligada à taxa de compressão da madeira densificada.

No presente trabalho observou-se uma recuperação completa da forma, indicando que houve apenas deformações elásticas e essa tensão foi liberada quando a amostra entrou em contato com a água.

Em estudo realizado por Popescu et al. (2014), verificou-se que a recuperação de forma foi quase completa para amostras densificadas sem pós-tratamento, e para as amostras que receberam o pós-tratamento à baixas temperaturas e menores duração de tratamento. Segundo os autores, a fixação permanente da forma comprimida da madeira pode ser alcançada em tratamentos a 160°C por 80 minutos, e a 180°C por 10, 15 e 20 minutos.

6.4.4 Propriedades superficiais

6.4.4.1 Colorimetria

A Tabela 19 apresenta as médias das amostras termodensificadas, analisadas anteriormente, comparadas às médias das amostras que receberam o pós-tratamento pela ANOVA fator único.

Tabela 19. ANOVA dos parâmetros colorimétricos antes e depois do pós-tratamento térmico.

Parâmetros colorimétricos		Tratamento			
		T1	T2	T3	T4
L*	Antes PT	54,6	55,82	56,05	55,59
	Depois PT	53,04*	52,90*	52,04*	50,91*
a*	Antes PT	6,99	8,67	6,77	7,13
	Depois PT	9,16*	7,79*	9,35*	9,02*
b*	Antes PT	22,01	24,41	22,3	22,27
	Depois PT	24,34*	22,90*	24,34*	23,27*
C	Antes PT	23,11	25,93	23,36	23,41
	Depois PT	26,00*	24,20*	26,08*	24,97*
h°	Antes PT	72,27	70,45	73,2	72,6
	Depois PT	69,46*	71,34*	68,97*	68,84*

Parâmetros colorimétricos: L* = claridade; a* = coordenada cromática vermelho-verde; b* = coordenada cromática azul-amarelo; C = saturação; h = tonalidade. *valores significativos ao nível de 5% de significância.

Observou-se que o pós-tratamento provocou efeito estatisticamente significativo em todos os tratamentos. O parâmetro L* apresentou redução de forma linear, sendo que o tratamento de menor redução foi o T1 (2,86%) e o de maior redução foi o T4 (8,42%), indicando que o efeito já observado nas amostras termodensificadas foi intensificado, tornando a madeira de sumaúma mais escura.

A coordenada a* apresentou redução apenas no T2 (10,15%), fazendo com que a tonalidade vermelha diminuísse. Os demais tratamentos apresentaram aumento nos valores dessa coordenada, indicando que a madeira se aproximou mais da cor vermelha. O maior aumento foi observado no T3 (38,11%) e o menor aumento foi no T4 (26,51%).

A coordenada b^* apresentou o mesmo comportamento. O T2 teve uma redução de 6,19%, aproximando a madeira da matriz azul, enquanto os tratamentos T1, T3 e T4 apresentaram aumento de 10,59%, 9,15% e 4,49% respectivamente. O aumento nesses tratamentos indicou uma proximidade maior à matriz amarelo.

A saturação C, assim como as coordenadas a^* e b^* , apresentou redução no T2 (6,67%) e aumento nos tratamentos T1 (12,51%), T3 (11,64%) e T4 (6,66%).

O ângulo de tinta h° teve comportamento contrário. O T2 apresentou um aumento de 1,26% e os tratamentos T1, T3 e T4 apresentaram reduções de 3,89%, 5,78% e 5,18% respectivamente. Em estudo realizado por Borges e Quirino (2004) a madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratada termicamente tornou-se mais escura à medida que a temperatura era elevada.

A Figura 20 apresenta as amostras termodensificadas após o pós-tratamento térmico comparadas às amostras sem o pós-tratamento térmico.



Figura 20. Amostras termodensificadas comparadas às amostras termodensificadas que receberam o pós-tratamento térmico. T1: tratamento 1; T2: tratamento 2; T3: tratamento 3; T4: tratamento 4; T1 PT: tratamento 1 após o pós-tratamento térmico; T2 PT: tratamento 2 após o pós-tratamento térmico; T3 PT: tratamento 3 após o pós-tratamento térmico; T4 PT: tratamento 4 após o pós-tratamento térmico.

Segundo a tabela de cores proposta por Camargos e González (2001) os tratamentos T1, T3 e T4 foram classificados como marrom-oliva e o tratamento T2 foi classificado como oliva-amarelado. Dessa forma, através do controle dos parâmetros de densificação e do pós-tratamento, é possível chegar a diferentes tonalidades de acordo com o produto final desejado.

A Tabela 20 apresenta o resultado da variação dos parâmetros colorimétricos e da variação total de cor.

Tabela 20. Variação dos parâmetros colorimétricos entre os tratamentos das amostras termodensificadas e os tratamentos das amostras que receberam pós-tratamento térmico.

Parâmetros colorimétricos	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC	Δh°	ΔE^*
T1 (5 min – 1,07 MPa)	-1,56	2,17	2,33	2,89	-2,81	3,54
T2 (10 min – 1,07 MPa)	-2,92	-0,87	5,65	6,41	-4,84	6,42
T3 (5 min – 2,15 MPa)	-4,01	2,58	7,10	8,30	-7,21	8,55
T4 (10 min – 2,15 MPa)	-4,68	1,89	6,02	7,18	-7,34	7,86

Observou-se que houve uma tendência de aumento da variação com o aumento da severidade do tratamento. Entretanto, o tratamento que apresentou maior variação foi o T3 (10 min – 2,15 MPa), resultado observado também na variação calculada entre as amostras termodensificadas e a testemunha.

6.4.4.2 Rugosidade

A Tabela 21 apresenta as médias dos parâmetros de rugosidade antes e depois do pós-tratamento, analisados pela ANOVA fator único.

Tabela 21. ANOVA dos parâmetros de rugosidade antes e depois do pós-tratamento térmico.

Parâmetros de rugosidade		Tratamento			
		T1	T2	T3	T4
Ra	Antes PT	9,58	8,18	6,9	6,28
	Depois PT	9,75 ^{NS}	9,51*	7,40 ^{NS}	5,43*
Rz	Antes PT	54,54	47,36	38,35	35,5
	Depois PT	53,45 ^{NS}	51,74 ^{NS}	42,73 ^{NS}	31,06*
Rq	Antes PT	12,37	10,64	8,96	8,1
	Depois PT	12,63 ^{NS}	12,23 ^{NS}	9,54 ^{NS}	7,16 ^{NS}

Ra = rugosidade média; Rz = rugosidade de profundidade média; Rq = rugosidade média quadrática. *valores significativos ao nível de 5% de significância; NS = valores não significativos.

O pós-tratamento provocou um aumento significativo de 16,26% no parâmetro Ra das amostras dos tratamentos T2. Em estudo realizado por Pertuzzatti et al. (2015), observou-se que os maiores valores, que indicam uma superfície áspera, foram encontrados nas amostras tratadas a temperaturas mais elevadas, devido às microfissuras formadas na superfície da madeira. Os tratamentos T1 e T3 também apresentaram aumento, embora não significativos estatisticamente.

O tratamento T4 apresentou uma redução significativa de 13,54% na rugosidade, indicando que o pós-tratamento aplicado às amostras que foram termodensificadas de forma

mais severa provocou efeito positivo nessa propriedade, reduzindo ainda mais a sua rugosidade.

Os parâmetros Rz e Rq apresentaram alterações não significativas, exceto o Rz do T4, que teve uma redução de 12,51%, confirmando a redução da rugosidade observada pelo parâmetro Ra.

As Figuras 21, 22, 23 e 24 apresentam o perfil de rugosidade das amostras sem pós-tratamento comparadas as amostras que receberam o pós-tratamento dos tratamentos 1, 2, 3, e 4 respectivamente.

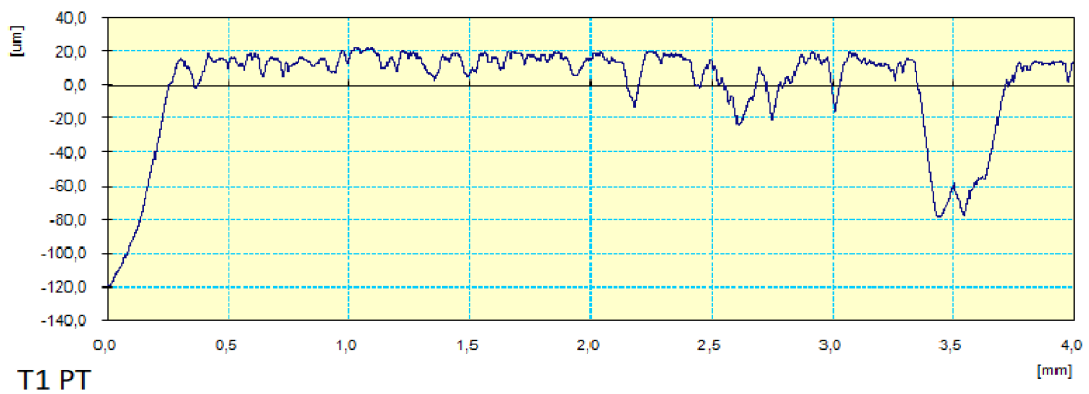
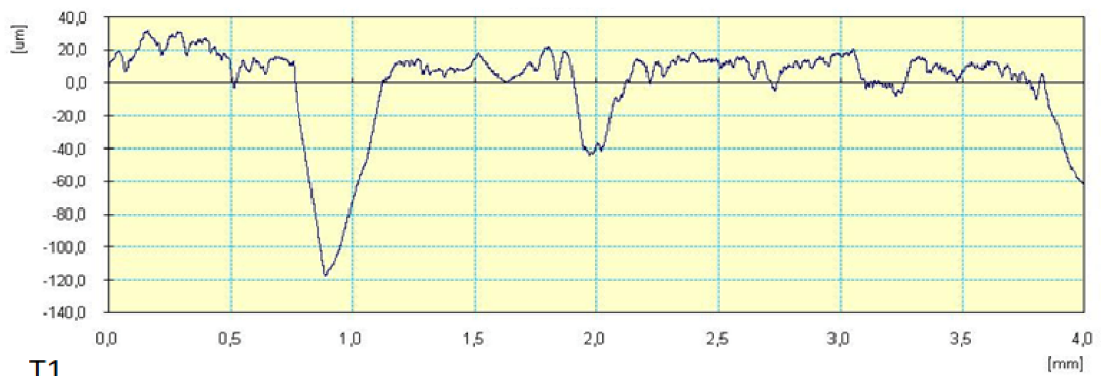


Figura 21. Perfil de rugosidade do tratamento 1 antes e depois do pós-tratamento térmico.

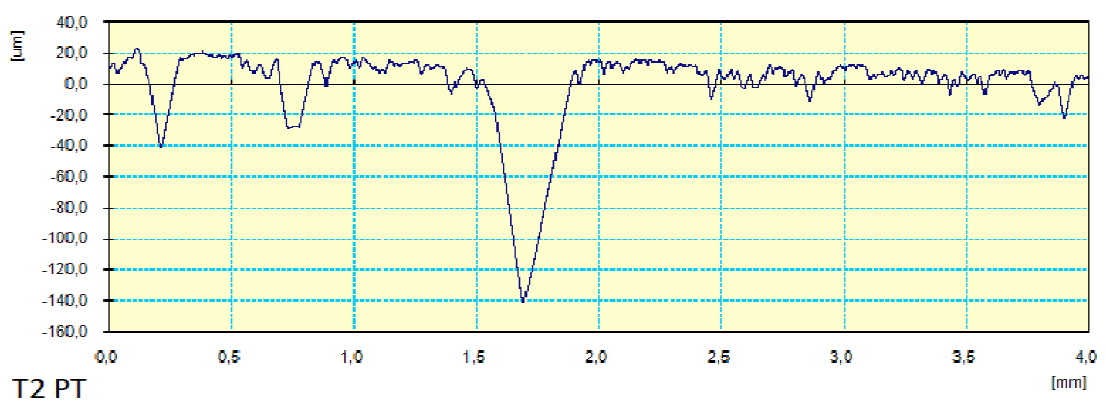
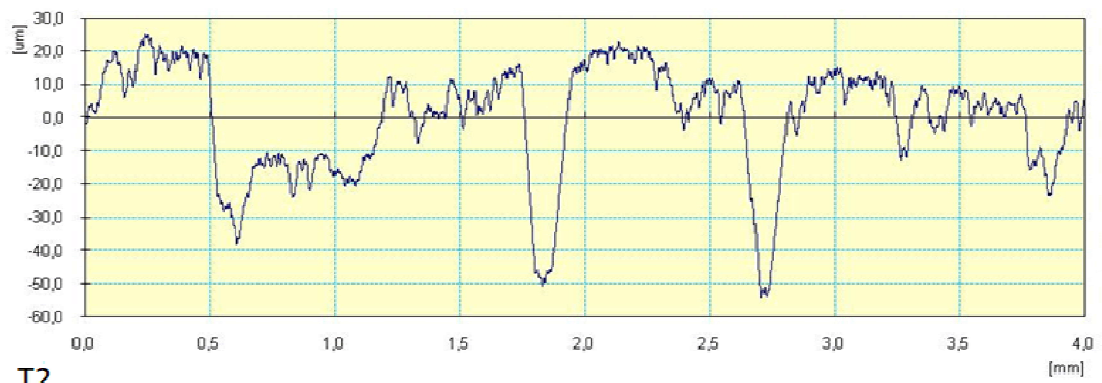


Figura 22. Perfil de rugosidade do tratamento 2 antes e depois do pós-tratamento térmico.

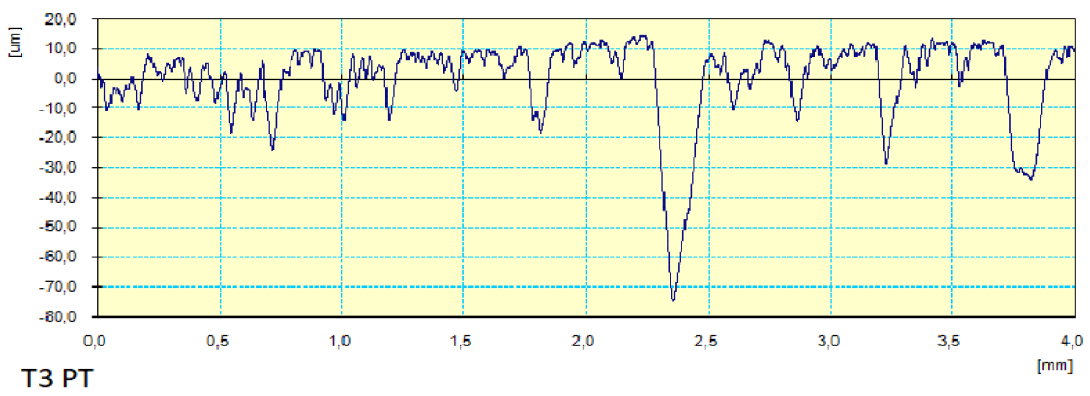
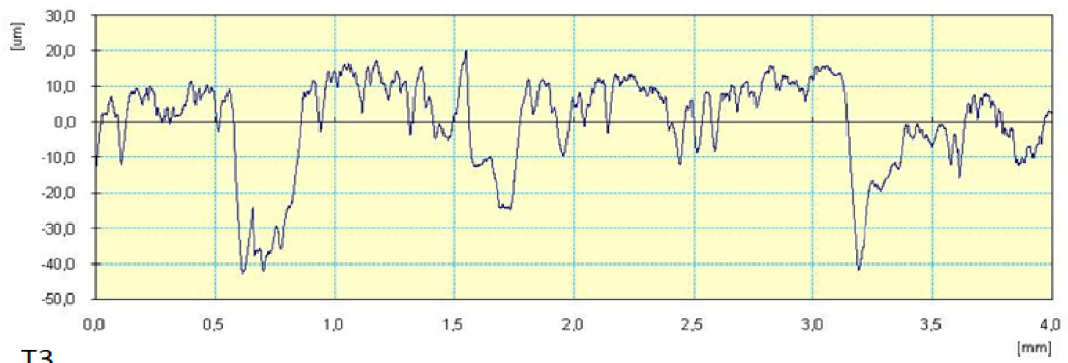
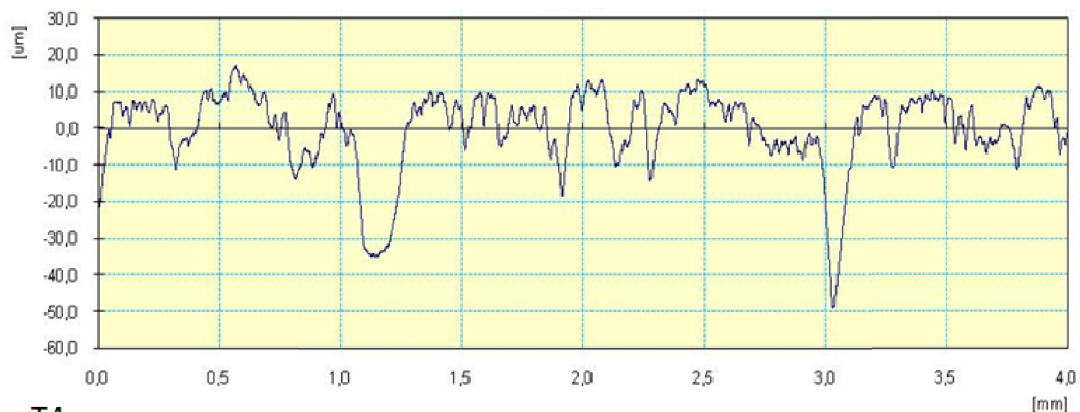


Figura 23. Perfil de rugosidade do tratamento 3 antes e depois do pós-tratamento térmico.



T4



T4 PT

Figura24. Perfil de rugosidade do tratamento 4 antes e depois do pós-tratamento térmico térmico.

Observou-se uma redução da distância entre os picos e os vales após o pós-tratamento térmico, indicando um efeito positivo do tratamento térmico sobre essa propriedade. O pós-tratamento potencializou o efeito observado após a termodensificação.

7. CONCLUSÃO

A termodensificação foi eficiente no aumento das propriedades mecânicas da madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., que apresentaram ganhos em todos os tratamentos, influenciados principalmente pela pressão. Entretanto, a termodensificação não foi capaz de melhorar a estabilidade dimensional, evidenciado pela perda em algumas propriedades físicas.

A madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. termodensificada apresentou alteração significativa na cor, mudando da cor cinza-rosado para a cor oliva-amarelado, o que mostra a

eficiência do tratamento na obtenção de diferentes colorações de acordo com as exigências do mercado. A rugosidade apresentou redução significativa, indicando que a superfície da madeira termodensificada se tornou mais lisa, favorecendo a aplicação de produtos de acabamento em menor quantidade.

O pós-tratamento térmico não foi capaz de melhorar a estabilidade dimensional das amostras termodensificadas. Entretanto, apresentou efeito positivo sobre as propriedades mecânicas e superficiais.

Dessa forma, a termodensificação é indicada à madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn quando seu uso final exigir maior resistência mecânica, e for utilizada em ambientes que não haja contato com a umidade (ambientes internos), sendo indicado o tratamento de maior pressão e menor duração (T3).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. L. S.; CAMPOS, C. S.; HANADA, R. E.; VASCONCELLOS, F. J.; FREITAS, J.A. Avaliação de danos por insetos em toras estocadas em indústrias madeireiras de Manaus, Amazonas, Brasil. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 789–796, 2002.

ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 399–416, 2007.

ARRUDA, L. M.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; MELO, R. R. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* huber ex ducke) modificadas termomecânicamente. **Ciência da Madeira**, v. 02, n. 01, p. 29–42, 2011.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; ANDRADE, A. Utilization of a thermomechanical process to enhance properties of hardwood used for flooring. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 223–231, 2015.

ASTM. D143-14 Standard test methods for small clear specimens of timber. p. 1–31, 2014.

BAO, M.; HUANG, X.; JIANG, M.; YU, W.; YU, Y. Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 6, p. 591–605, 2017.

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK, T.; MAMONOVA, M.; PINKOWSKI, G.; LIS, B. Effect of thermomechanical densification on surface roughness of wood veneers. **Wood Material Science and Engineering**, v. 9, n. 4, p. 233–245, 2014.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173–182, 2004.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; JUNIOR, G. B.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes

temperaturas de termorreificação. **Cerne, Lavras**, v. 12, n. 2, p. 182–188, 2006.

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, n. 18, p. 8545–8548, 2008.

BRONDANI, R. P. V.; GAIOTTO, F. A.; MISSIAGGIA, A. A.; KIRST, M.; GRIBEL, R.; GRATTAPAGLIA, D. Microsatellite markers for *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), an endangered tree species of the Amazon forest. **Molecular Ecology Notes**, v. 3, n. 2, p. 177–179, 2003.

BROSSE, N.; EL HAGE, R.; CHAOUCH, M.; PETRISSANS, M.; DUMARÇAI, S.; GERARDIN, P. Investigation of the chemical modifications of beech wood lignin during heat treatment. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 9, p. 1721–1726, 2010.

CABALOVÁ, I.; KAČÍK, F.; TRIBULOVÁ, T. The effects of heat treatment on the chemical alterations of Oak wood. **Key Engineering Materials**, v. 688, p. 44–49, 2016.

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Effect of thermal treatments on technological properties of wood from two Eucalyptus species. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 1, p. 471–481, 2015.

CALIRI, G. J. A.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; LEEUWEN, J. V.; SOUZA, N. R.; GOMES, J. B. M. **Caracterização do crescimento da sumaúma (*Ceiba pentandra*) sob diversas condições de plantio na Amazônia Central**. III Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais. 1993.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, p. 453–460, 2012.

CAMARGOS, J. A. A.; GOLÇALEZ, J. C. A Colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v. 71, 2001.

ČERMÁK, P.; RAUTKARI, L.; HORACEK, P.; SAAKE, B.; RADEMACHER, P.; SABLÍK, P. Analysis of dimensional stability of thermally modified wood affected by re-wetting cycles. **BioResources**, v. 10, n. 2, p. 3242–3253, 2015.

CONTE, B.; MISSIO, A. L.; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretrificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 42, n. 104, p. 555–563, 2014.

CROITORU, C.; SPIRCHEZ, C.; LUNGULEASA, A.; CRISTEA, D.; ROATA, I. C.; POP, M. A.; BEDO, T.; STANCIU, E. M.; PASCU, A. Surface properties of thermally treated composite wood panels. **Applied Surface Science**, v. 438, p. 114–126, 2018.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E. Surface roughness. In: **Mechanics of Wood Machining**. p. 1–199, 2013.

DA CUNHA, A. B.; DE MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“Stress Wave Timer”). **Revista Arvore**, v. 34, n. 2, p. 345–354, 2010.

DE CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of eucalyptus grandis wood: Variation of colorimetric parameters. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 57–64, 2013.

DE SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; LIMA, R. M.; ROSSI, L. M. B. Comportamento de espécies florestais em plantios a pleno sol e em faixas de enriquecimento de capoeira na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 127–134, 2010.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Universidade Federal do Paraná, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 64, n. 3, p. 212–217, 2006.

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; SCHNEID, E. Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. **Floresta e Ambiente**, v. 38, p. 375–376, 2013.

DIAS, A. F.; LANA, A. Q.; SANTOS, P. V.; CARVALHO, A. M.; SOUZA, N. D.; BRITO, J. O. Propriedades físicas e acabamento superficial da madeira de eucalipto termicamente tratada. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 270–276, 2015.

DIOUF, P. N.; STEVANOVIC, T.; CLOUTIER, A.; FANG, C. H.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 8, p. 3558–3564, 2011.

DOS SANTOS, D. V. B.; DE MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of heat treatment on color, weight loss, specific gravity and equilibrium moisture content of two low market valued tropical woods. **Wood Research**, v. 59, n. 2, p. 253–264, 2014.

EBENEZER, A. I.; BABATOLA, O. Physical and mechanical properties of torrefied Ceiba pentandra wood. v. 12, n. 3, p. 19–27, 2016.

ESTEVES, B.; RIBEIRO, F.; LOPES, L. C.; FERREIRA, J.; DOMINGOS, I.; DUARTE, M.; DUARTE, S.; NUNES, L. Densification and heat treatment of maritime pine wood. **Wood Research**, v. 62, n. 3, p. 373–388, 2017.

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1–3, p. 155–163, 2012.

FANG, C. H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Densification of wood veneers combined with oilheat treatment. Part I: Dimensional stability. **BioResources**, v. 6, n. 1, p. 373–385, 2011.

FREITAS, T. P.; FEUCHARD, L. D.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D.

C. Caracterizações anatômica e físico-mecânica da madeira de Liquidambar sp. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 723–734, 2015.

GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 559–570, 2016.

GOLI, G.; CREMONINI, C.; NEGRO, F.; ZANUTTINI, R.; FIORAVANTI, M. Physical-mechanical properties and bonding quality of heat treated poplar (I-214 clone) and ceiba plywood. **IForest**, v. 8, p. 687–692, 2014.

GONG, M.; LAMASON, C.; LI, L. Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 2, p. 293–296, 2010.

GRIBEL, R.; GIBBS, P. E.; QUEIRÓZ, A. Flowering phenology and pollination biology of *Ceiba pentandra* (Bombacaceae) in Central Amazonia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 15, p. 247–263, 1999.

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

HILL, C. A. S. **Modifying the properties of wood**. IN: Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. p. 19-44, 2006.

HILL, C. A. S. **Thermal modification of wood**. In: Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. p. 99-127, 2006.

JANUS, M.; CRAGG, S.; BRISCHKE, C.; MEYER-VELTRUP, L.; WEHSENER, J. Laboratory screening of thermo-mechanically densified and thermally modified timbers for resistance to the marine borer *Limnoria quadripunctata*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 1, p. 393–396, 2018.

JUIZO, C. G. F.; ZEN, L. R.; KLITZKE, W.; FRANÇA, M. C.; CREMONEZ, V. G.,

KLITZKE, R. J. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, v. 6, n. 5, p. 537–542, 2018.

KORKUT, S.; HIZIROGLU, S. Effect of heat treatment on mechanical properties of hazelnut wood (*Corylus colurna* L.). **Materials and Design**, v. 30, n. 5, p. 1853–1858, 2009.

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of Wood. **Zbornik gozdarstva in lesarstva**, v. 82, p. 53–62, 2007.

LABORATORY, F. P. **Wood Handbook - wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. 2010.

LAINE, K.; SEGERHOLM, L.; WALINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 5, p. 883–894, 2016.

LI, L.; GONG, M.; YUAN, N.; LI, D. Recovery of mechanically induced residual stresses in densified softwoods created during a densification process. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 4, p. 365–373, 2012.

LOPES, J. DE O.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. F.; NASCIMENTO, A. M. Alteração da cor da madeira de teca por tratamento térmico. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 521–534, 2014.

MATSUO, M.; YOKOYAMA, M.; UMEMURA, K.; SUGIYAMA, J.; KAWAI, S.; GRIL, J.; KUBODERA, S.; MITSUTANI, T.; OZAKI, H.; SAKAMOTO, M.; IMAMURA, M. Aging of wood: analysis of color changes during natural aging and heat treatment. **Holzforschung**, v. 65, n. 3, p. 361–368, 2011.

MÉNDEZ-MEJÍAS, L. D.; MOYA, R. Effect of thermo-treatment on the physical and mechanical, color, fungal durability of wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from forest plantations. **Medziagotyra**, v. 24, n. 1, p. 59–68, 2018.

MENEZES, W. M.; SANTINI, E. J.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.;

Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1019–1024, 2014.

MILITZ, H. Influence of the THM processing parameters on the mechanical and chemical degradation of wood. In: **The Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood**. 2012.

MILITZ, H. Wood modification. In: **The thermo-hydro-mechanical Processing of Wood**. v. 38, n. 6, p. 70, 2011.

MORI, C. L. S. O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 137–146, 2005.

NAVI, P.; GIRARDET, F. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. **Holzforschung**, v. 54, n. 3, p. 287–293, 2000.

NAVI, P.; HEGER, F. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. **MRS Bulletin**, v. 29, n. 5, p. 332–336, 2004.

NAVI, P.; SANDBER, D. The thermo-hydro-mechanical Processing of Wood. In: **The Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood**. v. 38p. 70.

NOLDT, G.; LIMA, R. M. B.; SOUZA, C.; BAUCH, J. Adaptability of the fine root system of *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. to various sites of central Amazônia, Brazil. **Journal of Applied Botany and Food Quality**, v. 82, p. 9–14, 2008.

PAES, J. B.; MELO, R. R.; LIMA, C. R.; OLIVEIRA, E. Resistência natural de sete madeiras ao cupim subterrâneo (*Nasutitermes corniger* Motsch.) em ensaio de preferência alimentar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 2, n. 1, p. 57–62, 2007.

PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; MISSIO, A. L.; SOARES, A. K.; GUMA, R. L.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Alterações físicas e superficiais da madeira de canemaçu (*Tetrorchidium rubrivenium*) termorretrificada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.

10, n. 1, p. 140–146, 2015.

PFRIEM, A. Promjena koeficijenta upijanja vode smrekovine (*Picea abies* (L.) Karst.) zbog njezine termičke modifikacije. **Drvna Industrija**, v. 62, n. 4, p. 311–313, 2011.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M.C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, v. 109, p. 148–153, 2012.

POPESCU, M. C.; LISA, G.; FROIDEVAUX, J.; NAVI, P.; POPESCU, C. M. Evaluation of the thermal stability and set recovery of thermo-hydro-mechanically treated lime (*Tilia cordata*) wood. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 85–97, 2014.

REIS, P. C. M. R.; SOUZA, A. L.; REIS, L. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; MAZZEI, L.; REIS, A. R. S.; TORRES, C. M. M. E. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia com base em propriedades físicas e mecânicas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 336, 2019.

RODRIGUEZ, H. G.; MAITI, R.; KUMARI, A.; SARKAR, N. C. Variability in Wood Density and Wood Fibre Characterization of Woody Species and Their Possible Utility in Northeastern Mexico. **American Journal of Plant Sciences**, v. 07, n. 07, p. 1139–1150, 2016.

ROWELL, R. M. Chemical Modification of Wood. **Forest Product Abstract**, v. 6, n. 12, p. 363–381, 1983.

ROWELL, R. M. Chemical modification of wood. In: **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2005.

ROWELL, R. M. Chemical modification of wood: a short review. **Wood Material Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 29–33, 2006.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies - A review. **IForest**, v. 10, n. 6, p. 895–908, 2017.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Properties of thermo-mechanically treated wood from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **BioResources**, v. 7, n. 2, p. 1850–1865, 2012.

SKYBA, O.; SCHWARZE, F. W. M. R.; NIEMZ, P. Resistance of thermo-hygro-mechanically (THM) densified wood to degradation by white rot fungi. **Holzforschung**, v. 63, p. 639–646, 2009.

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J. R. Hygro-thermo-mechanical densification of *Gyrocarpus americanus* wood. Ultrasound evaluation. **Revista de Investigaciones Agropecuarias**, v. 43, n. 2, p. 156–164, 2017.

SÖZBİR, G. D.; BEKTAŞ, İ. The effect of heat modification and densification on physical properties of poplar wood. **Drvna Industrija**, v. 68, n. 4, p. 315–321, 2017.

SÖZBİR, G. D.; BEKTAS, I.; AK, A. K. Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 21, n. ahead, p. 0–0, 2019.

SRINIVAS, K.; PANDEY, K. K. Effect of heat treatment on color changes, dimensional stability, and mechanical properties of wood. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 32, n. 4, p. 304–316, 2012.

TAGHIYARI, H. R.; RASSAM, G.; AHMADI-DAVAZDAHEMAM, K. Effects of densification on untreated and nano-aluminum-oxide impregnated poplar wood. **Journal of Forestry Research**, v. 28, n. 2, p. 403–410, 2017.

UNSAI, O.; KARTAL, S. N.; CANDAN, Z.; ARANGO, R. A.; CLAUSEN, C. A.; GREEN, F. Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 63, n. 5, p. 548–552, 2009.

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

APÊNDICE

A – Estatística descritiva das propriedades de caracterização da termodensificação.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
TXC (%)	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	19,87646	8,332703	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	20,83504	6,688711	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	42,52746	2,581882	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	44,92201	7,449661	8
	Total	32,04024	13,476192	32
TXD (%)	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	19,88785	12,677836	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	20,43934	9,561865	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	64,76879	7,541742	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	71,76258	23,505208	8
	Total	44,21464	28,248930	32
PM (%)	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	4,86615	,281292	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	5,21951	,562256	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	5,47414	,529530	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	6,91043	,920683	8
	Total	5,61755	,983482	32

B – Teste de Tukey ao nível de 5% de significância das propriedades de caracterização da termodensificação.

Propriedade	Tratamento	Repetições	Subconjunto	
			1	2
TXC (%)	1	8	19,88	
	2	8	20,84	
	3	8		42,53
	4	8		44,61
	Sig.			1,00
TXD (%)	1	8	19,89	
	2	8	20,44	
	3	8		64,77
	4	8		71,76
	Sig.			1,00
PM (%)	1	8	4,87	
	2	8	5,22	
	3	8	5,47	
	4	8		6,62
	Sig.			0,07

C – ANOVA fatorial das propriedades de caracterização da termodensificação

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig.
TXC (%)	Corrected Model	4395,486 ^a	3	1465,16	33,24	0,00
	Intercept	32850,465	1	32850,47	745,18	0,00
	Tempo	22,487	1	22,49	0,51	0,48
	Pressão	4368,875	1	4368,88	99,10	0,00
	Tempo * Pressão	4,124	1	4,12	0,09	0,76
	Error	1234,354	28	44,08		
	Total	38480,306	32			
	Corrected Total	5629,841	31			
TXD (%)	Corrected Model	18707,358 ^a	3	6235,79	28,95	0,00
	Intercept	62557,903	1	62557,90	290,45	0,00
	Tempo	113,862	1	113,86	0,53	0,47
	Pressão	18510,489	1	18510,49	85,94	0,00
	Tempo * Pressão	83,007	1	83,01	0,39	0,54
	Error	6030,706	28	215,38		
	Total	87295,967	32			
	Corrected Total	24738,064	31			
PM (%)	Corrected Model	12,596 ^a	3	4,20	19,29	0,00
	Intercept	949,790	1	949,79	4364,66	0,00
	Tempo	4,329	1	4,33	19,89	0,00
	Pressão	7,775	1	7,77	35,73	0,00
	Tempo * Pressão	1,207	1	1,21	5,55	0,03
	Error	5,875	27	0,22		
	Total	959,574	31			
	Corrected Total	18,471	30			

D - Estatística descritiva das propriedades mecânicas.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
$f_{c,90^\circ}$	Testemunha	4,99	0,69	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6,03	1,01	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	6,12	0,98	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7,12	2,17	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	8,21	3,18	8
$f_{c,0^\circ}$	Testemunha	21,25	2,28	24
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	28,62	2,24	24
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	29,19	2,00	23
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	36,81	4,05	24
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	36,19	4,95	24
f_H	Testemunha	13,86	2,93	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	18,73	2,01	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	19,81	1,92	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	25,79	3,43	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	29,88	2,28	7
f_m	Testemunha	38,12	3,98	12
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	53,13	6,03	12
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	49,71	5,58	12
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	67,41	5,87	12
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	65,76	7,38	12
E_m	Testemunha	4.987,60	567,22	12
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6.278,67	604,43	12
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	5.803,02	403,83	11
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7.383,92	1.117,80	12
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	6.494,83	689,96	12
E_d	Testemunha	5.154,47	507,99	12
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	5.880,58	796,37	12
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	5.252,36	493,22	11
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	8.377,29	648,03	12
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	8.862,41	645,30	12

E – Teste de Dunnett das propriedades mecânicas ao nível de 5% de significância.

Propriedade	(I) Tratamento	Tratamento (J)	Diferença média (I-J)	Erro padrão	Sig.
$f_{c,90^\circ}$	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	1,032678	0,930	0,637
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	1,123333	0,930	0,569
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	2,127018	0,930	0,091
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	3,22053*	0,930	0,005
$f_{c,0^\circ}$	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	7,36349*	0,961	0,000
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	7,93852*	0,972	0,000
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	15,55785*	0,961	0,000
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	14,94054*	0,961	0,000
f_H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	4,86678*	1,294	0,002
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	5,95239*	1,294	0,000
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	11,92700*	1,294	-
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	16,02471*	1,340	-
f_m	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	15,00646*	2,396	0,000
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	11,59071*	2,396	0,000
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	29,29004*	2,396	0,000
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	27,63521*	2,396	0,000
E_m	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	1291,07233*	294,860	0,000
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	815,42501*	301,487	0,032
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	2396,31793*	294,860	0,000
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	1507,23377*	294,860	0,000
E_d	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	726,11030*	257,284	0,023
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	97,890838	263,067	0,988
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	3222,82067*	257,284	0,000
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	3707,93974*	257,284	0,000

F – ANOVA fatorial das propriedades mecânicas ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
f _{c,90°}	Corrected Model	25,188 ^a	3	8,40	2,00	0,14
	Intercept	1509,920	1	1509,92	359,11	0,00
	Tempo	2,804	1	2,80	0,67	0,42
	Pressão	20,372	1	20,37	4,85	0,04
	Tempo * Pressão	2,011	1	2,01	0,48	0,49
	Error	117,730	28	4,20		
	Total	1652,838	32			
	Corrected Total	142,918	31			
f _{c,0°}	Corrected Model	1381,660 ^a	3	460,55	36,62	0,00
	Intercept	101567,950	1	101567,95	8.075,36	0,00
	Tempo	,011	1	0,01	0,00	0,98
	Pressão	1370,681	1	1370,68	108,98	0,00
	Tempo * Pressão	8,438	1	8,44	0,67	0,41
	Error	1144,554	91	12,58		
	Total	104358,474	95			
	Corrected Total	2526,214	94			
f _h	Corrected Model	617,540 ^a	3	205,85	33,17	0,00
	Intercept	17139,156	1	17139,16	2.761,59	0,00
	Tempo	51,881	1	51,88	8,36	0,01
	Pressão	566,805	1	566,81	91,33	0,00
	Tempo * Pressão	17,520	1	17,52	2,82	0,10
	Error	167,569	27	6,21		
	Total	17684,674	31			
	Corrected Total	785,109	30			
f _m	Corrected Model	2845,811 ^a	3	948,60	24,27	0,00
	Intercept	167110,531	1	167110,53	4.276,39	0,00
	Tempo	77,132	1	77,13	1,97	0,17
	Pressão	2759,376	1	2759,38	70,61	0,00
	Tempo * Pressão	9,303	1	9,30	0,24	0,63
	Error	1719,409	44	39,08		
	Total	171675,751	48			

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
	Corrected Total	4565,220	47			
E _m	Corrected Model	15306345,784 ^a	3	5102115,26	8,91	0,00
	Intercept	1976903788,873	1	1976903788,87	3.451,32	0,00
	Tempo	5463309,880	1	5463309,88	9,54	0,00
	Pressão	9472919,408	1	9472919,41	16,54	0,00
	Tempo * Pressão	501394,734	1	501394,73	0,88	0,35
	Error	24630260,366	43	572796,75		
	Total	2028577085,248	47			
	Corrected Total	39936606,150	46			
E _d	Corrected Model	112196887,913 ^a	3	37398962,64	86,42	0,00
	Intercept	2361350620,181	1	2361350620,18	5.456,48	0,00
	Tempo	60067,981	1	60067,98	0,14	0,71
	Pressão	109391359,058	1	109391359,06	252,78	0,00
	Tempo * Pressão	3635933,228	1	3635933,23	8,40	0,01
	Error	18608697,278	43	432760,40		
	Total	2521696651,596	47			
	Corrected Total	130805585,191	46			

G – Estatística descritiva das propriedades físicas.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
IE2H	Testemunha	1,10	0,18	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	4,77	1,56	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	2,96	0,73	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	12,25	3,55	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	13,00	6,88	8
ABS2H	Testemunha	22,21	3,06	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	21,79	1,07	6
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	18,90	1,63	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	23,43	5,70	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	26,86	10,99	8
IE24H	Testemunha	2,27	0,38	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	17,30	7,44	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	17,94	11,49	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	45,37	11,14	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	39,40	4,58	7
ABS24H	Testemunha	75,42	9,85	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	79,92	12,40	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	88,17	34,77	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	114,45	27,04	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	113,48	13,15	7
TNRE	Testemunha	- 1,16	0,26	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	16,80	9,11	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	17,78	11,02	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	44,86	12,32	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	34,23	8,85	8
TUE	Testemunha	15,37	0,46	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	11,54	0,17	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	11,36	0,49	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	10,41	0,56	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	10,20	0,35	8

H – Teste de Dunnett das propriedades físicas ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Tratamento (I)	Tratamento (J)	Diferença média (I-J)	Erro padrão	Sig.
IE2H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	3,67	1,77	0,14
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	1,85	1,77	0,68
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	11,14391*	1,77	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	11,89202*	1,77	0,00
ABS2H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	- 0,43	3,21	1,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	- 3,32	2,97	0,64
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	1,22	2,97	0,98
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	4,65	2,97	0,35
IE24H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	15,02694*	4,12	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	15,66862*	4,12	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	43,10618*	4,12	-
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	37,12995*	4,26	-
ABS24H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	4,50	10,97	0,98
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	12,75	10,97	0,60
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	39,03062*	10,97	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	38,05973*	11,36	0,01
TNRE	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	17,96480*	4,66	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	18,94412*	4,66	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	46,02318*	4,66	-
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	35,39009*	4,66	0,00
TUE	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-3,83116*	0,21	-
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-4,01202*	0,21	-
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-4,96189*	0,21	-
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-5,16591*	0,21	-

I – ANOVA fatorial das propriedades físicas ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
IE2H	Corrected Model	628,740a	3	209,58	13,32	0,00
	Intercept	2.174,47	1	2.174,47	138,20	0,00
	Tempo	2,29	1	2,29	0,15	0,71
	Pressão	613,27	1	613,27	38,98	0,00
	Tempo * Pressão	13,18	1	13,18	0,84	0,37
	Erro	440,54	28	15,73		
	Total	3.243,75	32			
	Corrected Total	1.069,28	31			
ABS2H	Corrected Model	263,356a	3	87,79	2,08	0,13
	Intercept	15.280,25	1	15.280,25	362,10	0,00
	Tempo	0,54	1	0,54	0,01	0,91
	Pressão	170,65	1	170,65	4,04	0,05
	Tempo * Pressão	73,72	1	73,72	1,75	0,20
	Error	1.097,17	26	42,20		
	Total	16.966,91	30			
	Corrected Total	1.360,52	29			
IE24H	Corrected Model	4961,893a	3	1.653,96	19,37	0,00
	Intercept	27.808,96	1	27.808,96	325,61	0,00
	Tempo	54,95	1	54,95	0,64	0,43
	Pressão	4.739,28	1	4.739,28	55,49	0,00
	Tempo * Pressão	84,57	1	84,57	0,99	0,33
	Error	2.305,93	27	85,40		
	Total	34.608,90	31			
	Corrected Total	7.267,83	30			
ABS24H	Corrected Model	7222,750a	3	2.407,58	4,14	0,02
	Intercept	302.843,53	1	302.843,53	521,01	0,00
	Tempo	102,23	1	102,23	0,18	0,68
	Pressão	6.916,25	1	6.916,25	11,90	0,00
	Tempo * Pressão	164,07	1	164,07	0,28	0,60
	Error	15.694,23	27	581,27		
	Total	323.914,84	31			
	Corrected Total	22.916,98	30			
TNRE	Corrected Model	4417,360a	3	1.472,45	13,55	0,00

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
	Intercept	25.842,06	1	25.842,06	237,87	0,00
	Tempo	186,39	1	186,39	1,72	0,20
	Pressão	3.961,27	1	3.961,27	36,46	0,00
	Tempo * Pressão	269,70	1	269,70	2,48	0,13
	Error	3.041,92	28	108,64		
	Total	33.301,34	32			
	Corrected Total	7.459,28	31			
	Corrected Model	10,736a	3	3,58	20,19	0,00
	Intercept	3.786,50	1	3.786,50	21.363,93	0,00
	Tempo	0,30	1	0,30	1,67	0,21
	Pressão	10,44	1	10,44	58,90	0,00
TUE	Tempo * Pressão	0,00	1	0,00	0,01	0,94
	Error	4,96	28	0,18		
	Total	3.802,20	32			
	Corrected Total	15,70	31			

J – Estatística descritiva das propriedades superficiais.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
L*	Testemunha	62,53	5,54	80
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	54,60	4,23	76
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	55,82	4,72	80
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	56,05	4,72	80
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	55,59	2,38	73
a*	Testemunha	4,49	1,56	79
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6,99	1,58	80
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	8,67	1,32	80
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	6,77	1,14	78
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	7,13	2,02	80
b*	Testemunha	17,24	1,22	69
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	22,01	2,73	80
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	24,41	1,97	79
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	22,30	2,23	80
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	22,27	3,07	80
C	Testemunha	17,78	1,33	69
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	23,11	2,99	80
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	25,93	2,15	79
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	23,36	2,40	80
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	23,41	3,49	80
h°	Testemunha	76,18	3,83	80
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	72,27	2,23	76
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	70,45	2,17	80
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	73,20	1,83	77
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	72,60	2,90	80
Ra	Testemunha	13,16	2,78	48
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	9,58	3,22	48
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	8,18	2,68	47
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	6,90	2,20	46
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	6,28	2,41	47
Rz	Testemunha	70,23	12,39	47
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	54,54	17,43	48
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	47,36	16,19	48

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	38,35	9,96	44
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	35,50	11,67	47
	Testemunha	16,59	3,40	48
Rq	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	12,37	4,15	48
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	10,64	3,57	47
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	8,96	2,88	46
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	8,10	3,07	47

K – Teste de Dunnett das propriedades superficiais ao nível de 5% de significância.

Propriedade	(I) Tratamento	Tratamento (J)	Diferença média (I-J)	Erro padrão	Sig.
L*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-7,9275*	0,72	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-6,7020*	0,71	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-6,4766*	0,71	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-6,9338*	0,72	0,00
a*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	2,5026*	0,25	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	4,1779*	0,25	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	2,2792*	0,25	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	2,6405*	0,25	0,00
b*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	4,7635*	0,39	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	7,1667*	0,39	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	5,0605*	0,39	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	5,0223*	0,39	0,00
C	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	5,3284*	0,43	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	8,1475*	0,43	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	5,5722*	0,43	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	5,6235*	0,43	0,00
h°	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-3,9110*	0,43	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-5,7265*	0,43	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-2,9756*	0,43	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-3,5725*	0,43	0,00
Ra	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-3,5771*	0,55	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-4,9735*	0,55	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-6,2554*	0,55	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-6,8729*	0,55	0,00
Rz	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-15,6924*	2,85	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-22,8778*	2,85	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-31,8886*	2,91	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-34,7340*	2,87	0,00
Rq	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	TE	-4,2169*	0,70	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	TE	-5,9471*	0,71	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	TE	-7,6286*	0,71	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	TE	-8,4879*	0,71	0,00

L – ANOVA fatorial das propriedades superficiais ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
L*	Corrected Model	94,717a	3	31,57	1,83	0,14
	Intercept	950.910,65	1	950.910,65	55.019,40	-
	Tempo	11,38	1	11,38	0,66	0,42
	Pressão	28,66	1	28,66	1,66	0,20
	Tempo * Pressão	54,60	1	54,60	3,16	0,08
	Error	5.271,37	305	17,28		
	Total	958.031,56	309			
	Corrected Total	5.366,09	308			
a*	Corrected Model	178,714a	3	59,57	24,72	0,00
	Intercept	17.355,96	1	17.355,96	7.202,92	0,00
	Tempo	82,42	1	82,42	34,21	0,00
	Pressão	61,61	1	61,61	25,57	0,00
	Tempo * Pressão	34,31	1	34,31	14,24	0,00
	Error	756,61	314	2,41		
	Total	18.311,72	318			
	Corrected Total	935,32	317			
b*	Corrected Model	296,542a	3	98,85	15,36	0,00
	Intercept	165.060,84	1	165.060,84	25.655,04	0,00
	Tempo	111,50	1	111,50	17,33	0,00
	Pressão	68,04	1	68,04	10,58	0,00
	Tempo * Pressão	118,83	1	118,83	18,47	0,00
	Error	2.026,66	315	6,43		
	Total	167.313,28	319			
	Corrected Total	2.323,21	318			
C	Corrected Model	418,057a	3	139,35	17,65	0,00
	Intercept	182.999,14	1	182.999,14	23.175,41	0,00
	Tempo	164,26	1	164,26	20,80	0,00
	Pressão	103,65	1	103,65	13,13	0,00
	Tempo * Pressão	152,74	1	152,74	19,34	0,00
	Error	2.487,32	315	7,90		
	Total	185.815,13	319			
	Corrected Total	2.905,38	318			

Propriedade	Fonte	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig
h°	Corrected Model	333,422a	3	111,14	20,63	0,00
	Intercept	1.627.594,22	1	1.627.594,22	302.126,72	-
	Tempo	113,79	1	113,79	21,12	0,00
	Pressão	186,61	1	186,61	34,64	0,00
	Tempo * Pressão	29,04	1	29,04	5,39	0,02
	Error	1.664,62	309	5,39		
	Total	1.629.900,78	313			
	Corrected Total	1.998,04	312			
Ra	Corrected Model	303,666a	3	101,22	14,31	0,00
	Intercept	11.248,19	1	11.248,19	1.589,74	0,00
	Tempo	47,64	1	47,64	6,73	0,01
	Pressão	246,17	1	246,17	34,79	0,00
	Tempo * Pressão	7,13	1	7,13	1,01	0,32
	Error	1.301,89	184	7,08		
	Total	12.897,77	188			
	Corrected Total	1.605,55	187			
Rz	Corrected Model	10675,486a	3	3.558,50	17,55	0,00
	Intercept	360.517,56	1	360.517,56	1.777,84	0,00
	Tempo	1.174,48	1	1.174,48	5,79	0,02
	Pressão	9.185,66	1	9.185,66	45,30	0,00
	Tempo * Pressão	219,86	1	219,86	1,08	0,30
	Error	37.109,38	183	202,78		
	Total	411.473,16	187			
	Corrected Total	47.784,87	186			
Rq	Corrected Model	508,392a	3	169,46	14,16	0,00
	Intercept	18.863,56	1	18.863,56	1.576,06	0,00
	Tempo	78,77	1	78,77	6,58	0,01
	Pressão	416,24	1	416,24	34,78	0,00
	Tempo * Pressão	8,91	1	8,91	0,74	0,39
	Error	2.202,26	184	11,97		
	Total	21.646,89	188			
	Corrected Total	2.710,65	187			

M – Estatística descritiva das propriedades mecânicas antes e depois do pós-tratamento térmico ao nível de 5% de significância.

	Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
$f_{c,90^\circ}$	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6,03	1,01	8
	Depois PT		7,94	1,05	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	6,12	0,98	8
	Depois PT		6,78	0,62	8
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7,12	2,17	8
	Depois PT		9,28	1,11	8
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	8,21	3,18	8
	Depois PT		11,93	2,74	8
$f_{c,0^\circ}$	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	28,62	2,24	24
	Depois PT		30,20	2,85	23
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	29,19	2,00	23
	Depois PT		32,25	3,36	24
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	36,81	4,05	24
	Depois PT		43,25	3,76	24
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	36,19	4,95	24
	Depois PT		44,77	3,84	23
f_H	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	18,73	2,01	8
	Depois PT		22,90	2,50	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	19,81	1,92	8
	Depois PT		22,76	2,32	8
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	25,79	3,43	8
	Depois PT		33,60	1,53	8
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	29,88	2,28	7
	Depois PT		33,47	3,13	8
f_m	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	53,13	6,03	12
	Depois PT		48,17	4,84	12
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	49,71	5,58	12
	Depois PT		56,41	8,33	12
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	67,41	5,87	12
	Depois PT		68,57	5,08	12
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	65,76	7,38	12
	Depois PT		75,44	7,70	12
E_m	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6278,67	604,43	12

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
Depois PT		4674,48	298,17	11
Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	5803,02	403,83	11
Depois PT		5265,04	1020,61	12
Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7383,92	1117,80	12
Depois PT		5622,11	768,80	12
Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	6494,83	689,96	12
Depois PT		5923,74	436,27	11
Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	5880,58	796,37	12
Depois PT		6543,70	468,24	12
Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	5252,36	493,22	11
Depois PT		6732,22	382,09	11
Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	8377,29	648,03	12
Depois PT		9468,84	563,61	12
Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	8862,41	645,30	12
Depois PT		10429,22	197,87	11

E_d

N – ANOVA das propriedades mecânicas antes e depois do pós-tratamento térmico ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Tratamento	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig.
$f_{c,90^\circ}$	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	14,62	1	14,62	13,82	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	1,77	1	1,77	2,62	0,13
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	18,68	1	18,68	6,29	0,03
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	55,35	1	55,35	6,27	0,03
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	29,61	1	29,61	4,53	0,04
$f_{c,0^\circ}$	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	109,82	1	109,82	14,23	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	497,05	1	497,05	32,54	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	864,41	1	864,41	43,83	0,00
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	69,62	1	69,62	13,54	0,00
f_H	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	34,82	1	34,82	7,68	0,02
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	244,03	1	244,03	34,55	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	47,88	1	47,88	6,26	0,03
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	147,50	1	147,50	4,93	0,04
f_m	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	268,79	1	268,79	5,34	0,03
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	8,00	1	8,00	0,27	0,61
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	562,87	1	562,87	9,90	0,00
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	14.769.294,66	1	14.769.294,66	63,20	0,00
E_m	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	1.661.080,70	1	1.661.080,70	2,67	0,12
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	18.623.683,31	1	18.623.683,31	20,24	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	1.871.817,70	1	1.871.817,70	5,51	0,03
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	2.638.434,70	1	2.638.434,70	6,18	0,02
E_d	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	12.044.990,1	1	12.044.990,1	61,89	0,00

Propriedade	Tratamento	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig.
		11		1		
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7.148.961,47	1	7.148.961,47	19,38	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	14.089.047,88	1	14.089.047,88	59,51	0,00

O – Estatística descritiva das propriedades físicas antes e depois do pós-tratamento térmico ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições	
IE2H	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	4,77	1,56	8
	Depois PT		3,67	1,60	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	2,96	0,73	8
	Depois PT		4,10	1,00	7
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	12,25	3,55	8
	Depois PT		7,74	3,07	7
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	13,00	6,88	8
	Depois PT		5,76	5,57	8
ABS2H	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	21,79	1,07	6
	Depois PT		19,04	8,52	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	18,90	1,63	8
	Depois PT		28,57	11,23	7
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	23,43	5,70	8
	Depois PT		21,58	7,15	7
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	26,86	10,99	8
	Depois PT		20,85	4,34	8
IE24H	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	17,30	7,44	8
	Depois PT		19,06	9,91	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	17,94	11,49	8
	Depois PT		18,68	7,98	8
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	45,37	11,14	8
	Depois PT		48,98	3,82	8
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	39,40	4,58	7
	Depois PT		42,73	11,93	8
ABS24H	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	79,92	12,40	8
	Depois PT		81,76	24,05	8
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	88,17	34,77	8
	Depois PT		94,76	27,11	7
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	114,45	27,04	8
	Depois PT		132,49	4,25	7
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	113,48	13,15	7
	Depois PT		108,65	23,30	8
TNRE	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	16,80	9,11	8

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
	Depois PT	19,83	11,48	8
	Antes PT	17,78	11,02	8
	Depois PT	17,81	8,66	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)			
	Antes PT	44,86	12,32	8
	Depois PT	48,54	7,10	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)			
	Antes PT	34,23	8,85	8
	Depois PT	35,24	14,27	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)			
	Antes PT	11,54	0,17	8
	Depois PT	8,93	0,67	8
	T1 (5 min - 1,07 Mpa)			
	Antes PT	11,36	0,49	8
	Depois PT	8,90	0,67	8
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)			
	Antes PT	10,41	0,56	8
	Depois PT	8,77	0,75	8
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)			
	Antes PT	10,20	0,35	8
	Depois PT	8,14	0,38	8
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)			
TUE				

P – ANOVA das propriedades físicas antes e depois do pós-tratamento térmico ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Tratamento	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig.
IE2H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	4,85	1	4,85	1,94	0,19
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	4,85	1	4,85	6,51	0,02
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	75,98	1	75,98	6,82	0,02
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	209,39	1	209,39	5,34	0,04
ABS2H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	25,92	1	25,92	0,60	0,45
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	349,05	1	349,05	5,86	0,03
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	12,80	1	12,80	0,31	0,59
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	144,83	1	144,83	2,08	0,17
IE24H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	12,43	1	12,43	0,16	0,69
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	2,21	1	2,21	0,02	0,88
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	51,89	1	51,89	0,75	0,40
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	41,49	1	41,49	0,48	0,50
ABS24H	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	13,51	1	13,51	0,04	0,85
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	162,28	1	162,28	0,16	0,69
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	1214,57	1	1.214,57	3,02	0,11
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	87,00	1	87,00	0,23	0,64
TNRE	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	36,56	1	36,56	0,34	0,57
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	0,00	1	0,00	0,00	1,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	54,25	1	54,25	0,54	0,48
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	4,13	1	4,13	0,03	0,87
TUE	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	27,15	1	27,15	112,77	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	24,17	1	24,17	70,38	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	10,77	1	10,77	24,65	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	17,11	1	17,11	127,38	0,00

Q – Estatística descritiva das propriedades superficiais antes e depois do pós-tratamento térmico.

	Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
L*	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	54,5976	4,23323	76
	Depois PT		53,0409	4,86051	80
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	55,8231	4,72320	80
	Depois PT		52,9009	3,82296	80
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	56,0485	4,71658	80
	Depois PT		52,0393	3,84210	80
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	55,5914	2,37910	73
	Depois PT		50,9125	2,80959	80
a*	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	6,9908	1,57560	80
	Depois PT		9,1563	1,02277	79
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	8,6660	1,32408	80
	Depois PT		7,7921	1,31290	80
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	6,7673	1,13867	78
	Depois PT		9,3468	,90016	80
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	7,1286	2,01937	80
	Depois PT		9,0180	1,13520	80
b*	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	22,0078	2,72796	80
	Depois PT		24,3385	2,34207	80
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	24,4109	1,97480	79
	Depois PT		22,8965	2,56410	80
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	22,3048	2,22762	80
	Depois PT		24,3398	1,98653	80
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	22,2665	3,06585	80
	Depois PT		23,2653	1,76496	80
C	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	23,1121	2,99241	80
	Depois PT		26,0036	2,44794	80
	Antes PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	25,9313	2,15373	79
	Depois PT		24,1984	2,77312	80
	Antes PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	23,3560	2,40239	80
	Depois PT		26,0838	2,04090	80
	Antes PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	23,4073	3,48988	80
	Depois PT		24,9675	1,89361	80
h°	Antes PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	72,2651	2,22859	76
	Depois PT		69,4593	1,40304	76

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições	
Ra	Antes PT	70,4496	2,17142	80	
	Depois PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	71,3386	1,79344	79
	Antes PT	73,2005	1,83025	77	
	Depois PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	68,9650	1,68474	80
	Antes PT	72,6036	2,90144	80	
	Depois PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	68,8354	2,11956	80
Ra	Antes PT	9,5785	3,21787	48	
	Depois PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	9,7510	2,80668	48
	Antes PT	8,1821	2,68387	47	
	Depois PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	9,5054	3,37389	48
	Antes PT	6,9002	2,19993	46	
	Depois PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7,4023	2,48263	47
	Antes PT	6,2828	2,40510	47	
	Depois PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	5,4266	1,53126	47
Rz	Antes PT	54,5417	17,42566	48	
	Depois PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	53,4521	13,89776	48
	Antes PT	47,3563	16,18577	48	
	Depois PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	51,7417	16,64576	48
	Antes PT	38,3455	9,95708	44	
	Depois PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	42,7255	12,53616	47
	Antes PT	35,5000	11,66701	47	
	Depois PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	31,0556	7,97532	45
Rq	Antes PT	12,3713	4,14696	48	
	Depois PT	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	12,6265	3,52259	48
	Antes PT	10,6411	3,57167	47	
	Depois PT	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	12,2269	4,23407	48
	Antes PT	8,9596	2,87620	46	
	Depois PT	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	9,5367	2,95506	46
	Antes PT	8,1002	3,07481	47	
	Depois PT	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	7,1602	2,14525	47

R – ANOVA das propriedades superficiais antes e depois do pós-tratamento térmico ao nível de 5% de significância.

Propriedade	Tratamento	Soma de quadrados	GL	Quadrado médio	F	Sig.
L*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	94,45	1	94,45	4,53	0,03
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	341,58	1	341,58	18,50	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	642,96	1	642,96	34,75	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	835,61	1	835,61	122,37	0,00
a*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	186,41	1	186,41	105,38	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	30,55	1	30,55	17,57	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	262,77	1	262,77	250,18	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	142,79	1	142,79	53,21	0,00
b*	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	217,30	1	217,30	33,62	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	91,16	1	91,16	17,38	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	165,65	1	165,65	37,19	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	39,90	1	39,90	6,38	0,01
C	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	334,43	1	334,43	44,75	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	119,36	1	119,36	19,33	0,00
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	297,62	1	297,62	59,90	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	97,38	1	97,38	12,35	0,00
h°	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	299,15	1	299,15	86,27	0,00
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	31,41	1	31,41	7,91	0,01
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	703,87	1	703,87	227,86	0,00
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	567,99	1	567,99	87,99	0,00
Ra	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	0,71	1	0,71	0,08	0,78
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	41,58	1	41,58	4,46	0,04
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	5,86	1	5,86	1,06	0,31
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	17,23	1	17,23	4,24	0,04
Rz	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	28,49	1	28,49	0,11	0,74
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	461,57	1	461,57	1,71	0,19
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	435,99	1	435,99	3,38	0,07
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	454,11	1	454,11	4,51	0,04
Rq	T1 (5 min - 1,07 Mpa)	1,56	1	1,56	0,11	0,75
	T2 (10 min - 1,07 Mpa)	59,72	1	59,72	3,89	0,05
	T3 (5 min - 2,15 Mpa)	7,66	1	7,66	0,90	0,35
	T4 (10 min - 2,15 Mpa)	20,76	1	20,76	2,95	0,09