



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

ISABELLE BIANCA GOUVEIA VASCONCELOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE TEMPERATURAS
ELEVADAS NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA ANDIROBA**

TUCURUÍ
2019

ISABELLE BIANCA GOUVEIA VASCONCELOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE TEMPERATURAS
ELEVADAS NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA ANDIROBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil, pela Universidade Federal do Pará.
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Carolina Coelho da Rosa.

TUCURUÍ
2019

ISABELLE BIANCA GOUVEIA VASCONCELOS

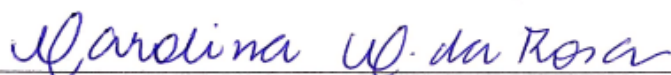
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE TEMPERATURAS
ELEVADAS NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA ANDIROBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil, pela Universidade Federal do Pará.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carolina Coelho da Rosa.

Tucuruí, 16 de dezembro de 2019.

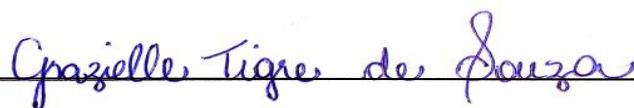
Aprovado por:



Carolina Coelho da Rosa, Dr^a. em Engenharia Civil (UFPA)
(Orientadora)



Jedson Henryque Corrêa Abrantes, MSc. em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento
Energético (UFPA)
(Examinador Externo)



Grazielle Tigre de Souza, MSc. em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (UFPA)
(Examinador Interno)

FICHA CATALOGRÁFICA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- V331a Vasconcelos, Isabelle Bianca Gouveia.
 Análise Experimental da Influência De Temperaturas Elevadas na Resistência ao
Embutimento da Andiroba /
 Isabelle Bianca Gouveia Vasconcelos. — 2019.
 xiv, 90 f. : il. color.
 Orientador(a): Prof^a. Dra. Carolina Coelho da Rosa.
 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Civil,
Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.
1. Andiroba.. 2. Temperatura.. 3. Madeira.. I. Título.

CDD 624.184

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e à
minha irmã, minha base em tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por esta graça. Aos meus pais, em especial à minha mãe, Consolação, que mesmo quando eu perdi a fé, sempre me deu forças e palavras de incentivo para continuar. Ao meu pai, Ronnie, agradeço por sempre acreditar em mim e depositar toda sua confiança, agradeço também por ter tanto orgulho de mim. A minha querida irmã, Raquel, por estar ao meu lado em tudo e pela nossa imensa irmandade. Amo vocês incondicionalmente.

Ao meu namorado, Pedro Luiz, que me ajudou bastante e foi meu suporte em muitas situações e esteve ao meu lado aguentando muitos surtos (hehe) e me salvou de muitos momentos solitários. Aos pais do Pedro, Tais e Alderi que me ajudaram muito durante o tempo que os conheci, como em uma segunda casa. Obrigada por todos os momentos em família e pela companhia.

As minhas amigas durante a graduação que sem elas não estaria aqui hoje: Brendola, Iza e Robert, em especial ao meu momento de estágio, que sem vocês nunca teria conseguido estar aqui hoje, obrigada pelo tempo para me ensinar quando não ia pra aula, tocar os trabalhos e pelos nossos papos também (kkk). Ao meu grande amigo Marcos Dollynet, agradeço por todos os nossos momentos divertidos, conversas cabeça, sonhos sobre o futuro e desabafos, durante e depois que abandonou a graduação. Provavelmente tu dividirias esse momento comigo, mas me deixou kkkkk. Ao Natan meu amigo louco e muito divertido, obrigada pelas conversas e risadas. Ao meu amigo Leonel, que sem ele este trabalho não seria possível, obrigada por toda ajuda durante a graduação e pelos ensinamentos passados, você foi um grande professor. A Camis que mesmo tendo 1 semestre de convivência foi minha amiga e me apoiou muito em momentos de dificuldade, bem como o Thalliszinho, obrigada por serem pessoas maravilhosas! Ao meu amigo Cleomar que me suportou no final da pesquisa, agradeço por todas as dicas.

A minha orientadora Carolina Coelho, que sem seu empenho não conseguiria tocar esse trabalho, obrigada pelas horas dedicadas a auxiliar no desenvolvimento da pesquisa, bem como pela paciência em tirar minhas dúvidas. As técnicas do Laboratório, Fran e Raissa, que me ajudaram bastante neste tempo no lab tanto durante os ensaios como nos momentos de descontração, como também o seu Lúcio e Jack, pelos lanches e companhia nos fds no lab.

Por fim, agradeço a todos que me ajudaram direta e indiretamente durante a graduação, em especial a dona Maria e sua família, que foram meus vizinhos por muito tempo e se dedicaram a me ajudar e cuidar de mim. Aos meus amigos de São Miguel, que até hoje me enchem de amizade quando nos encontramos: Loreнна, Rayssa e Lucas. Vocês são ótimos! <3

RESUMO

Na avaliação da capacidade de carga de uma ligação em estruturas de madeira, a resistência ao embutimento da madeira é um dos principais parâmetros. No entanto, essa resistência pode apresentar modificações quando as peças são submetidas a certos fatores, como variações de temperatura, pois a temperatura tem efeitos importantes sobre as propriedades da madeira e esses efeitos precisam ser entendidos para as devidas considerações em projetos de estruturas de madeira. Logo, o intuito desta pesquisa é avaliar a ação de temperatura elevadas na resistência ao embutimento da espécie de madeira andiroba, obtendo a resistência residual. Os ensaios de embutimento paralelo às fibras foram realizados em uma amostra com 84 corpos de prova, divididos em 7 níveis de temperatura entre 30° e 250° C e seguiram as prescrições da norma americana (ASTM D5764-97a) e da norma brasileira ABNT 7190- 97 de estruturas de madeira. As temperaturas dos corpos de prova foram definidas através do monitoramento com uso de termopares inseridos nos corpos de prova, sendo estes aquecidos em mufla, que já se encontrava na temperatura do ensaio. Após o tempo de aquecimento necessário os corpos de prova foram resfriados lentamente durante 24 h em um dessecador até alcançarem a temperatura ambiente. Os resultados obtidos nos ensaios permitiram concluir que o aumento da temperatura influenciou significativamente na resistência ao embutimento da madeira na temperatura de 250°C, bem como o escurecimento acentuado, porém, em 100°C a madeira apresentou um ganho de resistência significativo em relação a temperatura ambiente, fato que pode ser justificado devido ao valor de teor de umidade da madeira pós ensaio.

Palavras-chave: Andiroba. Temperatura. Madeira.

ABSTRACT

About evaluation in charge support of timber structures connections, the timber embedment strength is one of the main of parameters. Although, this resistance can show modifications when the parts are submitted some factors, such as temperature variations, because the temperature causes big effects on timber properties and this effect needs to be understanding for certs considerations in timber structures projects. Soon, the objective this research is evaluate the action of high temperature on timber embedment resistance, getting a residual resistance. The tests of parallel to grain were made in 84 test specimens separated in 7 groups of temperature between 30° and 250°C and followed the prescriptions to American (ASTM D5764- 97a) and Brazilian (ABNT 7190-97) of timber structures. The test specimens temperature was monitored using thermocouples inside of them, heat in flask being in desire temperature and next they were cooling during 24hr slowly, until get the environmental temperature. The results could get conclude that the increased of temperature influence significantly in an embedment strength in 250°C and also darkness brow, but in 100°C the wood increased the embedment strength regarding 30°C, and this fact may happen because of moisture content after tests.

Keywords: Andiroba. Temperature. Wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Força de embutimento da madeira contra pino metálico e medidas da área convencional de embutimento $A_e = t.d.$	21
Figura 2 - Ciclos de carregamento segundo a NBR 7190:97.	23
Figura 3 - Gráfico Força Embutimento x Deformação.	23
Figura 4 - Corpo de prova segundo a ABNT 7190:97.	24
Figura 5 - Dimensão dos corpos de prova segundo a EN 383:2007.	25
Figura 6 - Diagrama de ciclo de carregamento segundo a EN 383:2007.	26
Figura 7 - Diagrama Força x Deslocamento.	26
Figura 8 - Diagrama Força x Deslocamento.	27
Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova segundo a ASTM D5764-97a.	28
Figura 10- Modos de ruptura das ligações com pinos (a) plastificação do pino, (b) embutimento, (c) cisalhamento da madeira, (d) fendilhamento.	32
Figura 11 - Falha de esmagamento na madeira em diferentes inclinações às fibras da madeira.	33
Figura 12 - Fendilhamento em topo de pilarete na linha de parafusos.	34
Figura 13 - Zonas de degradação na seção da madeira.	37
Figura 14 - Vigas de madeira e aço após um incêndio.	42
Figura 15 - Equipamento para medição de teor de umidade das vigas e madeira usada.	43
Figura 16 - Sequência dos métodos da pesquisa.	44
Figura 17 - Exemplo dos corpos de prova utilizados.	45
Figura 18 - Medição das amostras com paquímetro digital.	46
Figura 19 - Testes de Normalidade dos 7 grupos.	47
Figura 20 - Equipamento utilizado para testes de temperatura.	48
Figura 21 - Força x Deslocamento.	49
Figura 22 - Ensaio de Embutimento com Potenciômetro ligado ao ADS 2002.	50
Figura 23 - Alteração dos corpos de prova de 100 °C a 250 °C, respectivamente.	54
Figura 24 - Coloração interna dos corpos de prova de 200 °C a 250 °C.	55
Figura 25 - Falhas de esmagamento e fendilhamento em amostras em temperatura ambiente.	59
Figura 26 - Rupturas por fendilhamento em corpos de prova acima de 150°C.	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores dos teores de umidade em suas respectivas temperaturas.	53
Gráfico 2 - Curva Força x Deslocamento das amostras em Temperatura Ambiente.	56
Gráfico 3 - Curvas Força x Deslocamento 100 °C a 150 °C.	57
Gráfico 4 - Curvas Força x Deslocamento 200 °C a 250 °C.	58
Gráfico 5- Comparativo entre as Resistências até 150 °C.	61
Gráfico 6- Comparativos entre as Resistência até 250 °C	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros comparativos das normas para determinação da resistência ao embutimento.	30
Tabela 2 - Fenômenos correspondentes a temperatura em peças de madeira.	37
Tabela 3- Alterações nos componentes da madeira conforme a temperatura.	39
Tabela 4- Tempo de aquecimento dos corpos de prova.	48
Tabela 5- Comparativos entre os grupos de resistência.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Fe	Força de Embutimento
fe	Resistência ao Embutimento
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
$f_{máx,est}$	Carregamento Máximo Estimado
Fe5%	Força de Embutimento ao deslocamento de 5%
Fy	Tensão de Escoamento do Aço
My	Momento de plastificação do parafuso
ε	Deformação específica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA	19
2.2	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	20
2.3	CRITÉRIOS DAS NORMAS DETERMINANTES PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	22
2.3.1	Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997	22
2.3.2	Norma europeia EN 383:2007	24
2.3.3	Norma americana ASTM D5764:1997a	27
2.3.4	Visão Comparativa das Normas Apresentadas	28
2.4	TIPOS DE FALHAS	32
2.5	FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA.....	34
2.5.1	Teor de Umidade	35
2.5.2	Massa Específica	36
2.5.3	Temperatura	36
2.6	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS POLÍMEROS DA MADEIRA	38
2.7	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1	CORPOS DE PROVA	44

3.2	HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	45
3.3	TESTES DE AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS	47
3.4	DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE EMBUTIMENTO.....	49
3.5	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA ..	50
3.6	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	51
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	51
3.7.1	Teste Kruskal-Wallis	52
4	RESULTADOS	53
4.1	TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO.....	53
4.2	ALTERAÇÃO DA COLORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	54
4.3	RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA NO ENSAIO AO EMBUTIMENTO	55
4.4	TIPOS DE FALHAS.....	58
4.5	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS.....	60
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
5.1	CONCLUSÕES	64
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A – CURVAS FORÇA X DESLOCAMENTO	72
	APÊNDICE B – VALORES DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS	87

1 INTRODUÇÃO

Há vários séculos a madeira tem sido usada como matéria-prima para construção. Além de ser um produto sustentável, por apresentar grande absorção e fixação de dióxido de carbono durante sua produção, a madeira é de fácil manuseio e requer baixo consumo de energia em seu processamento. Atualmente, é utilizado como formas de concreto e escoramento de estruturas de telhado, esquadrias e pisos. Sendo assim, para o seu uso adequado é necessário conhecer suas propriedades de resistência, rigidez e anisotropia devido às suas características e variabilidade (ALMEIDA *et al.*, 2013).

A necessidade de ligação entre os elementos estruturais nas construções de madeira implica em estudos relacionados à resposta da madeira quanto às solicitações impostas e aos tipos de ligações utilizados entre os elementos estruturais. Nesse sentido, a normatização brasileira referente à madeira aborda ligações por meio de pinos metálicos, ligações coladas, cavilhas ou conectores. Estas ligações são o ponto crítico das estruturas de madeira e, por isso, demandam estudos experimentais que avaliem o seu real comportamento, analisando a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência ao embutimento e a tensão de escoamento do pino (OLIVEIRA, 2005).

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 7190-97 a resistência da ligação pode ser de duas maneiras: por flexão do pino metálico ou por embutimento na madeira. Onde, os conceitos básicos de resistência ao embutimento foram apresentados por Almeida (1987), no primeiro estudo sobre o embutimento de pinos metálicos em ligações de madeira realizado no Brasil.

O estudo dessas propriedades mecânicas submetidas a altas temperaturas, tem sido um fator considerável em decorrência da segurança das estruturas, pois, estruturas de madeira podem apresentar diferenças em sua composição, características e propriedades quando expostas a temperaturas elevadas, isto é, fatores como cor, seção transversal e resistência sofrem severas alterações quando expostas ao calor e temperatura, apresentando efeitos de caráter permanente ou temporário, em decorrência do grau de degradação do material, ocasionado pelo tempo de exposição e temperatura a qual foi submetido (FIGUEROA, 2009).

Quanto ao uso da madeira, existe uma certa resistência no que diz respeito a sua combustão, prejudicando a segurança das estruturas, pois, segundo Paula, *et al.* (2014) quando estruturas de madeiras são submetidas a altas temperaturas, estas liberam gases combustíveis, os quais queimam e produzem chamas.

Contudo, para Marques (2008), o uso da madeira em estruturas representa uma das mais promissoras soluções à urgente necessidade por sustentabilidade e diminuição da degradação ambiental pela indústria da construção civil, logo, para viabilização dessas estruturas, é necessário efetuar uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança.

Sendo assim, a metodologia empregada neste trabalho está direcionada ao estudo das estruturas de madeira quando submetidas a influência da temperatura, associados a segurança das estruturas, viabilizando a utilização destas como alternativa no âmbito do contexto descrito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente a influência de temperaturas elevadas, entre 100 °C e 250°C na resistência ao embutimento da espécie andiroba.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar estatisticamente a homogeneidade entre as amostras;
- Verificar, para cada temperatura, o tempo necessário de aquecimento dos corpos de prova;
- Analisar em 7 níveis de temperatura, entre 30 °C e 250 °C, a força ao embutimento dos corpos de prova de madeira;
- Analisar a resistência ao embutimento paralelo às fibras, através da força máxima ao embutimento;
- Avaliar estatisticamente a influência da temperatura na resistência ao embutimento;
- Avaliar a influência do teor de umidade dos corpos de prova na resistência.

1.2 JUSTIFICATIVA

O uso da madeira em estruturas representa uma das mais promissoras soluções à urgente necessidade por sustentabilidade e diminuição da degradação ambiental pela indústria da construção civil, no entanto, a execução de grandes estruturas de madeira requer peças maciças com dimensões dificilmente encontradas. Para viabilização dessas estruturas, é necessário efetuar uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança. A resistência da estrutura é normalmente determinada pela resistência das ligações, além disso, as dimensões dos elementos estruturais são muitas vezes determinadas pelo número e as características físicas do tipo de conector a ser usado (GOÉS; JUNIOR, 2017).

De maneira geral, as construções feitas em madeira são observadas, no Brasil, com certa suspeita com relação à questão ambiental, no que se refere à utilização da madeira como matéria-prima extraída de florestas, associado ao desmatamento, incêndios e transformação de áreas em desertos e ainda com relação às características de durabilidade. Quando a madeira é utilizada de forma inadequada, devido à falta de conhecimento técnico, acaba gerando construções que não atingem a vida útil esperada, havendo questionamentos sobre o material, como em sua resistência. Sendo assim, o desempenho da madeira é observado em diversos pontos de vista em consideração a sua performance relacionada ao comportamento do material em estruturas, vedações e pisos, avaliando sua durabilidade e resistência, quanto as características mecânicas e químicas (PEDRESCHI *et al.*, 2005).

Para Betka e Niemz (2003), entre os materiais de construção, a madeira detém um lugar especial por causa de sua impressionante gama de propriedades atraentes, incluindo baixa temperatura, baixa densidade e alta força mecânica. No entanto, durante o processamento, em particular durante a secagem, a madeira pode sofrer alterações na cor e nas propriedades mecânicas, embora a velocidade e o curso dessas mudanças variem entre espécies de madeira.

Devido ao fato de que a madeira exposta é raramente usada em situações que exigem resistência ao fogo, há poucos dados disponíveis para uma abordagem prescritiva, embora existam alguns dados experimentais sobre o desempenho de fogo, onde a madeira exposta é necessária para fornecer resistência. Com base nisto, considera-se simples realizar os cálculos necessários, uma vez que o núcleo do membro de madeira dentro da zona carbonizada é pouco

afetado pela temperatura, e métodos normais de projeto ambiental podem ser usados (PURKISS, 2007).

Internacionalmente, a madeira é utilizada em edificações frequentemente. Na Ásia, edifícios antigos de madeira são amplamente utilizados, sendo selecionados como heranças materiais e culturais. Contudo, engenheiros estruturais estão sempre enfrentando os desafios de avaliar e projetar planos de reparos para estruturas de madeira, especialmente aquelas que resistem a incêndios de baixa gravidade. Pois, provou-se que membros de madeira são geralmente capazes de manter parte da capacidade de carga devido a uma camada isolante quando submetida inicialmente ao fogo, como o exemplo de peças de madeira utilizadas pós incêndio na Igreja dos Anjos da Guarda (XIE et al., 2010).

Com base nisso, foram selecionadas peças de madeira para analisar seu comportamento frente à altas temperaturas, com o propósito de contribuir para as pesquisas estruturais desconstruindo o receio da utilização da madeira, uma vez que é um material utilizado largamente em outros países.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão abordados os assuntos relacionados à ligações em estruturas de madeira, a definição de alguns autores sobre resistência ao embutimento, a influência da temperatura nos polímeros e nas propriedades mecânicas da madeira, os tipos de falhas que as amostras podem apresentar, fatores que influenciam na resistência ao embutimento e a descrição de prescrições de normas que regulamentam a realização de testes para a determinação da resistência ao embutimento.

2.1 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

A madeira é considerada um material de construção não homogêneo com muitas variações. Além disso, existem diversas espécies com diferentes propriedades. Dessa forma, necessita-se conhecer todas estas características para um melhor aproveitamento do material. Logo, os procedimentos para caracterização destas espécies de madeira e a definição destes parâmetros são apresentados nas normas referentes a projetos de madeiras: Norma Brasileira ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas) NBR 7190-97, americana ASTM (American Society for Test and Materials) D5764-97a e a europeia EN (European Committee for Standardization) 383:2007, proposta pela EUROCODE 5.

Nesse sentido, para Szücs *et al.* (2016) as peças de madeira, em função da estrutura anatômica do material e das limitações de comprimento, principalmente da madeira serrada, exigem o uso de ligações para composição de elementos estruturais, sendo que as ligações se apresentam como todos os dispositivos que permitem assegurar a ligação e a transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura. As ligações nas estruturas de madeira podem ser feitas com o uso de conectores, pinos metálicos, encaixes na madeira ou adesivos, que são utilizados de forma simultânea ou individual (OLIVEIRA, 2001).

Nesse aspecto, as ligações representam um importante ponto no dimensionamento das estruturas de madeira, pois praticamente toda estrutura de madeira apresenta partes a serem interligadas. Basicamente, a norma brasileira considera três tipos de ligações entre peças de madeira: pinos metálicos, cavilhas de madeira e conectores (GESUALDO, 2003). Posto isso, do ponto de vista estrutural, deve-se conhecer algumas propriedades importantes da madeira às seguintes características:

- Propriedades físicas da madeira: umidade, densidade, retratibilidade e resistência ao fogo;
- Compressão paralela às fibras;
- Compressão normal às fibras;
- Tração paralela às fibras;
- Cisalhamento;
- Módulo de elasticidade;
- Solicitação inclinada;
- Embutimento.

2.2 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

A importância das propriedades de embutimento no projeto de conexão de madeira atraiu atenção de pesquisadores de todo o mundo. Embora a resistência ao embutimento e rigidez possam ser deduzidas a partir de vários estudos com diferentes abordagens e empregando diferentes procedimentos de teste, dois amplos grupos de estudos, um realizado na Europa e o outro na América do Norte, podem ser apontados como a principal fonte de dados de inclusão, que foram utilizados na elaboração de códigos de prática para o projeto conjunto com base na teoria de Johansen (GLIŠOVIĆ; STEVANOVIC, 2011).

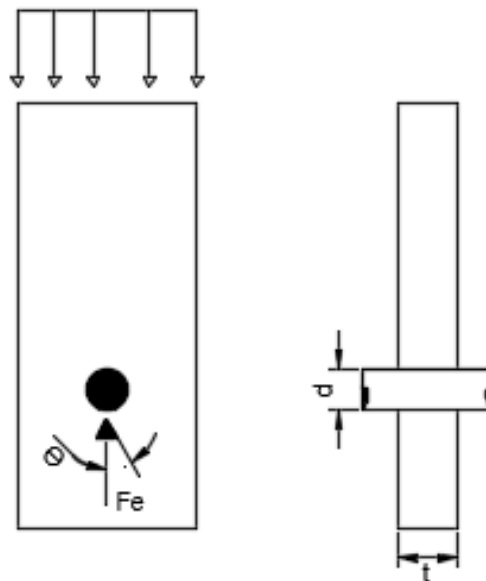
De acordo com Austrý (2007), a resistência ao embutimento é a tensão de compressão média no carregamento máxima na interface entre uma espécie de madeira e um fixador linear rígido, com o eixo do fixador perpendicular à superfície da amostra. Considerando que não se apresenta como uma propriedade da madeira, mas uma propriedade do sistema dependente do diâmetro do prego e/ou parafuso e o atrito entre a madeira e o fixador. É um dos fatores que mais influenciam na capacidade de carga das conexões.

Segundo Almeida (2014), o embutimento do pino metálico é caracterizado pelo deslocamento da ligação na direção de uma determinada força aplicada. Algumas contribuições (PALLAROLAS (2017); STAMATO; JÚNIOR (2002); CORREIA; DIAS (2006); KOZERSKI (2012); MOREIRA (2004)) para estes estudos vêm sendo realizados para uma melhor compreensão das ligações em estruturas de madeira, uma vez que é necessário conhecer o comportamento das peças em certas condições.

A resistência de embutimento apresenta-se como um valor convencional para descrever a resistência a compressão perpendicular ao eixo dos pinos embutidos em orifícios na madeira, sendo definido como a relação entre a força de embutimento e a área de embutimento do pino (Figura 1). Nesse sentido, a resistência de embutimento (f_e) representa a característica mecânica da madeira, e a tensão de escoamento do aço (f_y) ou o momento de plastificação do pino (M_y), a característica mecânica do parafuso (VALLE, 1999).

Para Almeida (1987) a força que ocasionaria o embutimento do pino metálico na peça de madeira pode ocorrer de duas maneiras: no momento da cravação do pino no ato da construção da ligação ou, a partir de uma ação externa. Logo, definiu-se a resistência da madeira ao embutimento como decorrente do aparecimento de um estado múltiplo de tensão na parede do furo da peça de madeira, devido à pressão de contato aplicada pelo pino metálico à parede do furo, embutindo o pino à madeira.

Figura 1 - Força de embutimento da madeira contra pino metálico e medidas da área convencional de embutimento $A_e = t.d$.



Fonte: Autora (2019), adaptado de Valle (1999).

Vários estudos em relação a resistência ao embutimento são realizados nacionalmente e internacionalmente (SCHWEIGLER (2016); ZHOU; GUAN (2006); ZITTO, *et al.* (2011) GARCIA; ITAGAKI (2013); BLERON; DUCHANOIS (2006)). Nesse contexto, Kennedy *et al.* (2014) conduziram um estudo sobre a resistência ao embutimento o qual desenvolveu a

análise desta por meio de um método europeu para cálculos de resistência lateral de conexões com fixadores, levando em consideração a resistência do fixador, geometria do conjunto e força de fixação da madeira, o qual relaciona-se com a massa específica da madeira e o diâmetro do fixador.

Almeida e Dias (2016) analisaram a propriedade de resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras em conformidade às normas brasileira (ABNT NBR 7190-97), americana (ASTM D5764-97a) e europeia (EN 383:2007). Para todas as espécies de madeira avaliadas, constatou-se que os maiores valores médios de resistência ao embutimento da madeira na direção paralela às fibras se deram pelo método EN 383:2007, seguidos pelos métodos ASTM D5764-97a e ABNT NBR 7190-97, respectivamente.

2.3 CRITÉRIOS DAS NORMAS DETERMINANTES PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

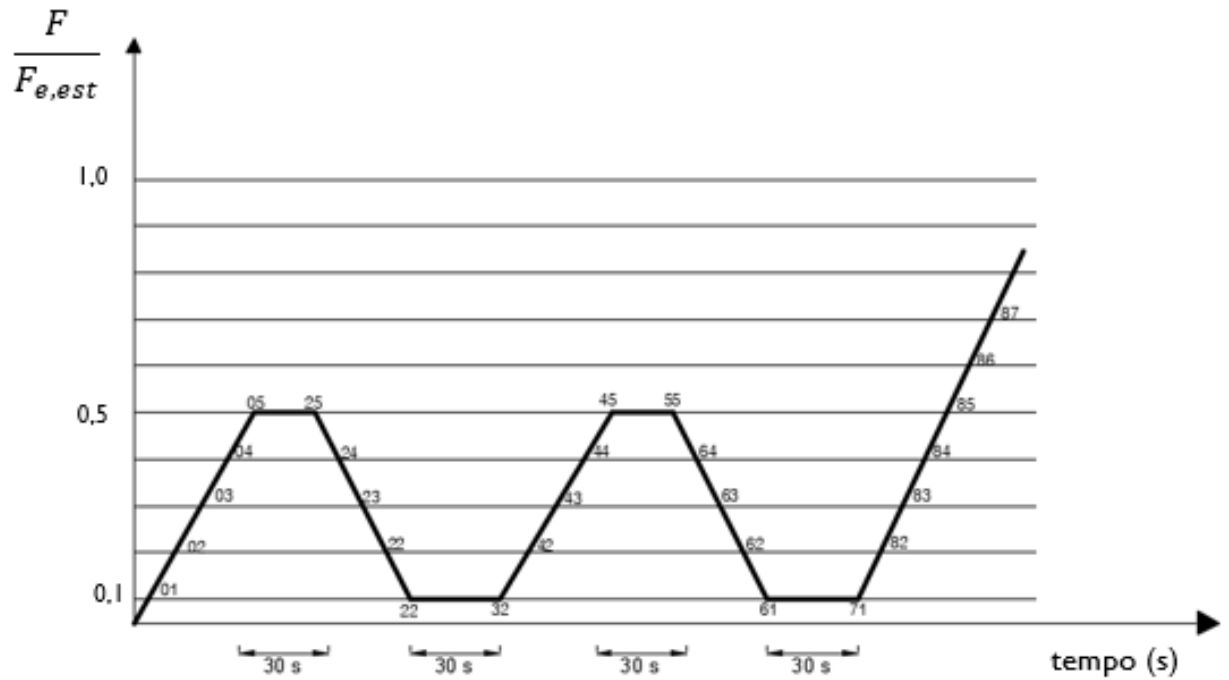
2.3.1 Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), caracteriza a resistência da madeira ao embutimento (f_e) como a razão entre a força aplicada que ocasiona a deformação específica residual 2‰ ($F_{e2‰}$) na área de embutimento do pino (diâmetro do pino metálico multiplicado pela espessura da peça de madeira ($t = 2.d$)). A equação 1 ilustra a definição da norma quanto ao embutimento:

$$f_e = \frac{F_{e2‰}}{t.d} \quad (1)$$

A norma indica também que deve ser previsto uma resistência estimada (f_e, est) através de ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo selecionado do mesmo lote da amostra a ser ensaiada. Assim, dado a resistência estimada, o carregamento será aplicado em ciclos de carga e descarga entre 10% e 50% da carga de ruptura (f_e, est), conforme o Anexo da ABNT NBR 7190:1997 (Figura 2).

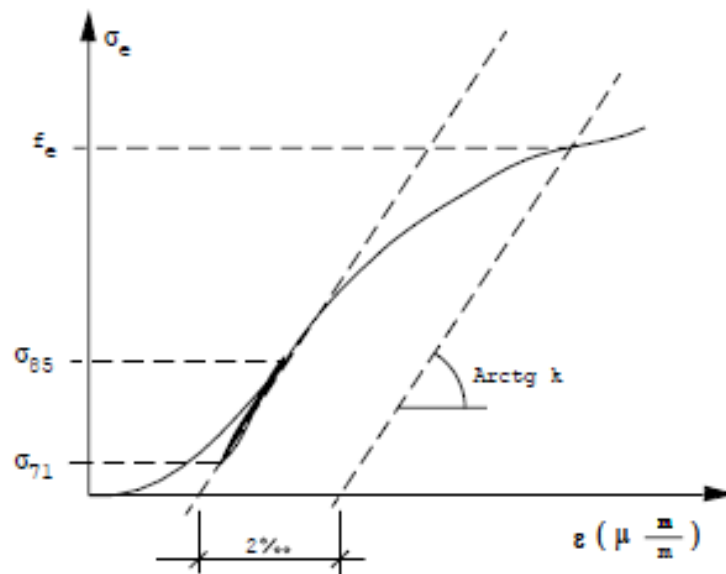
Figura 2 - Ciclos de carregamento segundo a NBR 7190:97.



Fonte: Pallarolas (2017).

Ademais, ilustra-se na Figura 3, segundo a norma, a obtenção da resistência da madeira ao embutimento, a partir do diagrama da força de embutimento (F_e) x Deformação específica (ε).

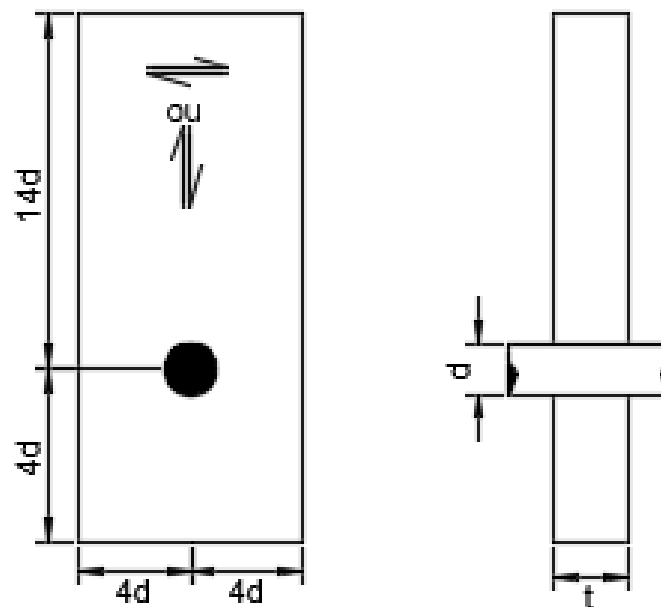
Figura 3 - Gráfico Força Embutimento x Deformação.



Fonte: Valle (1999).

Em relação às dimensões de corpos de prova, a norma brasileira orienta que devem possuir forma prismática com seção retangular nas seguintes dimensões: $8.d$ (diâmetro) de largura e $t = 2.d$ de espessura, com o comprimento ao longo das fibras igual a $18.d$. Vale ressaltar que estas dimensões correspondem a ensaios na direção paralela às fibras, no caso do embutimento na direção normal às fibras da madeira, o corpo de prova deve possuir as mesmas dimensões, porém toma-se o eixo maior na direção normal em relação às fibras da madeira (Figura 4).

Figura 4 - Corpo de prova segundo a ABNT 7190:97.



Fonte: Autora (2019), adaptado de NBR 7190:97.

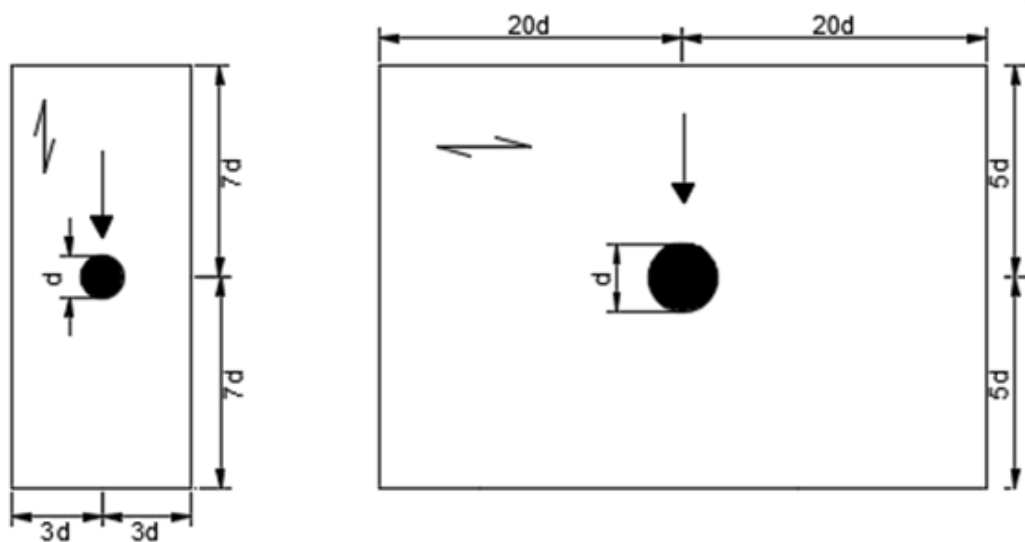
2.3.2 Norma europeia EN 383:2007

A norma europeia proposta pelo EUROCODE 5 aborda a determinação da resistência da madeira ao embutimento. Esta resistência, segundo a norma, é igual ao maior valor entre a máxima força resistida pelo corpo de prova e a força que ocasiona o deslocamento de 5 mm entre o pino e o corpo de prova, sendo dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso (d) e a espessura do corpo de prova (t). A Equação 2 ilustra a definição da norma quanto ao embutimento:

$$f_e = \frac{\text{Maior força entre } (F_{\text{máx}} \cdot F_{5\text{mm}})}{t \cdot d} \quad (2)$$

As dimensões dos corpos de prova para realização dos ensaios de embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras da madeira, segundo a norma podem ser observadas na Figura 5.

Figura 5 - Dimensão dos corpos de prova segundo a EN 383:2007.



Fonte: Autora (2019), adaptado de EN 383:2007.

Antes da realização dos ensaios deve ser estimada a força de carregamento máxima ($F_{\text{max,est}}$) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada do mesmo lote das amostras a serem ensaiadas. Este valor de força ($F_{\text{max,est}}$) deve ser aplicado em um ciclo de carregamento de até 40% deste valor, mantendo-o por 30 segundos, seguido de um descarregamento até o valor de 10%, mantendo-o por 30 segundos. Em seguida, deve ser aplicado um carregamento até ocorrer a ruptura do corpo de prova ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira. O ciclo de carregamento recomendado pela norma pode ser ilustrado na Figura 6.

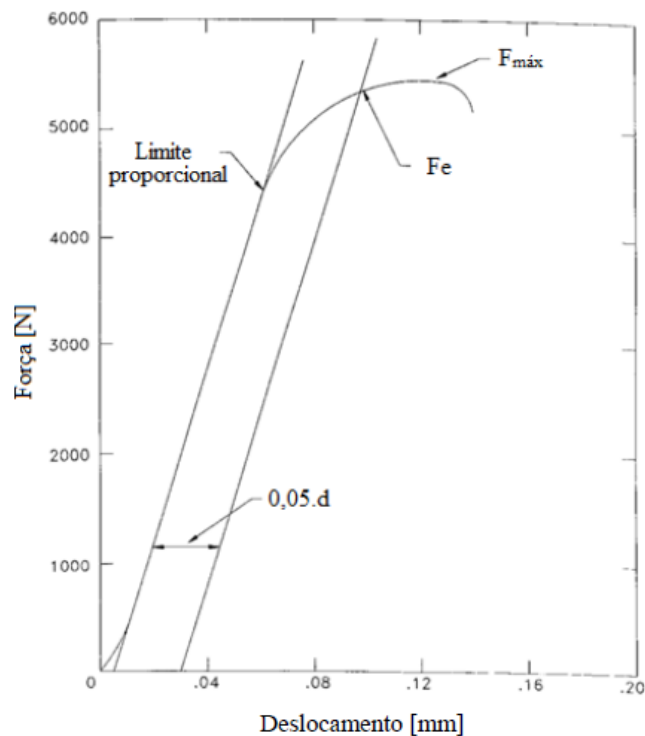
2.3.3 Norma americana ASTM D5764:1997a

Na norma americana ASTM D5764:1997a, a resistência da madeira ao embutimento é determinada a partir da razão entre a força que causa o deslocamento residual igual a 5% em relação ao diâmetro do pino metálico ($F_{e5\%}$), e a área resistente ao embutimento dada pelo produto entre o diâmetro do pino (d) e a espessura da peça de madeira (t), vide Equação 3.

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t.d} \quad (3)$$

A ASTM D5764:2007 não determina a realização de ciclos de carregamento, somente recomendando um carregamento que gere um deslocamento constante de 1,0 mm/min até a ruptura do corpo de prova. O gráfico da Figura 8 ilustra a forma de obtenção da resistência ao embutimento, a partir do diagrama Força de Embutimento *versus* Deslocamento.

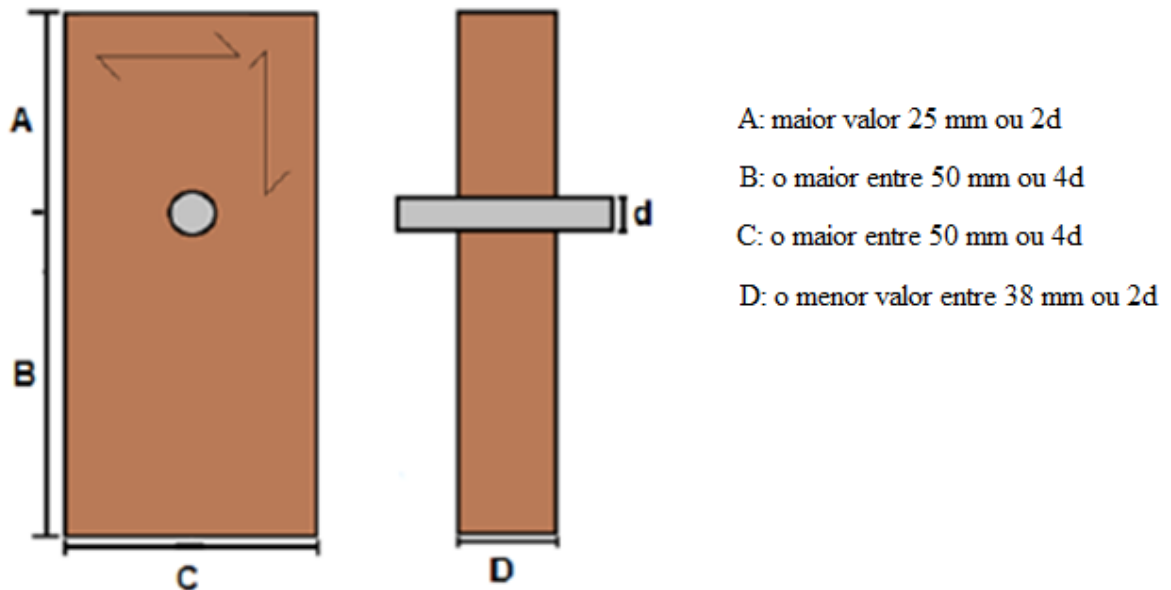
Figura 8 - Diagrama Força x Deslocamento.



Fonte: Pallarolas (2017).

Os corpos de prova para realização dos ensaios devem possuir o formato prismático retangular com um furo em sua face. Na Figura 9 se encontram as dimensões para o corpo de prova nas direções paralela e normal às fibras da madeira.

Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova segundo a ASTM D5764-97a.



Fonte: Almeida (2014).

2.3.4 Visão Comparativa das Normas Apresentadas

As normas apresentam diferentes formas para determinar a força de embutimento. As normas brasileira, americana e europeia descrevem basicamente a força de embutimento através do gráfico força de embutimento x deformação. No entanto, as considerações sobre a deformação diferem de norma para norma.

A norma brasileira considera a força de embutimento correspondente a uma deformação residual de 2%, onde o gráfico é gerado a partir do terceiro ciclo de carregamento até a ruptura do corpo de prova. A norma europeia aponta que a força corresponde ao momento que há um deslocamento igual a 5 mm durante aplicação de carga. Já a norma americana, considera que deve haver um deslocamento de 5% durante a aplicação da força.

Vale ressaltar que, as dimensões dos corpos de prova para os testes de embutimento apresentam diferenças entre as normas ABNT NBR 7190-97, ASTM D5764-97a e EN 383:2007, porém estas determinam que as dimensões sejam definidas em função do diâmetro do elemento de ligação. A norma ABNT NBR 7190-97 apresenta as maiores dimensões, enquanto a ASTM D5764-97a as menores. Devido a isso, os corpos de prova propostos pela ABNT NBR 7190-97 necessitam de um maior volume de madeira para a sua confecção. Na confecção de corpos de prova para ensaios mecânicos da madeira devem ser considerados fatores como a disponibilidade de madeira e o tamanho das peças das quais serão retirados os corpos de prova, o que aconteceu neste trabalho.

Por fim, a Tabela 1 apresenta resumidamente as considerações prescritas das normas supracitadas em relação aos testes de embutimento.

Tabela 1 - Parâmetros comparativos das normas para determinação da resistência ao embutimento.

	ABNT NBR 7190:1997	ASTM D5764-97a:2013	EN 383:2007
Velocidade de Aplicação	10 MPa/min	1 mm/min	1 mm/min
Corpo de prova de embutimento paralelo			

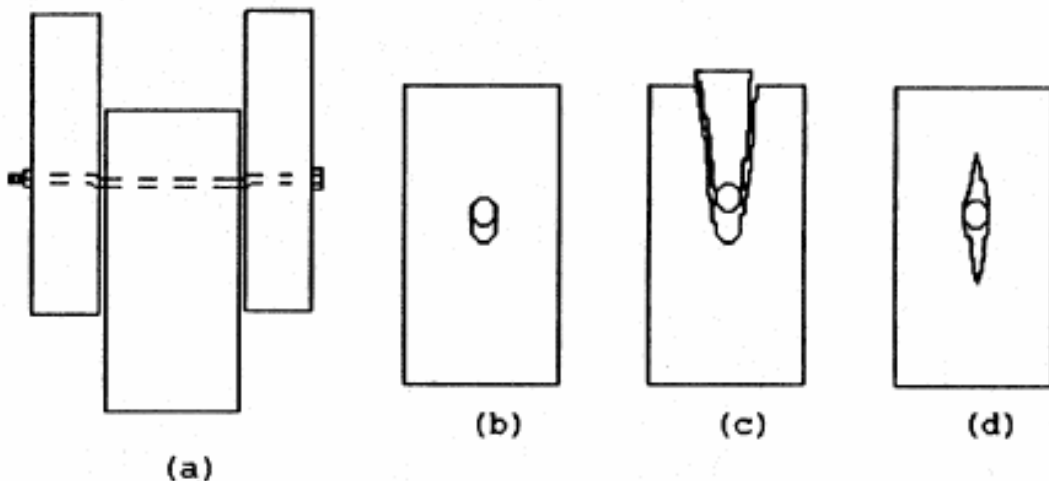
<p>Determinação da força de Embutimento</p>			
<p>Resistência ao embutimento</p>	$f_e = \frac{F_e}{t \times d}$	$f_h = \frac{F_e}{t \times d}$	$f_h = \frac{F_{m\acute{a}x}}{t \times d}$

Fonte: Autora (2019), adaptado de Schneid (2017).

2.4 TIPOS DE FALHAS

Durante a execução dos ensaios de embutimento, as amostras podem apresentar algumas falhas (Figura 10), a determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, notadamente os caracterizados por esmagamentos (Figura 11) e fendilhamentos (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Figura 10- Modos de ruptura das ligações com pinos (a) plastificação do pino, (b) embutimento, (c) cisalhamento da madeira, (d) fendilhamento.

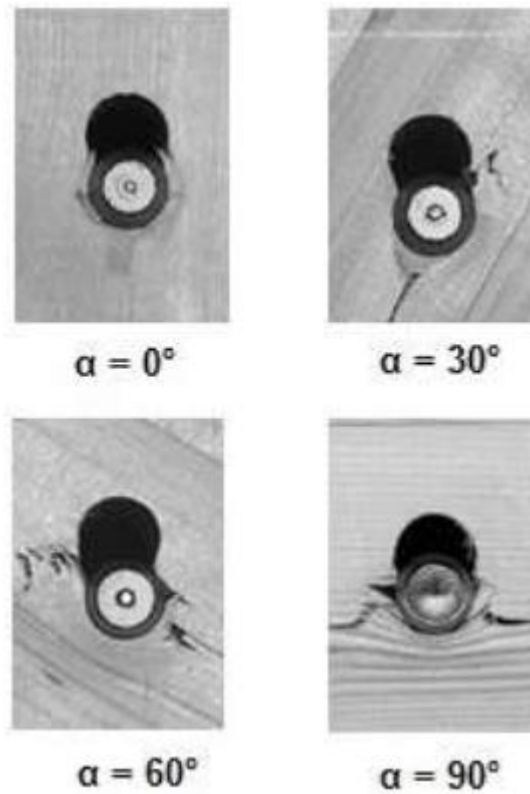


Fonte: Valle (1999).

Segundo Oliveira (2001), as falhas por fendilhamentos, ocorrem pela ruptura por tração normal às fibras da madeira ao longo de planos paralelos à direção da força transmitida pelo prego à madeira. Duas situações levam à ocorrência deste modo de ruptura: o ato da cravação dos pregos ou quando a ligação é solicitada por carregamento externo. A primeira situação surge durante a fabricação da ligação com pré furação insuficiente. A relação ideal entre os diâmetros do prego e da broca deve ser determinada experimentalmente, pois, se não for devidamente controlada, ocorrerá um fendilhamento imediato, ou um fendilhamento prematuro sob ação das forças externas.

A ruptura por fendilhamento da madeira devido ao carregamento depende de vários fatores, sendo o mais importante o espaçamento entre os pregos e a distância destes às bordas das peças da ligação (OLIVEIRA, 2001).

Figura 11 - Falha de esmagamento na madeira em diferentes inclinações às fibras da madeira.



Fonte: Pedersen (2002).

Para Britto (2014) considera-se apropriado dizer que fendilhamento define-se sendo uma separação longitudinal do tecido lenhoso na extremidade de uma peça que atravessa em toda sua espessura, isto é, uma superfície adjacente até a superfície oposta em função do efeito da separação das células da madeira, oriunda da ação do efeito físico de rasgamento em uma ou mais linhas de corte, originadas principalmente em regiões de ligações com pinos ou próximos dessa extremidade (Figura 12).

Figura 12 - Fendilhamento em topo de pilarete na linha de parafusos.



Fonte: Britto (2014).

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA

Lobão *et al.* (2004) afirmam que as propriedades mecânicas da madeira são dependentes, principalmente, da densidade, da porcentagem de madeira juvenil, da intensidade do ataque de insetos, da presença de nós e do teor de umidade. Ademais, alguns fatores podem interferir na resistência da madeira ao embutimento, a citar: o efeito da pré-furação, o espaçamento entre os pinos e as distâncias entre borda da madeira e centro do pino, direção das fibras, ângulo entre a direção de atuação da carga e as fibras da madeira, espécie de madeira e o diâmetro do pino metálico. (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Nesse sentido, certos fatores na literatura são indicados como influentes nos resultados provenientes dos ensaios de embutimento. Segundo Schneid (2017), os fatores correlatos à madeira são: a espécie, massa específica, teor de umidade e inclinação da grã, onde a condição do ambiente está ligada à temperatura a qual a madeira é submetida e ao diâmetro do elemento de ligação.

A seguir, os fatores que serão abordados neste trabalho com relação a resistência ao embutimento, serão elucidados.

2.5.1 Teor de Umidade

Historicamente, vários estudos foram desenvolvidos para contribuir com o desenvolvimento das pesquisas para estabelecer a relação do teor de umidade sobre as propriedades de resistência da madeira, segundo a norma brasileira ABNT 7190-97. Para Logsdon (1998), esta relação não se apresenta totalmente sólida, logo, necessita-se aferir a influência através de metodologias atuais e analisando o comportamento de corpos de prova semelhantes, bem como avaliar a interferência da umidade sobre as propriedades de resistência.

Poucos estudos foram realizados a fim de definir completamente os fatores que influenciam a resistência, um deles é o teor de umidade. Há evidências que a força e propriedades de rigidez são afetadas em diferentes graus quando os níveis de umidade são alterados. Além disso, afere-se que propriedades como tensão final paralela e perpendicular à granulação atingem o pico na faixa de 7% a 13% de teor de umidade e em seguida, diminuem a medida em que se aumenta a secagem (RAMER; WINISTROFER, 1999).

Para Xavier *et al.* (2016), testes demonstraram que o teor de umidade não influenciou a resistência na madeira da espécie *Eucalyptus paniculata*. Porém, em madeiras de outras espécies (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*), onde o teor de umidade apresentou interferência na resistência, sendo as amostras na condição úmida as que apresentaram menores valores de resistência. Sendo assim, as alterações das propriedades elásticas e mecânicas da madeira ocorrem devido a variações no seu teor de umidade, entre 0% e o PSF (Ponto de Saturação das Fibras) e acima deste ponto não há qualquer alteração. Logo, para se obter valores comparáveis, as madeiras devem sempre ser testadas a teores de umidade padronizados (normalmente a 12% ou 15%), ou eventualmente a valores superiores ao PSF (MORESCHI, 2005).

O ponto de saturação de fibra (PSF) é definido como o teor de umidade em que não há água livre, mas as paredes das células estão saturadas de água encadeada. Esta definição de PSF, no entanto, não é totalmente precisa e tem sido demonstrado que pode haver água livre, embora as paredes celulares não estejam totalmente saturadas de água. O PSF depende das espécies de madeira, mas geralmente é relatado em cerca de 25-30% (KEKKONEN, 2014). Isto é, o PSF é definido como o teor de umidade em que a água contida nas cavidades celulares é eliminada, permanecendo saturadas as paredes das células (MARTINS *et al.*, 2018).

Nesse sentido, segundo Schneid (2017), a resistência ao embutimento diminui com o aumento do teor de umidade da madeira, principalmente, quando a madeira possui umidade abaixo do PSF (Ponto de Saturação das Fibras). E acima do PSF, a resistência ao embutimento torna-se constante, analogamente às outras propriedades mecânicas da madeira.

2.5.2 Massa Específica

A massa específica da madeira é o resultado de uma complexa combinação dos seus constituintes internos. É uma propriedade muito importante e fornece inúmeras informações sobre as características da madeira, devido a sua íntima relação com várias outras propriedades, tornando-se um parâmetro muito utilizado para qualificar a madeira, nos diversos segmentos da atividade industrial (SILVA, 2002).

Para Figueroa (2012), a massa específica denomina-se como uma das mais importantes propriedades da madeira, pois está relacionada diretamente ao volume vazio dos poros e, conseqüentemente, a outras propriedades físicas e mecânicas. De uma maneira geral, quanto maior a massa específica, maior a resistência mecânica. Contudo, esta propriedade varia entre espécies iguais e espécies diferentes.

Marques *et al.* (2012), realizaram análises comparativas envolvendo massa específica da madeira em diferentes idades, chegando a conclusão de que, segundo o Método Brasileiro 26/1940 da ABNT, peças de madeira apresentaram variação de massa específica aparente nas diferentes idades, com maiores valores para madeira mais antigas.

2.5.3 Temperatura

Em geral, altas temperaturas reduzem a resistência da madeira, em decorrência da dilatação térmica do material e da movimentação térmica de suas moléculas. Em temperaturas acima de 100 °C inicia-se lentamente a deterioração térmica da madeira (MORESCHI, 2005).

É fato conhecido que a madeira, assim como seus derivados, quando submetida à ação do calor, está sujeita a variações físico-químicas (Tabela 2), onde o gradiente térmico provocado pelo aquecimento diferencial do material induz a transferência de massa e, conseqüentemente, a secagem do material (FIGUEROA; DIAS, 2009).

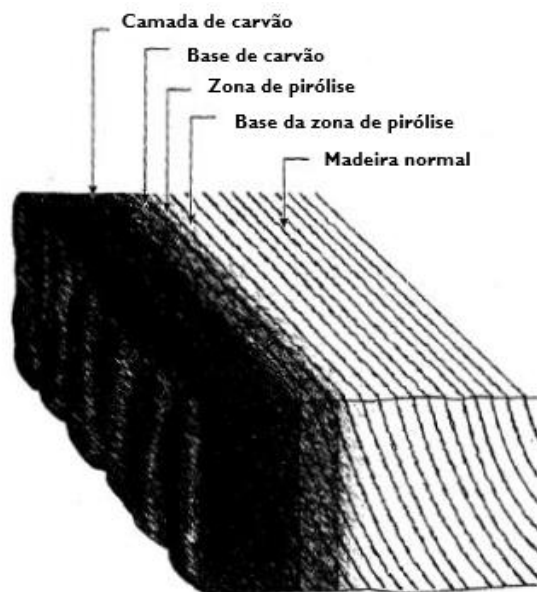
Tabela 2 - Fenômenos correspondentes a temperatura em peças de madeira.

Fase	Temperatura	Fenômeno
1	Até 200 °C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Liberação de vapor d'água e gases ▪ Existência de algumas reações exotérmicas de oxidação; ▪ Mudança de cor
2	200 a 280 °C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento de reação química e eliminação de gases; ▪ Ocorrência de reações exotérmicas primárias sem inflamação; ▪ Temperatura considerada como a temperatura de ignição; ▪ Fase conhecida como pirólise rápida
3	280 a 380 °C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produção de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol; ▪ O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura; ▪ Fase exotérmica.

Fonte: Figueroa (2012).

Para White (2002), quando se atenta a todos os detalhes, a resistência ao fogo de um membro ou montagem de madeira, depende de três itens: extensão de carbonização do elemento estrutural de madeira, desempenho de sua membrana protetora, caso haja, e capacidade de carga das porções não-carbonadas remanescentes dos elementos estruturais de madeira (Figura 13).

Figura 13 - Zonas de degradação na seção da madeira.



Fonte: Autora (2019), adaptada de White (2002).

Vários estudos (MORAES, 2003; WHITE; DIETENBERGER, 2010; CHACHIM, *et al.*, 2012; LEAL, 2010) elucidam a temperatura como um fator preponderante que interfere na resistência de peças de madeira e como essa influência ocorre. Bekhta e Nienz (2003), investigaram o efeito de temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas, na estabilidade dimensional e na coloração da madeira, em que os resultados mostram que o tratamento térmico ocasionou no escurecimento dos tecidos da madeira e redução das propriedades mecânicas, onde o escurecimento acelerou quando a temperatura de tratamento excedeu aproximadamente a 200 °C. Ademais, a temperatura apresentou um efeito mais forte na resistência à flexão que no módulo de elasticidade.

Llana *et al.* (2013) estudaram espécies divididas em grupos submetidas a diferentes temperaturas e quadro de umidades através de técnicas comerciais, apresentando resultados consistentes com base na literatura, onde a influência da temperatura mostra tendências diferentes acima e abaixo de 0 °C.

Por outro lado, a ideia básica de tratamento com temperatura em peças de madeira desenvolveu-se na Europa durante os anos 90, podendo ser definida para melhorar as propriedades. Companhias na Holanda e França tem produzido comercialmente madeira tratada com calor. Um fato conhecido é que o tratamento térmico melhora especificamente a estabilidade dimensional global da madeira. Contudo, com base nos resultados de estudos anteriores, conclui-se que o tratamento térmico interfere na maioria das características mecânicas de diferentes espécies de madeira (BAKAR *et al.*, 2013).

2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS POLÍMEROS DA MADEIRA

Quando a madeira é exposta a agentes ambientais de deterioração, como tratamentos químicos ou temperaturas elevadas, cada propriedade mecânica reage de forma diferente. Mais comumente, propriedades de força são reduzidas e as propriedades que lidam com o limite proporcional mostram pouco ou nenhum efeito. No entanto, a tensão para a falha (taxa de deformação) é muitas vezes consideravelmente reduzida, o que, devido a fragilização das fibras, é refletida como uma redução na flexibilidade e propriedades relacionadas à energia como trabalho, resistência, etc. (WINANDY; ROWELL, 2005).

Segundo Kekkonen (2014), quimicamente, a parede celular da madeira é constituída por celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, compreende 40-50% do material de madeira, sendo formada por monômeros de glicose polimerizados em uma longa cadeia. Cadeias rígidas e fortes de celulose formam microfibrilas nas paredes das células. A hemicelulose é considerada como heteropolissacarídeo que também consistem em monômeros que não são glicose, atuando como agentes de acoplamento entre as microfibrilas e a matriz de lignina. Já a lignina é um polímero fenólico altamente amorfo que atua como cola entre microfibrilas na parede celular e entre as paredes celulares.

Contudo, a madeira também contém extrativos, que são compostos orgânicos, como resinas, látex, polifenóis e ácidos graxos, e compostos inorgânicos, como dióxido de silício, sais sulfúricos e vários sais metálicos. Sendo que a quantidade de extrativos varia de 0,5% a 20% do peso, dependendo da espécie da madeira, onde a redução nas propriedades é atribuída principalmente ao amolecimento viscoso da hemicelulose e lignina nas paredes celulares (GOODRICH *et al.*, 2010).

Tabela 3- Alterações nos componentes da madeira conforme a temperatura.

Temperatura (°C)	Alterações na Madeira
55	Estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer
70	Retração transvesal da madeira se inicia
110	A lignina lentamente começa a perder peso
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir e celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer
140	A água de impregnação é liberada
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar
180	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4%. A lignina da membrana de pontuação escoa
200	A madeira começa perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada
280	A lignina atinge 10% de perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira
300	O cerne amolece irreversivelmente
320	A hemicelulose é completamente degradada
370	A celulose apresenta perda de 83% de seu peso inicial
400	A madeira é completamente carbonizada

Fonte: Figueroa e Moraes (2009).

2.7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A madeira apresenta algumas fraquezas como: as variações das propriedades mecânicas, a suscetibilidade a ataque de microrganismos, o fogo e instabilidade dimensional. Sendo assim, os designs de estruturas de madeira requerem a classificação da força para confirmar as propriedades mecânicas, logo, na prática, as propriedades mecânicas são estimadas visualmente ou pela classificação mecânica (FIRMANTI, 2003).

Maraveas *et al.* (2013), destaca que a segurança contra o fogo tem sido uma grande preocupação em projetos de construção envolvendo estruturas de madeira. Embora a madeira seja um material combustível, pode executar funções, adequadamente, sob temperaturas elevadas. Nesse sentido, as propriedades mecânicas da madeira a elevadas temperaturas são importantes na determinação da capacidade das conexões submetidas ao fogo.

Moraes (2003), pesquisou as características de resistência ao fogo de conjuntos de madeira-metal de tipo único, estudando a alteração de características mecânicas da madeira para temperaturas inferiores entre 20 °C e 300 °C e o estudo da carbonização da madeira sozinha e da madeira com hastes de metal. Os resultados obtidos concluíram que a elasticidade e a resistência da madeira diminuem com o aumento da temperatura, onde os resultados foram utilizados para desenvolver um modelo para simular a resistência ao fogo de uma junta de madeira simples com passador. Os testes mostraram boa concordância com o modelo proposto em relação ao comportamento articular e o tempo antes da fratura.

Goodrich *et al.* (2010) estudaram a resposta de suavização térmica da madeira com o aumento da temperatura e comportamento de recuperação térmica quando a madeira é resfriada após aquecimento. A exposição a temperaturas elevadas foi limitada a um curto período de tempo, representativo de um cenário de incêndio ou pós-fogo. A resistência diminuiu progressivamente com o aumento da temperatura de 20 °C a 250 °C, sendo associado ao amolecimento da hemicelulose e lignina nas paredes celulares. Além disso, registrou-se pequenas perdas de massa nesta faixa de temperatura.

Carrasco *et al.* (2016), investigaram a influência da temperatura em intervalos de 20°C a 240 °C nas propriedades físicas da madeira como umidade, massa específica e propriedades mecânicas como resistência e módulo de elasticidades verificando que a partir de 180 °C a

queda de resistência é elevada, e no momento que a temperatura atinge o valor de 240 °C sua resistência é 32% menor do que a na temperatura de 20 °C. O comportamento do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura é muito diferente do comportamento da resistência.

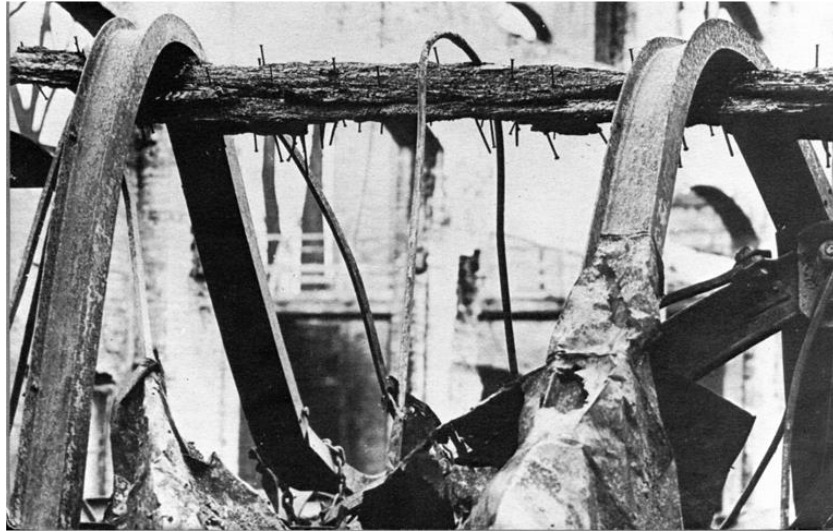
Frühwald (2007), estudou o efeito de altas temperaturas nas propriedades na Noruega, onde os experimentos confirmaram as pesquisas anteriores quanto o tratamento com temperatura, sendo que a duração da temperatura afeta as propriedades da madeira. Dentro disto, utilizaram-se níveis de temperatura entre 80 °C e 170 °C, onde a secagem em altas temperaturas ou tratamentos puderam otimizar várias aplicações, produzindo uma madeira forte, porém não tão durável ou vice-versa.

Estudos sobre o comportamento de juntas de madeira aparafusadas submetidas a altas temperaturas foram realizados, onde testes para a determinação da força de embutimento paralelamente ao grão de madeira e à capacidade de carga de juntas de um e três parafusos foram executados em temperaturas de 20° C a 230 °C. Os resultados mostraram que a temperatura e teor de umidade influencia significativamente a capacidade de carga das articulações. A temperatura mais alta leva a um comportamento não-linear de diminuição da resistência, com valores mínimos em 50 e 100 °C. Esse comportamento está associado à degradação dos polímeros e alterações no teor de umidade da madeira (MORAES *et al.*, 2011).

Xie *et al.* (2018), buscou compreender as propriedades da madeira após exposição de temperaturas elevadas, submetendo madeira de origem chinesa a testes de resistência em diferentes temperaturas (100 °C a 250 °C) e tempos de exposição (15min a 45 min), o qual propôs métodos de resfriamento na madeira para verificar alguma melhora na resistência. Logo, os resultados indicam que a exposição a temperaturas elevadas causa uma forte degradação na resistência, demonstrando que quando a temperatura de exposição excede 200 °C a resistência diminui consideravelmente com o aumento do tempo de exposição.

Ao expor a madeira ao fogo, ela conserva sua resistência mecânica durante mais tempo em comparação ao aço. A Figura 14 mostra que um exemplo no qual a estrutura em aço se deforma completamente, enquanto a viga de madeira permanece com capacidade de carga mesmo após submetida ao fogo (FIGUEROA, 2008).

Figura 14 - Vigas de madeira e aço após um incêndio.



Fonte: Figueroa (2008).

Nesse sentido, durante a variação da resistência do aço e da madeira em função do tempo de exposição ao fogo, Figueroa (2008), aponta que a 550 °C o aço perde 50 % de sua resistência nos primeiros 10 min, enquanto a madeira tem uma perda de 25 % em 30 min.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente, foram realizadas pesquisas em serrarias locais em Tucuruí para encontrar certas espécies de madeira disponíveis para os testes. Sendo assim, a espécie de madeira selecionada foi a andiroba (*Carapa guianensis* Aubl), uma vez que esta apresentou condições ideais de teor de umidade indicada pela ABNT 7190, em 12% em temperatura ambiente. Vale ressaltar que os teores de umidade das vigas de madeira foram medidos por meio do equipamento de medição da marca Digisystem, averiguando se a peça poderia ser cortada tendo atingido o teor de umidade desejado (Figura 15).

Sendo assim, a madeira foi cortada em serraria local e os corpos de prova para os ensaios seguiram os padrões prescritos pela ASTM 5764-97a, descritos no item 2.3.3, totalizando 151 corpos de prova para testes e realização de ensaios. Em seguida, os corpos de prova foram levados para o laboratório de Engenharia Civil do Campus Universitário de Tucuruí para iniciar os testes de teor de umidade, massa específica, e resistência ao embutimento em 7 níveis de temperatura, entre 30°C e 250 °C, sendo estes escolhidos conforme revisões bibliográficas, indicando as temperaturas que possam apresentar alterações significativas a serem observadas.

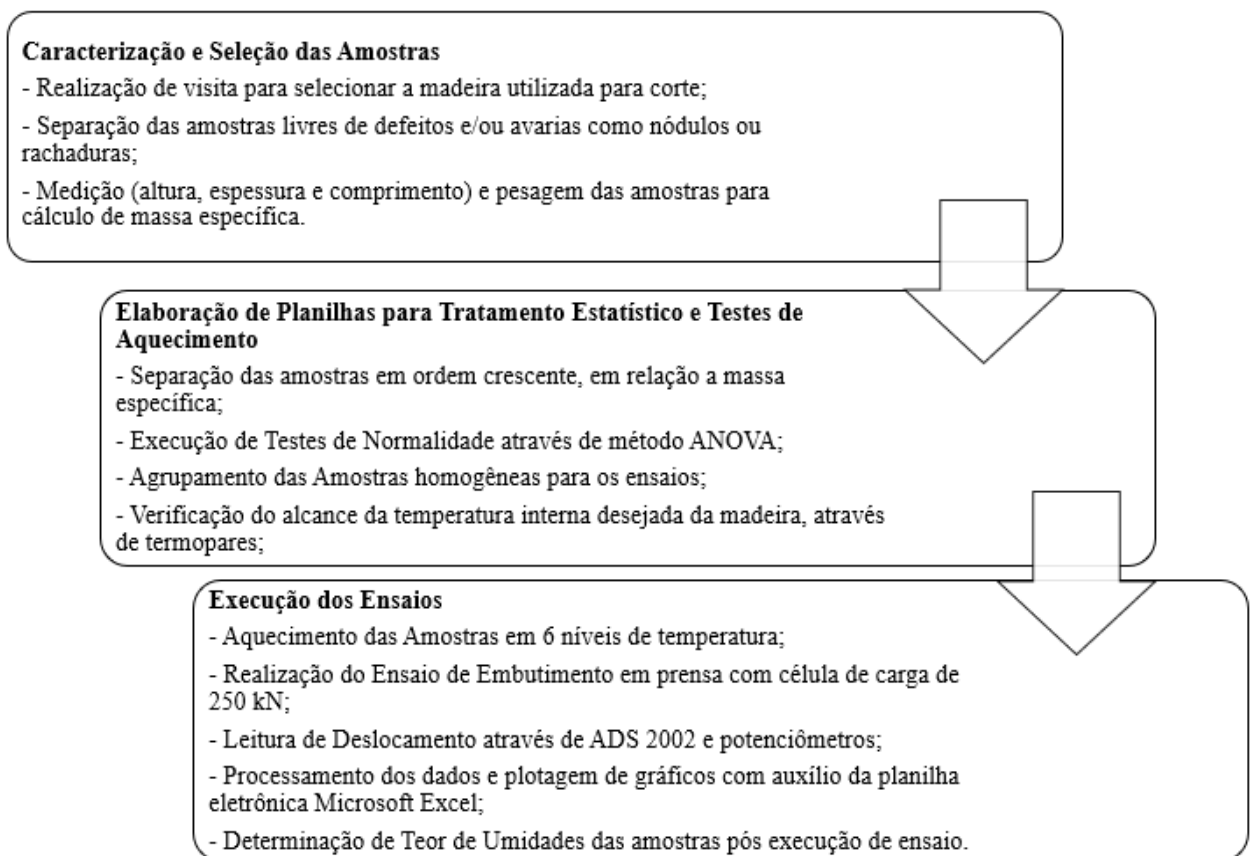
Figura 15 - Equipamento para medição de teor de umidade das vigas e madeira usada.



Fonte: Autora (2019).

Por fim, analisaram-se os resultados dos ensaios de resistência ao embutimento, traçando a curva de força x deslocamento, a fim de definir a força de embutimento. Além disso, verificaram-se nos testes de temperatura, através de termopares, o tempo de alcance da temperatura no interior das peças testadas no momento que o aquecimento externo é igual ao interno. Ademais, verificou-se também, o deslocamento das peças através de potenciômetros ligados ao ADS 2002. Por fim, a Figura 16 ilustra resumidamente as seqüências do programa experimental.

Figura 16 - Sequência dos métodos da pesquisa.



Fonte: Autora (2019).

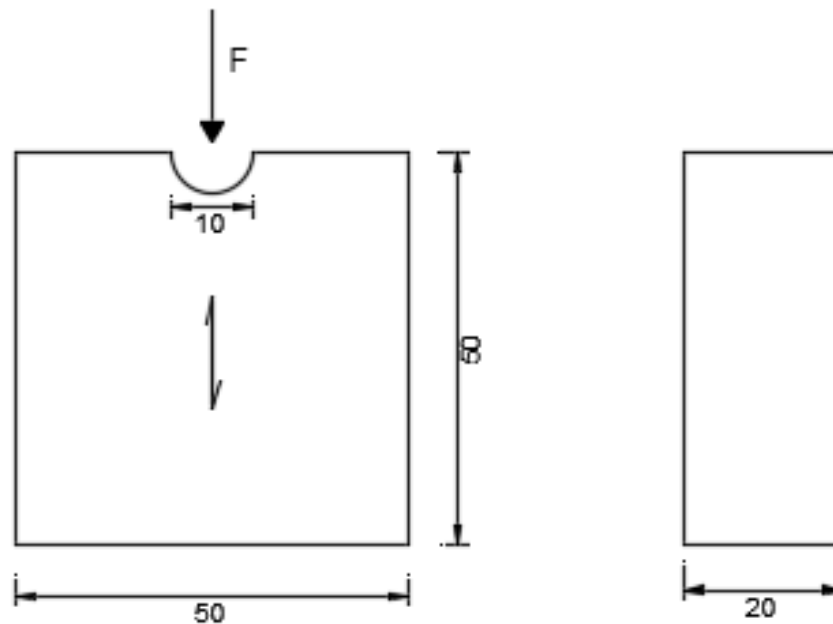
3.1 CORPOS DE PROVA

Durante a pesquisa, foram utilizados corpos de prova de dimensões 50 x 50 x 20 mm segundo a norma ASTM 5764-97a, para realização dos ensaios. Do total de 151 corpos de prova, foram separadas 12 unidades para realizar os ensaios de determinação da resistência ao

embutimento, para cada temperatura (30 °C, 100 °C, 125 °C, 150 °C, 200 °C, 225 °C e 250 °C), para realizar os ensaios de determinação da resistência ao embutimento.

Ademais, para os testes de embutimento, foram utilizados também, parafuso de diâmetro igual a 10 mm, onde os corpos de prova apresentam meio furo para encaixe do parafuso (Figura 17).

Figura 17 - Exemplo dos corpos de prova utilizados.



Fonte: Autora (2019).

3.2 HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para verificar a homogeneidade das amostras, foi necessário analisar suas respectivas massas específicas, realizando a medição de todas as amostras através de paquímetro digital e pesagem por meio de balança de precisão (Figura 18) para efetivar testes de normalidade, os quais são usados para determinar se um conjunto de dados de uma dada variável aleatória, apresenta-se bem modelada por uma distribuição normal ou não, ou para calcular a probabilidade da variável aleatória estar normalmente distribuída. O Apêndice B apresenta os resultados das medições das amostras, em relação a massa específica

Figura 18 - Medição das amostras com paquímetro digital.



Fonte: Autora (2019).

Logo, com auxílio da ferramenta Excel e do programa Action, as amostras foram listadas e calcularam-se as médias e diferenças, de grupos aleatórios, selecionando 84 amostras, as quais correspondem aos 7 níveis de temperatura com 12 CP's cada. Posteriormente, as 84 amostras foram numeradas e agrupadas em 7 conjuntos.

Em seguida, as massas específicas foram ordenadas de forma crescente, no intuito de separar os grupos e finalmente realizar os testes de normalidade, com os testes de Kolmogorov-Smirnov, Teste de Anderson-Darling, Teste de Shapiro-Wilk e Teste de Ryan-Joiner, bem como Testes de Variância e médias (ANOVA), uma vez que a Figura 19 ilustra a utilização dos testes de normalidade em seus respectivos grupos, tendo em vista que p-valores maiores do que 0,05 indicam a normalidade dos grupos das amostras.

Figura 19 - Testes de Normalidade dos 7 grupos.

<i>Testes de Normalidade - Grupo 1</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,17073393	0,9092
Kolmogorov - Smirnov	0,11083586	0,9513
Shapiro - Wilk	0,96704687	0,8775
Ryan - Joiner	0,99070012	0,9569

<i>Testes de Normalidade - Grupo 2</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,22518819	0,768
Kolmogorov - Smirnov	0,12203685	0,891
Shapiro - Wilk	0,94926342	0,6262
Ryan - Joiner	0,98411857	0,8102

<i>Testes de Normalidade - Grupo 3</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,21188444	0,8117
Kolmogorov - Smirnov	0,12609674	0,8626
Shapiro - Wilk	0,95144023	0,6581
Ryan - Joiner	0,98532182	0,8415

<i>Testes de Normalidade - Grupo 4</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,18050564	0,8921
Kolmogorov - Smirnov	0,09989573	0,9848
Shapiro - Wilk	0,95782426	0,7524
Ryan - Joiner	0,98814674	0,9076

<i>Testes de Normalidade - Grupo 5</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,17762905	0,8969
Kolmogorov - Smirnov	0,12150721	0,8945
Shapiro - Wilk	0,96392022	0,838
Ryan - Joiner	0,98983444	0,9438

<i>Testes de Normalidade - Grupo 6</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	0,19867749	0,8506
Kolmogorov - Smirnov	0,10299265	0,9776
Shapiro - Wilk	0,95378287	0,6928
Ryan - Joiner	0,98676314	0,8769

<i>Testes de Normalidade- Grupo 7</i>		
<i>Testes</i>	<i>Estatísticas</i>	<i>P-valores</i>
Anderson - Darling	1,313246546	0,0019
Kolmogorov - Smirnov	0,094331461	0,0621
Shapiro - Wilk	0,940311819	0,0007
Ryan - Joiner	0,974541828	0,0036

Fonte: Autora (2019).

Posto isso, certificaram-se que as amostras correspondem a uma satisfatória homogeneidade e foram aprovadas nos testes de normalidade dos resíduos, igualdade de variâncias e de média (ANOVA), sendo consideradas iguais estatisticamente. Portanto, homogênea e por esta razão a massa específica não será considerada uma variável de análise durante a pesquisa.

3.3 TESTES DE AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS

Inicialmente, foi necessário conhecer o tempo real de aquecimento das amostras, onde houve o equilíbrio entre as temperaturas, isto é, quando a temperatura interna dos corpos de prova e da mufla fossem iguais. Dessa forma, os testes de aquecimento foram realizados para

indicar em qual momento o corpo de prova estaria a determinada temperatura. Em seguida, atingindo a temperatura desejada, os corpos de prova foram colocados em um dessecador para resfriar lentamente e para minimizar a interferência da temperatura ambiente durante o resfriamento.

Para as etapas de aquecimento foram utilizados mufla e termopares do tipo K para aferir a temperatura interna da peça de madeira e externa no ambiente da mufla e relógio comparador para medir o deslocamento das peças da madeira no momento da aplicação da força, durante o ensaio de embutimento, na prensa da marca *Mactest*. Posto isso, as amostras foram perfuradas para inserir o termopar proporcionando a leitura da temperatura interna da madeira (Figura 20), onde os valores são apresentados na Tabela 4, a seguir.

Figura 20 - Equipamento utilizado para testes de temperatura.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 4- Tempo de aquecimento dos corpos de prova.

Temperatura (°C)	Tempo (min)
100	180
125	120
150	94
200	59
225	43
250	50

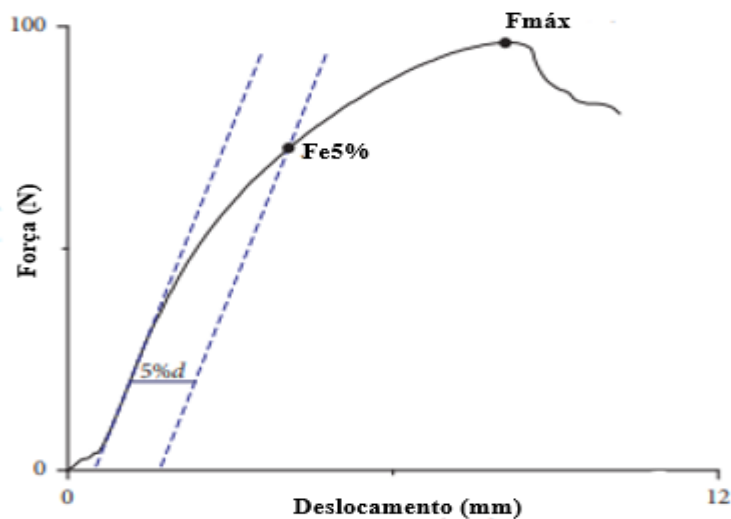
Fonte: Autora (2019).

Vale ressaltar que o teor de umidade inicial dos corpos de prova da *Carapa guianensis Aubl* era de aproximadamente 12% a 30 °C, não esquecendo que o tempo de aquecimento influencia nas propriedades mecânicas da madeira.

3.4 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE EMBUTIMENTO

Segundo a norma ASTM D5764-97a, a força de embutimento para realizar o cálculo da resistência, determina-se pela intersecção da curva x deslocamento por uma reta paralela ao trecho elástico da curva, porém com a origem deslocada de uma equivalente a 5% do diâmetro do pino (Figura 21).

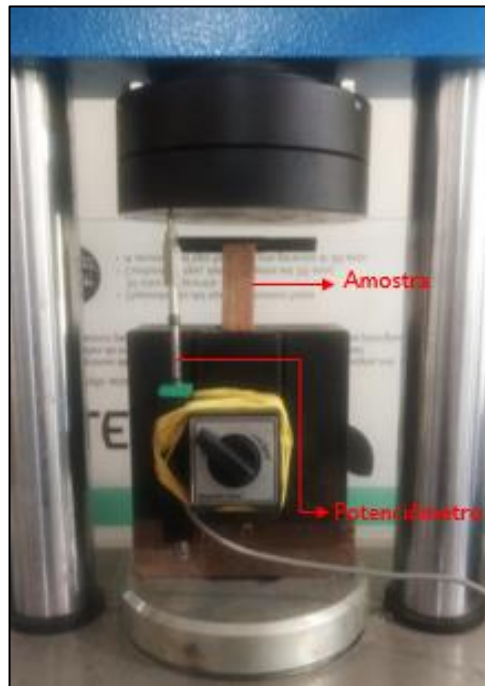
Figura 21 - Força x Deslocamento.



Fonte: Autora (2019), adaptado de Zhou (2006).

A força foi aplicada de modo uniforme no sentido de compressão, com velocidade constante de 1 mm/min, conforme a norma ASTM D5764-97a, sendo mensurada por meio de uma célula de carga de 250 kN, tendo o deslocamento medido através do ADS 2002. (Figura 22). Vale ressaltar que os corpos de prova aquecidos foram submetidos a carga após 24 horas no dessecador para realização do ensaio.

Figura 22 - Ensaio de Embutimento com Potenciômetro ligado ao ADS 2002.



Fonte: Autora (2019).

3.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA

O ensaio foi realizado na prensa da marca *Mactest*, gerando o gráfico de Tensão x Deformação (Figura 21). Sendo assim, com a força de embutimento, descrita em 3.1, foi possível determinar a resistência ao embutimento, através da equação 4:

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t.d} \quad (4)$$

Onde:

f_e = resistência ao embutimento;

$F_{e5\%}$ = Força ao embutimento;

t = espessura do corpo de prova;

d = diâmetro do parafuso.

3.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Para determinação do teor de umidade, utilizou-se os princípios da NBR 7190-97, a qual prediz que o teor de umidade tem como propósito orientar a escolha de métodos preventivos para a preservação da madeira. Sendo assim, através da equação 5, determinou-se o teor de umidade das amostras:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$U(\%)$ = Teor de umidade, em porcentagem;

m_i = massa inicial da madeira, em gramas;

m_s = massa da madeira seca, em gramas.

O ensaio consistiu em pesar a massa inicial da madeira e posteriormente ao ensaio de embutimento, o corpo de prova permaneceu em estufa a $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, o qual teve sua massa medida a cada 6 horas, observando variações entre duas medidas consecutivas, sendo estas menores ou iguais a 0,5% da última massa aferida.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a obtenção das resistências médias, como descrito em 3.5, realizou-se também tratamento estatístico com o propósito de verificar a normalidade entre os resultados, porém, salienta-se que em caso de rejeição de algum dos pressupostos de normalidade dos dados e/ou de homogeneidade das variâncias, a ANOVA não pode ser aplicada como método de comparação das médias das resistências ao embutimento. Então, aplica-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis e o comparativo de grupos média a média por Bonferroni, sendo o caso durante o procedimento estatístico.

3.7.1 Teste Kruskal-Wallis

O teste não paramétrico Kruskal-Wallis (MONTGOMERY; RUGER, 2003) tem como hipótese nula (H_0) a igualdade da função de distribuição entre as populações. No caso de rejeição de H_0 , aplica-se o teste de comparação múltipla pelo método de Bonferroni com um nível de significância de 5% (MONTGOMERY; RUGER, 2003).

4 RESULTADOS

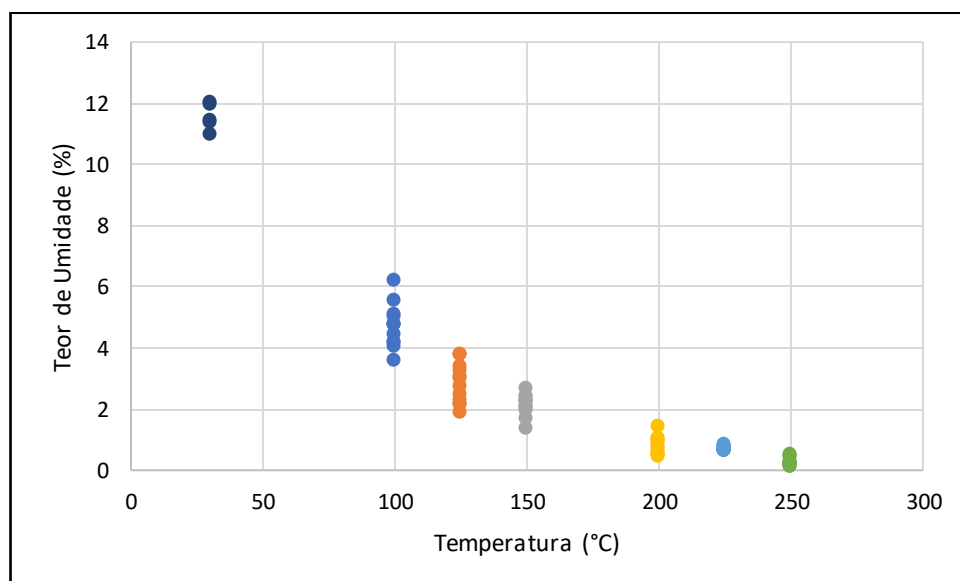
Os resultados e as discussões apresentam a avaliação da influência da temperatura e teor de umidade na resistência de embutimento. Os itens descritos a seguir foram realizados com os dados obtidos a partir da metodologia de determinação da resistência ao embutimento utilizada, seguindo a norma americana ASTM D5764-97a.

Os corpos de prova de embutimento apresentados com base na norma americana (ASTM D5764-97a) com meio furo, apresentam menor consumo de madeira adequando-se as vigas de menores dimensões, disponíveis para extração dos corpos de prova, bem como seu teor de umidade ideal (12%), sendo considerado como vantagem em relação as outras normas, visto que as dimensões dos equipamentos necessitavam também de menores dimensões dos corpos de prova.

4.1 TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO

O Gráfico 1 ilustra o teor de umidade dos corpos de prova após o ensaio de embutimento, passando por um aquecimento correspondente descrito em 3.3. Nota-se que o teor de umidade durante dos ensaios de embutimento paralelo as fibras, diminui com o aumento da temperatura. Além disso, identifica-se que a partir de 150 °C o teor de umidade aproxima-se de zero.

Gráfico 1 - Valores dos teores de umidade em suas respectivas temperaturas.



Fonte: Autora (2019).

Sendo assim, a partir de 150 °C os corpos de prova encontravam-se praticamente anidros, isto é, com baixíssimos níveis de água em sua constituição, uma vez que estes baixos teores de umidade podem estar associados à perda dos componentes orgânicos da madeira. Moreshi (2014), destaca que a madeira possui 3 tipos de água em sua constituição: água livre ou capilar, água de adesão e adsorção química e variam conforme o teor de umidade. Logo, esses tipos de água podem ser eliminados da madeira com o aumento da temperatura, provocando alterações diferentes na resistência mecânica.

4.2 ALTERAÇÃO DA COLORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Durante o aquecimento dos corpos de prova para a execução dos ensaios houve a alteração de cor em cada faixa de temperatura, entre 100 °C a 250 °C. Sendo assim, as mudanças consideráveis na coloração indicam o início da degradação dos polímeros (Figura 23).

Figura 23 - Alteração dos corpos de prova de 100 °C a 250 °C, respectivamente.



Fonte: Autora (2019).

Ademais, os corpos de prova sofrem alteração tanto na parte externa quanto na parte interna (Figura 24), sendo mais marcantes em níveis mais elevados de temperatura, principalmente entre 200 ° a 250 °C.

Figura 24 - Coloração interna dos corpos de prova de 200 °C a 250 °C.



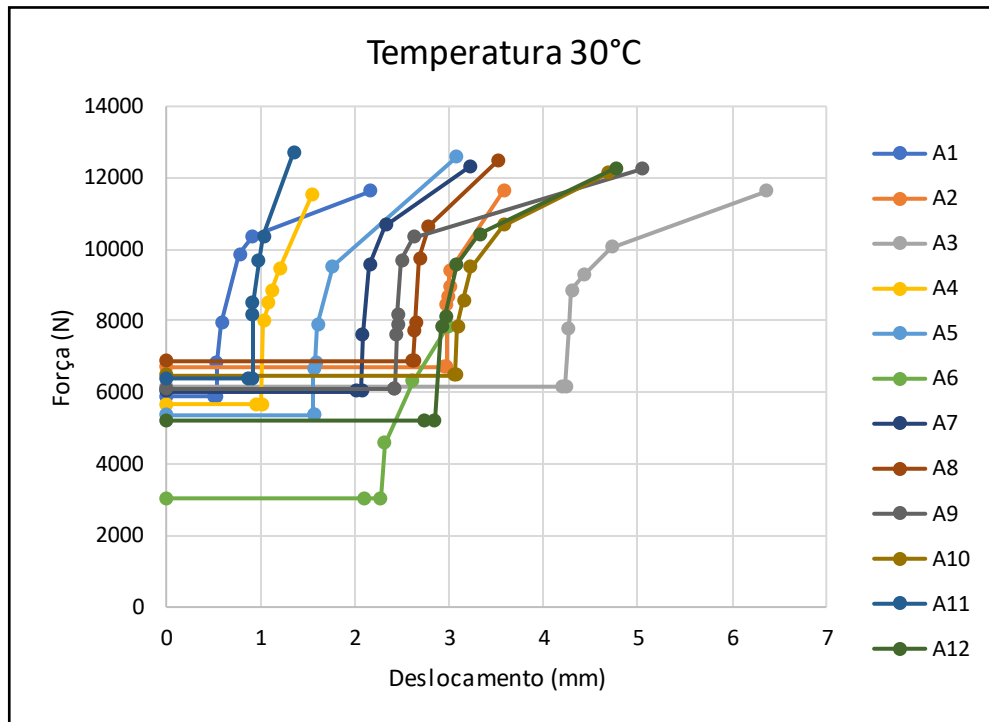
Fonte: Autora (2019).

Segundo Xie, *et al.* (2018), as faixas de 200 °C a 250 °C apresentam-se como temperaturas críticas que contribuem para perda de massa e mudança na cor da madeira.

4.3 RUPTURA DOS CORPOS-DE-PROVA NO ENSAIO AO EMBUTIMENTO

As rupturas dos corpos de prova na temperatura em todos os níveis de temperatura estudados são apresentadas nos Gráficos 2, 3 e 4, obtidas a partir das curvas no apêndice A. As curvas ilustram dois trechos: o trecho linear de início de aplicação de carga e trecho plástico indicando a ruptura do material. Com o comportamento observado, constata-se que a madeira apresenta um comportamento dúctil, uma vez que Moraes (2003) observa que entre 60°C e 120°C a madeira pode apresentar esse tipo de comportamento em relação a temperatura ambiente, o que corrobora com os resultados apresentados, visto que a partir de 150 °C a o material começa a apresentar ocorrências de rupturas bruscas, descritos com mais detalhes em 4.5.

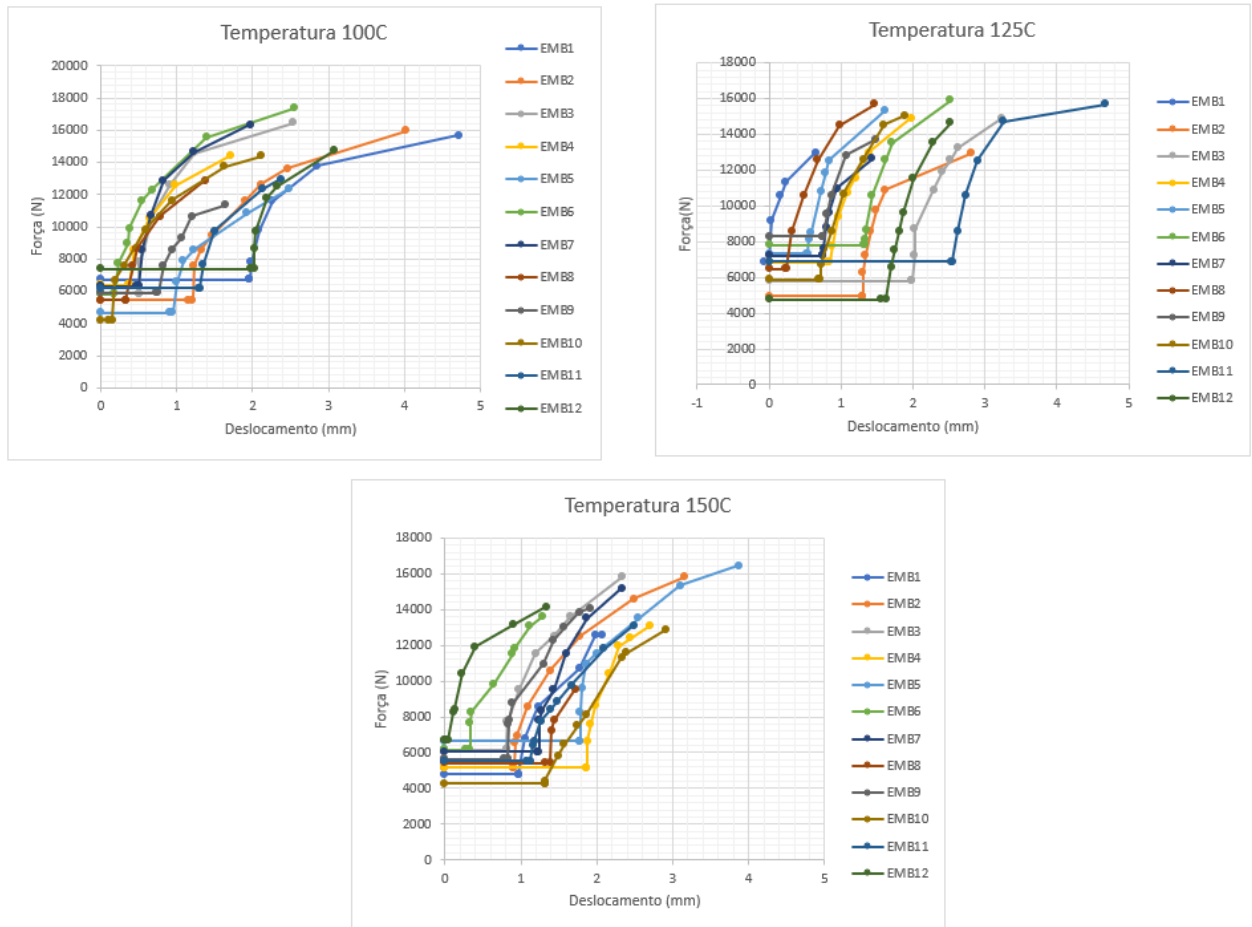
Gráfico 2 - Curva Força x Deslocamento das amostras em Temperatura Ambiente.



Fonte: Autora (2019).

Em comparação a temperatura ambiente (30 °C), a ruptura dos corpos de prova apresentou uma redução, em cerca de 19%, em relação a temperatura de 150 °C, bem como, entre as temperaturas de 200 °C e 250 °C, que aponta uma redução, em cerca de 60% da média.

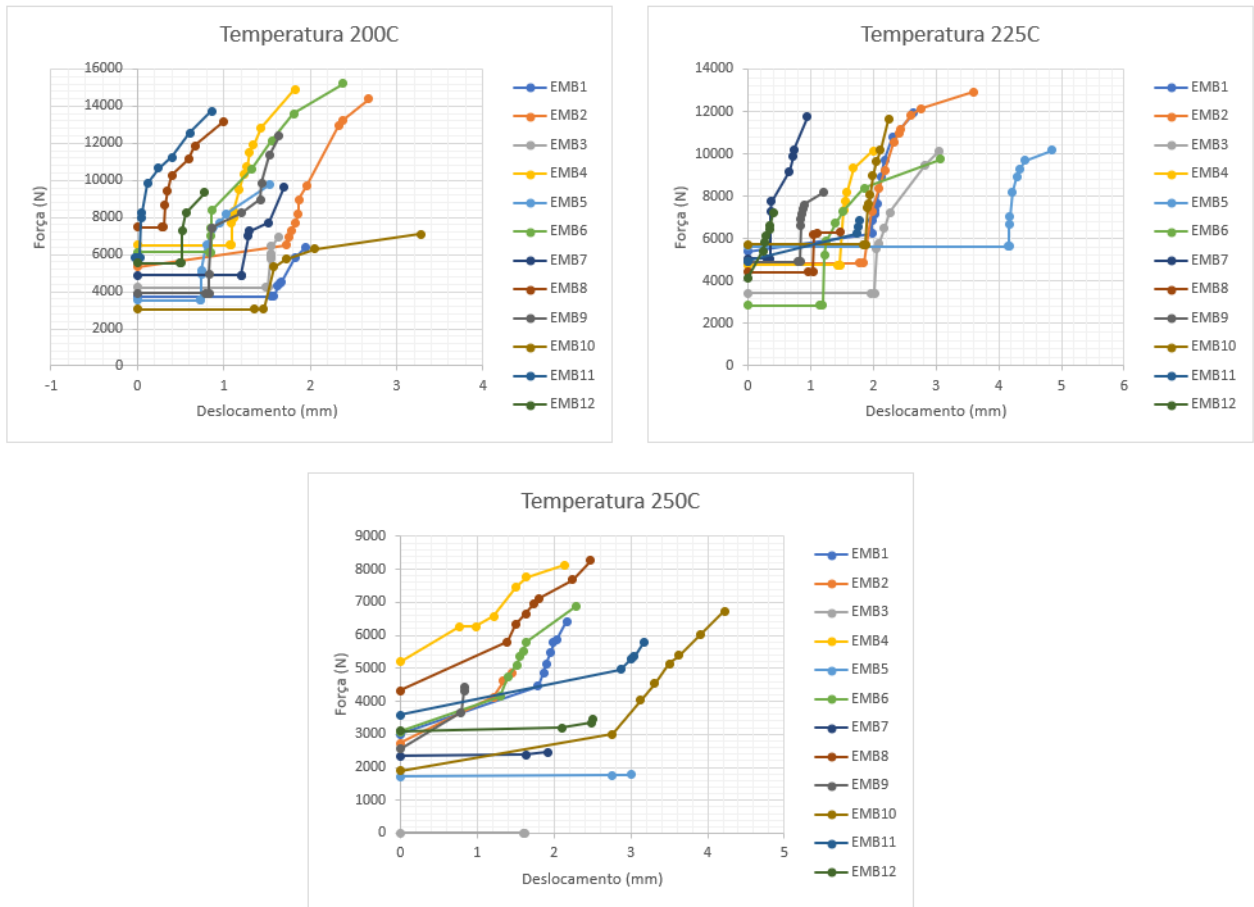
Gráfico 3 - Curvas Força x Deslocamento 100 °C a 150 °C.



Fonte: Autora (2019).

Além disso, acima de 200 °C as rupturas dos corpos de prova é recorrente, uma vez que a degradação térmica da celulose ocorre à temperaturas entre 200 °C e 280 °C progressivamente, o que inclui a desidratação da madeira, sendo que a celulose está presente em maior parte de sua constituição (45%) a qual tem como função sustentar as paredes celulares (FIGUEROA; MORAES, 2009). Ademais, nota-se que as rupturas dos corpos de prova ocorrem antes de 5mm.

Gráfico 4 - Curvas Força x Deslocamento 200 °C a 250 °C.



Fonte: Autora (2019).

Por fim, nota-se que entre 100 °C e 150 °C, houve uma pequena redução da resistência, em cerca de 5%. Por outro lado, entre 200 °C e 250 °C observa-se uma redução de 57% da resistência. Sendo assim, nessa concepção a madeira pode se tornar menos resistente devido aos efeitos da temperatura e do teor de umidade nos polímeros da madeira, discutidos em 2.5, o qual decorre também do amolecimento da lignina, que está relacionado à temperatura de transição vítrea (SCHNEID, 2017).

4.4 TIPOS DE FALHAS

Os tipos de falhas encontrados após os ensaios foram de falhas por fendilhamento e esmagamento das fibras, percebeu-se que em decorrência da temperatura algumas falhas foram mais frequentes que outras. Em temperaturas de até 150 °C houveram variações entre as falhas de esmagamento, definida pela formação de uma semicircunferência onde é posto o parafuso,

o qual foi recorrente em amostras de temperaturas ambientes, combinados com falhas por fendilhamento das fibras (Figura 25). Sendo semelhantes aos observados por Bleron e Duchanois (2006) e por Pedersen (2002).

Figura 25 - Falhas de esmagamento e fendilhamento em amostras em temperatura ambiente.

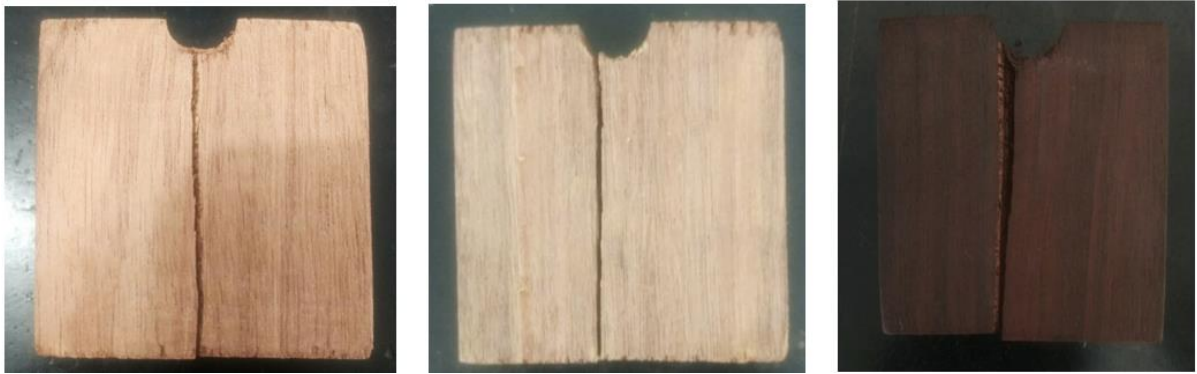


Fonte: Autora (2019).

A 100 ° C, observa-se que não ocorreu falha das amostras por fendilhamento nem nos testes de resistência a embutimento, indicando um comportamento plástico das amostras. Os resultados indicaram que na força de embutimento a temperatura de 100 ° C, a maioria das amostras falhou por esmagamento, indicando um comportamento plástico da madeira nessas temperaturas. Além disso, ocorre falha por fendilhamento principalmente a 150, 200, 225 e 250 ° C. Fato observado também por Moraes *et al.* (2011).

Nos corpos de prova que apresentaram fendilhamento (Figura 26), a falha paralela à grã, ocorre com mais frequência com o aumento da temperatura, sendo que os corpos de prova na faixa de 200 ° C a 250 ° C apresentam em sua grande maioria, falhas por fendilhamento. Isto também é observado por Schneid (2017), o qual apresenta uma tendência do aumento da quantidade da ocorrência de fendilhamento com o acréscimo de temperatura. Outro motivo apresentado seria devido a orientação das fibras da madeira (0°), auxiliando o rompimento das fibras por tração normal. Pois, a influência da temperatura durante os ensaios é destacada devido a madeira se tornar menos dúctil com o aumento da temperatura, ocasionando mais falhas por fendilhamento.

Figura 26 - Rupturas por fendilhamento em corpos de prova acima de 150°C.



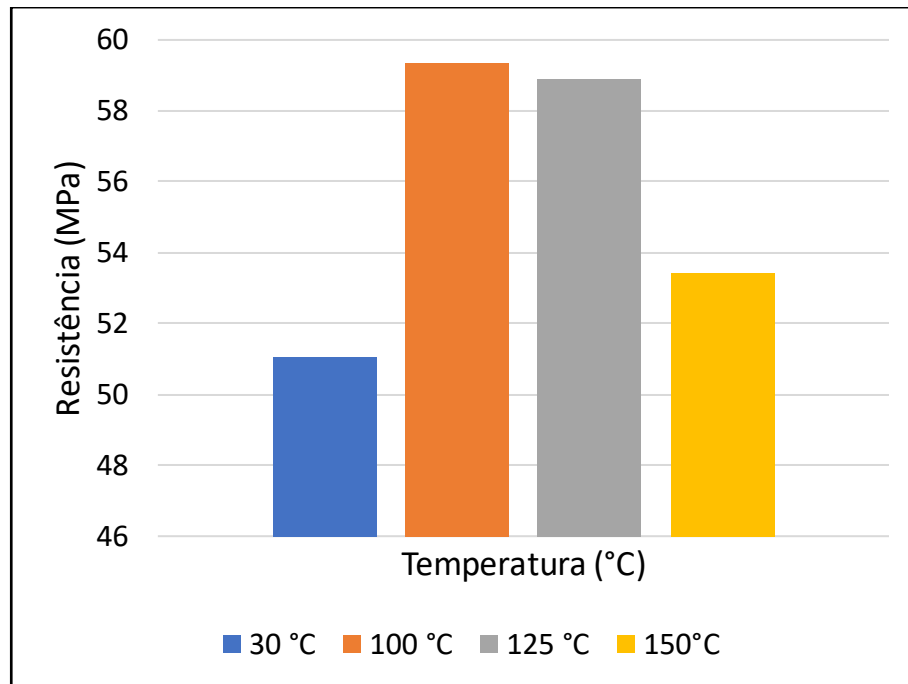
Fonte: Autora (2019).

Segundo Almeida (1987), o fendilhamento da madeira ocorre pela ruptura por tração normal às fibras ao longo de planos paralelos à direção da força transmitida pelo parafuso à madeira. Entre 150 e 160 °C a lignina se funde e começa a ressolidificar e os corpos de prova perdem água de constituição dos componentes químicos e este comportamento da lignina pode explicar a forma de ruptura dos corpos-de-prova (SCHAFFER, 1973).

4.5 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

O Gráfico 5 apresenta um comparativo entre os valores médios das resistências aferidas em nas faixas até 150 °C, verificando que em temperatura ambiente a resistência é menor do que nas temperaturas de apresentadas, em uma diferença significativa, pois a 100 °C há um aumento de 16% da resistência comparado a temperatura de 30°C, fato que pode ser explicado devido a diminuição do teor de umidade (Piazza *et al.*, 2005).

Gráfico 5- Comparativo entre as resistências até 150 °C.



Fonte: Autora (2019).

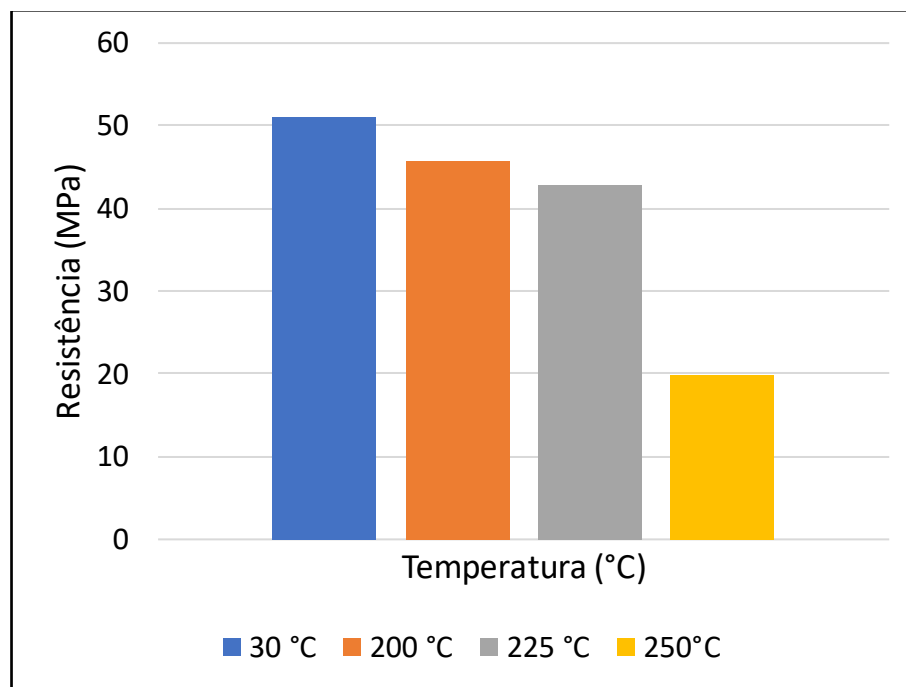
Nessa sequência, os resultados consolidam-se ao ponto de vista de Carrasco *et al.* (2016), que comparando com a resistência relativa da madeira à temperatura ambiente com 100 °C observou que ocorre um acréscimo de 19%, em média e, após os 100 °C, o comportamento se inverte com decréscimo linear até a temperatura de 180°C, porém, ainda 10% maior do que a resistência à temperatura de 20 °C. Sendo que, essa diferença apresenta-se, nessa pesquisa, em um valor igual a 5%, e entre estas faixas de temperaturas (100 a 150 °C), houve uma pequena redução da resistência ao embutimento, próximo de 10%.

Esses resultados também são apresentados por Schneid (2018) o qual relatou que para a espécie *Pinus elliottii*, as resistências ao embutimento paralelas a 80 e 100 °C foram significativamente superior as resistências à 25 °C (temperatura ambiente), destacando que à 80 e 100 °C, o teor de umidade da madeira apresentava um valor de 3% e 0,9%, e na presente pesquisa apresentam-se valores de 12% e 5% (30 a 100 °C, respectivamente). Sendo assim, estes resultados revelam-se devido a diminuição do teor de umidade da madeira, o qual favorece um acréscimo na resistência da madeira. Ademais, salienta-se que entre 150 °C e 160 °C há o início das reações exotérmicas que aumentam com a elevação da temperatura

Em faixas de temperatura a partir de 200 °C identifica-se o início da redução da resistência ao embutimento, demonstrada segundo o Gráfico 6, em relação a temperatura

ambiente, sendo de aproximadamente 10%, uma vez que a transição vítrea dos polímeros da madeira ocorre a temperaturas altas. Segundo Back e Salmén (1982) apud MORAES *et al.* (2011), para celulose ocorre entre 200 e 250 °C, para hemicelulose a temperaturas entre 150 e 200 °C e para a lignina a uma temperatura acima de 205 °C, o que pode explicar o comportamento da *Carapa guianensis* a temperaturas superiores a 200 °C.

Gráfico 6- Comparativos entre as resistências até 250 °C



Fonte: Autora (2019)

Neste seguimento, constata-se que acima de 200 °C, esses fenômenos se refletem na perda acelerada de massa, a qual coincide com a redução da resistência mecânica da madeira decorrente do aumento da temperatura (PONCSÁK *et al.*, 2006), como é o caso da pesquisa em questão, uma vez que a redução da resistência a partir de 200 °C diminui consideravelmente.

Em comparações a outras pesquisas a resistência ao embutimento apresenta valores diversos, segundo Moraes *et al.* (2011), a média da resistência tendo um valor igual a 43,3 MPa, apresentando uma redução de 35,6% a 230 °C. Para Almeida *et al.* (2013), foram encontrados valores resistências variadas em três espécies de madeira variando os valores do embutimento entre 10 a 73 MPa em temperatura ambiente.

Manríquez (2008) também encontrou que a resistência mecânica da espécie paricá (*Schizolobium amazonicum*), diminuiu até 35,07% na temperatura de 230 °C e Manríquez e

Moraes (2009) indicam reduções na resistência à compressão paralela às fibras para diversas espécies em até 75%. A resistência ao embutimento paralela às fibras no limite plástico é de 48,11 MPa a 20 °C. Sendo assim, as oscilações entre os valores comparativos sendo maiores ou menores, indicam-se como aceitáveis devido a variabilidade das propriedades da madeira e pelo fato da utilização de diferentes normas ou certas metodologias empregadas durante os ensaios, bem como a variados tempos de exposição da madeira.

Ademais, na análise estatística entre as resistências, elas apresentaram uma distribuição normal entre as resistências médias dos corpos de prova. No entanto, os resíduos não apresentaram distribuição normal e a hipótese de igualdade das variâncias precisou ser descartada, resultando em uma análise não paramétrica (Kruskal-Wallis) de igualdade das médias, com nível de significância de 5%. Os comparativos entre os grupos, no teste de Bonferroni, são apresentados na Tabela 5, sendo que as médias seguidas com letras iguais não apresentam diferenças estatisticamente significativas, com nível de significância de 5%. Portanto, a temperatura ambiente (30°C) apresentou diferença estatisticamente significativa com o máximo relativo a 125 °C e com o mínimo relativo a 250 °C.

Tabela 5- Comparativos entre os grupos de resistência.

Temperatura (°C)	Resistência ao Embutimento (MPa)
30	52,47 bcd
100	59,37 ab
125	58,89 a
150	53,43 abc
200	45,85 cd
225	42,76 d
250	19,87 e

Fonte: Autora (2019).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

As informações coletadas durante a pesquisa foram essenciais para constatar que a utilização da madeira em elementos estruturais apresenta-se de maneira satisfatória, apesar do receio de sua utilização devido a aparente fragilidade que o material aparenta possuir, principalmente em relação com a resistência a temperatura. Nesse sentido, as pesquisas dentro deste cenário são necessárias para contribuir com a caracterização das inúmeras espécies de madeira utilizadas dentro da construção civil.

Sendo assim, por meio de testes de embutimento em corpos de prova de 50x50x20 mm entre temperaturas de 30°C e 250 °C, de maneira paralela as fibras e pino metálico de 10 mm de diâmetro, apresentaram os resultados obtidos na presente pesquisa que se limitaram a amostra estudada, a qual apresentou uma resistência ao embutimento igual a 52,47 MPa e ruptura de 56,51 MPa.

Os dados permitem concluir que:

- a) A madeira, quando exposta ao calor, apresenta a degradação térmica de seus polímeros, a redução de suas propriedades mecânicas e a carbonização de sua superfície;
- b) A 30°C a resistência ao embutimento paralelo às fibras é de 52,47 MPa e a 250 °C há uma redução de 60%, porém a 100°C há um acréscimo de 16% na resistência;
- c) A resistência ao embutimento paralelo às fibras diminui, com o aumento considerável da temperatura, sendo que este comportamento está relacionado com o teor de umidade dos corpos de prova e a transição vítrea dos polímeros da madeira;
- d) No embutimento paralelo às fibras, a ruptura é caracterizada por um comportamento plástico, manifestado pela elevada penetração do parafuso sem causar o rompimento por fendilhamento nos corpos de prova, exceção aos resultados a partir de 150 °C. Além disso, observou-se que com o aumento da temperatura a 250°C há perda de massa do material bem como escurecimento significativo da madeira.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros devem ser realizados para dar continuidade às pesquisas sobre a resistência ao embutimento às temperaturas elevadas, objetivando complementar os estudos sobre a gama de espécies de madeira. Logo, recomenda-se que trabalhos sejam desenvolvidos nos seguintes âmbitos:

- Avaliar a influência da temperatura na resistência ao embutimento em outras espécies;
- Avaliar a influência de tempos de aquecimento iguais da madeira em testes de embutimento;
- Analisar comparativamente a influência da temperatura a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras da madeira;
- Realizar um estudo utilizando diferentes normas para ensaios de embutimento da madeira, como a norma brasileira ou europeia.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D., & DIAS, A. (2016). Comparison between test methods to determine wood embedment strength parallel to the grain. **Revista Arvore**, 40, 741–748. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400018>
- ALMEIDA, D., CAVALHEIRO, R., SCALIANTE, R., CHRISTOFORO, A., CALIL, C., & ROCCO LAHR, F. (2013). Full Characterization of Strength Properties of *Schizolobium amazonicum* Wood for Timber Structures. **International Journal of Engineering & Technology**, 13, 97–100.
- ALMEIDA, D., FERRO, F., VARANDA, L., CHRISTOFORO, A., ROCCO LAHR, F., MOLINA, J., & CALIL, C. (2014). Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, 38, 347–352. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200015>
- ALMEIDA, D.H. De. **Proposta De Método De Ensaio Para A Determinação Da Resistência Da Madeira Ao Embutimento**. Orientador: Antonio Alves Dias. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ALMEIDA, D.H.De.; SCALIANTE, R. de M.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R.; MOLINA, J.C.M.; CALIL JUNIOR, C. Comparação das resistências ao embutimento paralelo às fibras de madeiras de *pinus oocarpa*, *cumaru* e *pinus taeda*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, ed. 3, p. 113-119, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D5764-97a**. Standard Methods for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products. Philadelphia, USA, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projetos de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- AUSTRY, C. Fire resistance of timber connections. **HANDBOOK of Fire Protection Engineering**, [s. l.], 2007.
- BAKAR, B.F.A.; HIZIROGLU, S.; TAHIR, P.M. Properties of some thermally modified wood species. **Materials and Design**, [s. l.], p. 348-255, 2012.
- BEKHTA, P., & NIEMZ, P. (2003). Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforschung*, 57, 539–546. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.080>
- BENITEZ, A., & ITAGAKI, N. (2014). Evaluation of embedding strength on Uruguayan wood to apply the European yield theory for double shear bolted joint. **Journal of Wood Science**, 60. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1372-0>
- BLÉRON, L., & DUCHANOIS, G. (2006). Angle to the grain embedding strength concerning dowel type fasteners. 56, 44–50.

BRITTO, L.D. **Patologia Em Estruturas De Madeira: Metodologia De Inspeção E Técnicas De Reabilitação**. 2014. 502 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CACHIM, P.B.; LOPES, N.; BRANCO, J.; VILA REAL, P.; PALMA, P. Aplicação Do Eurocódigo 5 Na Avaliação De Ligações Tradicionais De Madeira Ao Fogo. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, [s. l.], v. 20, p. 41-49, [2012]

CARRASCO, E.V.M.; OLIVEIRA, A.L.C.; MANTILLA, J.N.R. Influência Da Temperatura Na Resistência E No Módulo De Elasticidade Em Madeira De Híbridos De Eucaliptos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, ed. 2, p. 389-400, 2016.

CORREIA, R.R.; DIAS, A.A. Avaliação Da Resistência De Ligações Com Parafusos Auto-Atarraxantes Do Tipo Torx Solicitados Por Tração Axial, Em Peças De Madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, ed. 31, p. 1-30, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 383: timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners**. Brussel, 2007.

EVANGELISTA, W., SILVA, J. C., MARIUS, L., LOBO, L. M., & SOUZA, M. O. A. (2010). Propriedades Físico-Mecânicas da Madeira de Eucalyptus urophylla S.T. Blake no Sentido Radial e Longitudinal. **Revista Ciência Da Madeira - RCM**, 1, 1–19. <https://doi.org/10.12953/2177-6830.v01n02a01>

FIGUEROA, M.J.M *et al.*. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, ed. 4, p. 157-174, 2009.

FIGUEROA, M.J.M. **Coefficientes De Modificação Das Propriedades Mecânicas Da Madeira** Devidos À Temperatura. Orientador: Poliana Dias de Moraes. 2012. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

FIGUEROA, M.J.M. **Influência Da Temperatura Sobre A Resistência Mecânica Do Paricá**. Orientador: Poliana Dias de Moraes. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FIRMANTI, A., SUBIYANTO, B., TAKINO, S., & KAWAI, S. (2004). The critical stress in various stress levels of bending member on fire exposure for mechanical graded lumber. **Journal of Wood Science**, 50, 385–390. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0589-8>

FRÜHWALD HANSSON, E. (2007). Effect of high-temperature drying on properties of Norway spruce and larch. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, 65, 411–418. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0174-8>

GERHARDS, C.C. Effect of the Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. **Wood and Fiber**, v.14, n.1, p.4–36, 1982.

GESUALDO, Francisco AR. Estruturas de madeira–**Notas de aula**. Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

GLIŠOVIĆ, I., STEVANOVIC, B., & KOCETOV, T. (2012). Embedment test of wood for dowel-type fasteners. **Wood Research**, 57, 639–650.

GOÉS, J.L.N. De.; JUNIOR, J. Da. S. Avaliação Experimental Da Resistência De Ligações Em Madeira Com Parafusos Passantes. **CLEM CIMAD**, Buenos Aires Argentina, 2017.

GOODRICH, T., NAWAZ, N., FEIH, S., LATTIMER, B., & MOURITZ, A. P. (2010). High-temperature mechanical properties and thermal recovery of balsa wood. **Journal of Wood Science**, 56, 437–443. <https://doi.org/10.1007/s10086-010-1125-2>

KEKKONEN, P. Characterization Of Thermally Modified Wood By Nmr Spectroscopy: Microstructure And Moisture Components. 2014. Dissertation (Doctoral Training Committee of Technology and Natural Sciences) - University of Oulu, OULU, 2014.

KENNEDY, S., SALENIKOVICH, A., MUNOZ, W., MOHAMMAD, M., & SATTLER, D. (2014). Design equations for embedment strength of wood for threaded fasteners in the canadian timber design code.

KOZERSKI, C.E. **Análise Comparativa De Ligação Com Pinos Metálicos, Pregos E Parafusos Em Estruturas De Madeira**. 2012. 35 f. Monografia (Especialista em Estruturas) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Toledo, 2012.

LEAL, S.C. Da S. **Avaliação Do Comportamento Mecânico De Madeira Antiga De Carvalho Proveniente De Incêndio**. Orientador: José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Especialização em Construções Civas) - Universidade do Porto, Porto, 2010.

LOBÃO, M., MARIUS, L., MOREIRA, M., & GOMES GOUVÊA, A. (2004). Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Arvore - REV ARVORE*, 28. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014>

LOGSDON, N.B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Orientador: Carlito Calil Júnior. 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LOGSDON, N.B.; FINGER, Z.; JESUS, J.M.H. Influência Do Ângulo Entre O Esforço Aplicado E A Direção Das Fibras Da Madeira Sobre A Resistência Ao Cisalhamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, ed. 4, p. 969-978, 2014.

MARAVEAS, C., MIAMIS, K., & MATTHAIYOU, C. E. (2013). Performance of Timber Connections Exposed to Fire: A Review. *Fire Technology*, 51, 1–32. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0369-y>

MARQUES, S.S.; OLIVEIRA, J.T.S.; PAES, J.B.; ALVES, E.S.; SILVA, A.G. Da.; FIEDLER, N.C. Estudo Comparativo Da Massa Específica Aparente E Retratibilidade Da Madeira De Pau-Brasil (Caesalpinia Echinata Lam.) Nativa E De Reflorestamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, ed. 2, p. 373-380, 2012

MOLINA, J. (2014). Comparação das resistências ao embutimento paralelo às fibras de madeiras de pínus oocarpa, cumaru e pínus taeda. *Ambiente Construído*, 14, 113. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300009>

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

MORAES, P. DIAS de. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES ASSEMBLAGES BOIS. Orientador: Pascal Triboulot. 2003. 211 f. Tese (Doctorat en sciences et technologies industrielles) - Université Henri Poincaré, Nancy, 2003.

MORAES, P., RODRIGUES, J. P., & CORREIA, N. (2012). Behavior of bolted timber joints subjected to high temperatures. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0539-x>

MORAES, P., ROGAUME, Y., BOCQUET, J.-F., & TRIBOULOT, P. (2005). Influence of temperature on the embedding strength. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 63, 297–302. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0568-9>

MOREIRA, M.S.S. **Ligações Estruturais De Peças De Madeira Por Meio De Adesivo Em Áreas Reduzidas Associado A Elementos De Pinos**. 2004. 462 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal do Minas, Belo Horizonte, 2004.

MORESCHI, J.C. **PROPRIEDADES DA MADEIRA**. 4. ed. atual. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2012. 208 p.

OLIVEIRA, J. T. da S *et al.*. Variação Do Teor De Umidade E Da Densidade Básica Na Madeira De Sete Espécies De Eucalipto. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v. 29, ed. 1, p. 115-127, 2005.

OLIVEIRA, M.A.M. **Ligações Com Pinos Metálicos Em Estruturas De Madeira**. 2001. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OLIVEIRA, M.M.M; DIAS, A.A. Ligações Com Pinos Metálicos Em Estruturas De Madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, ed. 26, p. 33-64, 2005
PALLAROLAS, E.A.F.F. **Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeiras de reflorestamento**. Orientador: Julio Cesar Molina. 2017. 106 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

PAULA, M., LOIOLA, P., MOREIRA, G., GUTEMBERG, P., & SEGUNDINHO, A. (2014). Análise Termomecânica da Madeira de *Corymbia citriodora* Submetida a Gradientes Térmicos. **Floresta e Ambiente**, 21, 358–368.

PEDERSEN, M.U. Dowel Type Timber Connections: **Strength modelling**. [S. l.]: DTU, 2002. 167 p.

PEDRESCHI, R. *et al.*. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA MADEIRA NA HABITAÇÃO UTILIZANDO ABORDAGENS DE SISTEMAS. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, Cerne, Lavras, v. 11, ed. 3, p. 283-293, 2005.

PONCSAK, S., KOCAEFE, D., BOUAZARA, M., & PICHETTE, A. (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Sci. Technol.**, 40, 647–663. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0082-9>

PURKISS, J.A. **Fire safety engineering: Design of Structures**. 2. ed. atual. United Kingdom: Elsevier, [2007]. 425 p. ISBN –13: 978-0-7506-6443-1

RAMMER, D., & WINISTORFER, S. (2001). Effect of moisture on dowel-bearing strength. *Wood and Fiber Science: Journal of the Society of Wood Science and Technology*, 33, 126–139.

SCHAFFER, E. L. *et al.*. Strength Validation and Fire Endurance of Glue- Laminated Timber beams. **United States Department of Agriculture**: Forest Service, United States, 1986.

SCHNEID, E. **Influência Da Temperatura E Do Ângulo Da Grã Na Resistência Ao Embutimento Da Madeira**. Orientador: Poliana Dias de Moraes. 2017. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SCHWEIGLER, M. Experimental characterization and parameterization of the load-to-grain angle dependent embedment behavior of dowel-type fasteners in laminated veneer lumber (LVL). **Institute for Mechanics of Materials and Structures**, Vienna, Austria, 2016.

SILVA, J. De. C. **Caracterização Da Madeira De Eucalyptus Grandis Hill Ex. Maiden, De Diferentes Idades, Visando A Sua Utilização Na Indústria Moveleira**. Orientador: Sidon Keinert Júnior. 2002. 181 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

STAMATO, G.C.; JUNIOR, C.C. RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA COMPENSADA. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, ed. 18, p. 49-76, 2002.

SZÜCS, C.A. *et al.* **Estruturas de madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, 2006.

VALLE, A. **Rigidez De Ligações Com Parafusos Em Estruturas De Madeira Laminada Colada**. 1999. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

WHITE, R. (2016). Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_55

WHITE, R. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members. *In: HANDBOOK of Fire Protection Engineering*. 3. ed. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. cap. 11, p. 1-19. ISBN 087765-451-4

WOOD Handbook: Wood as an Engineering Material. 100. ed. atual. Wisconsin: USDA, 2010. 508 p.

XAVIER, C. N., NASCIMENTO, A., NASCIMENTO, L., & SILVA, M. A. (2016). Efeito do Teor de Umidade e da Direção de Carregamento na Resistência de Ligações Pregadas em Madeiras de Reflorestamento. **Revista Ciência Da Madeira - RCM**, 7, 51–60. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n1p51-60>

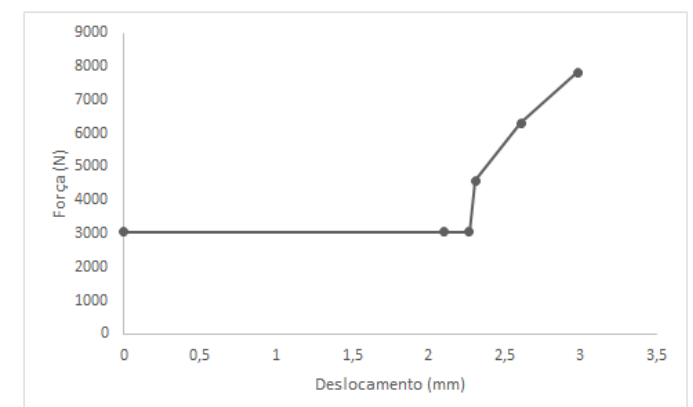
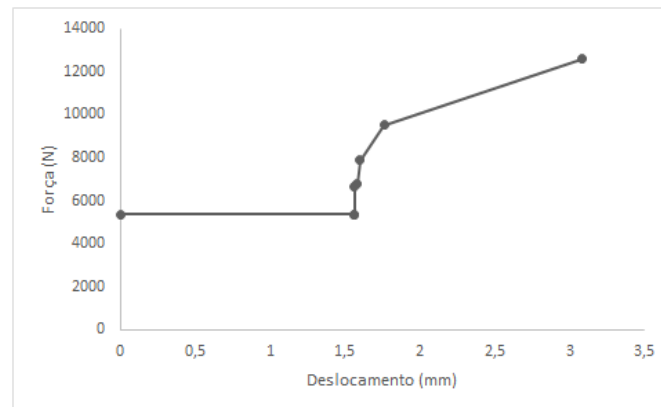
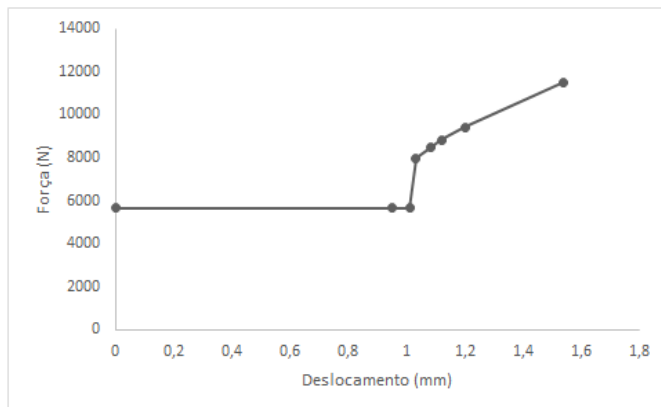
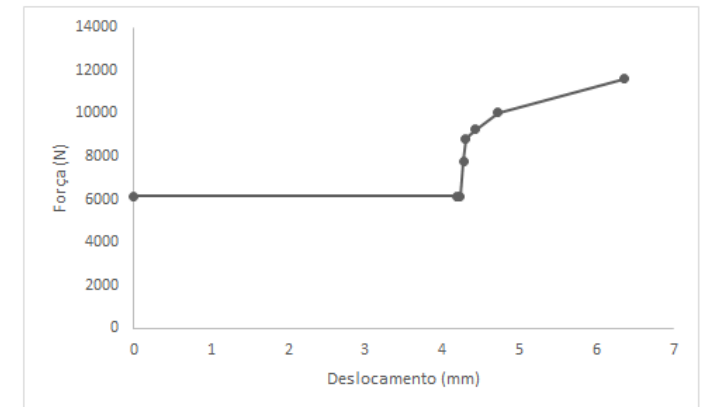
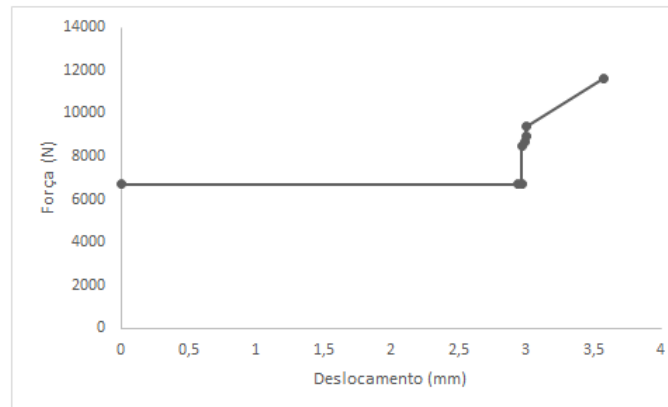
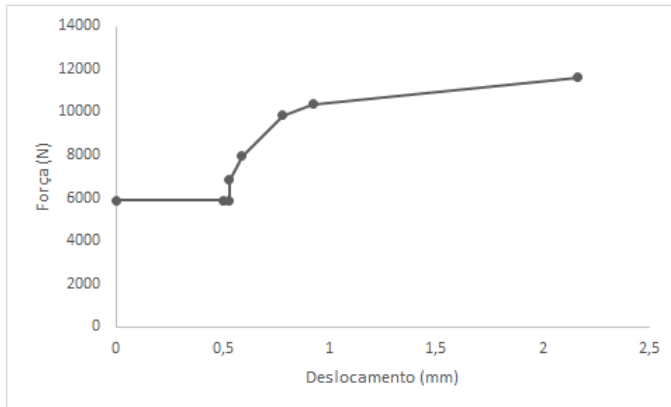
XIE, Q., ZHANG, L., YANG, Z., WANG, L., & WU, Y. (2018). Behavior of Chinese Dahurian Larch Wood after High-Temperature Exposure: Degradation of Mechanical Properties and Damage Constitutive Model. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/8614740>

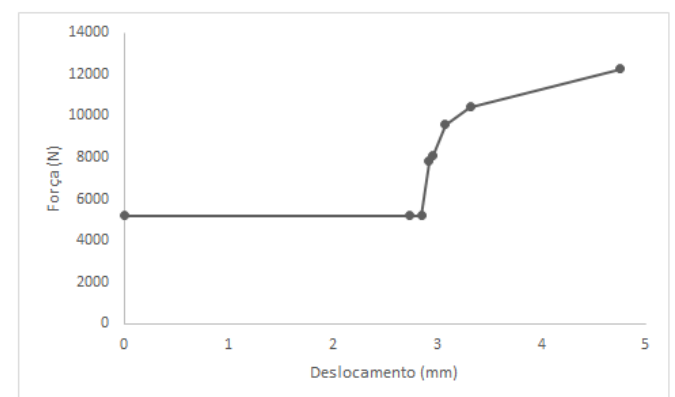
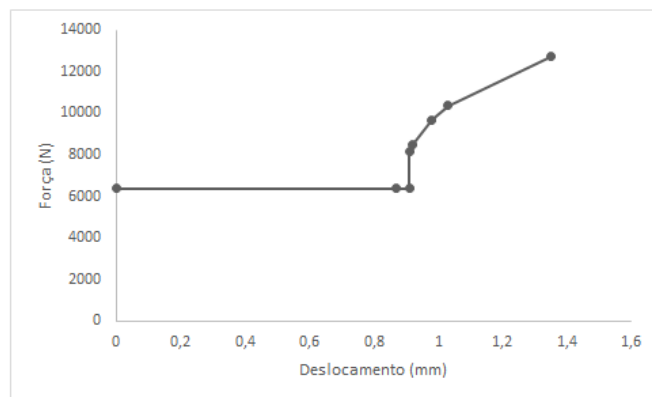
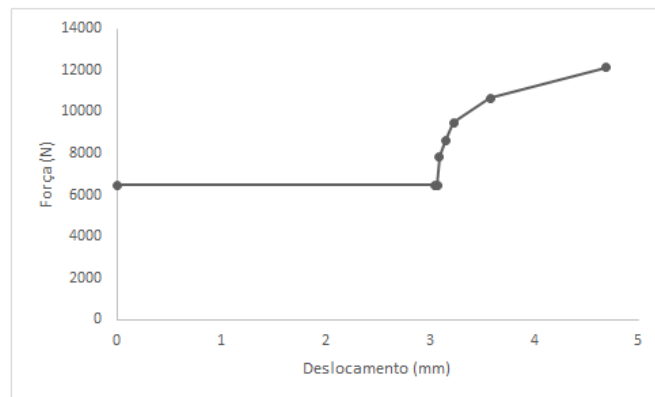
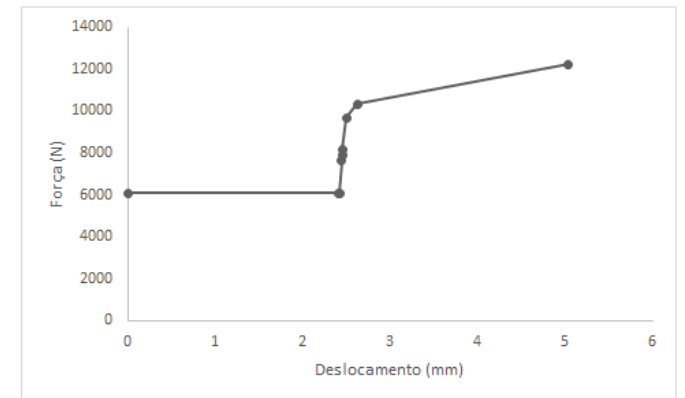
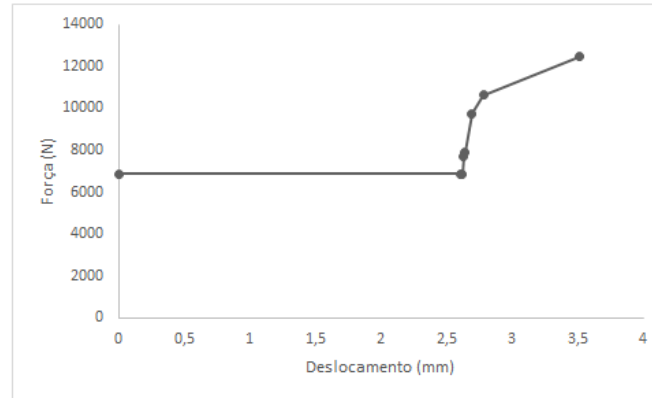
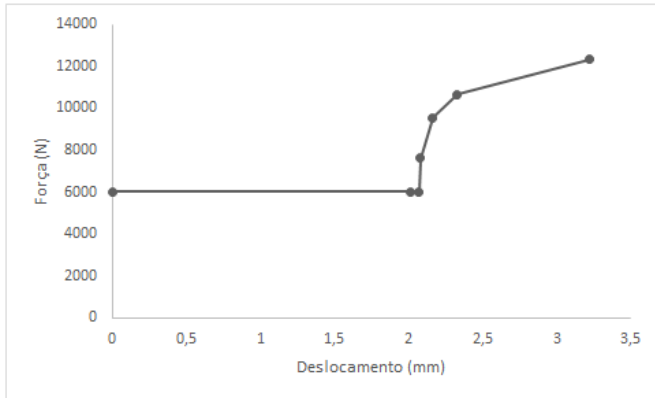
ZHOU, T., & GUAN, Z. (2006). Review of existing and newly developed approaches to obtain timber embedding strength. *Progress in Structural Engineering and Materials* - **PROG STRUCT ENG MATER**, 8, 49–67. <https://doi.org/10.1002/pse.213>

ZITTO, M., KÖHLER, J., & PITER, J. (2011). Embedding strength in joints of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis with dowel-type fasteners. Analysis according to the criterion adopted by European standards. **European Journal of Wood and Wood Products**, 70. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0572-9>

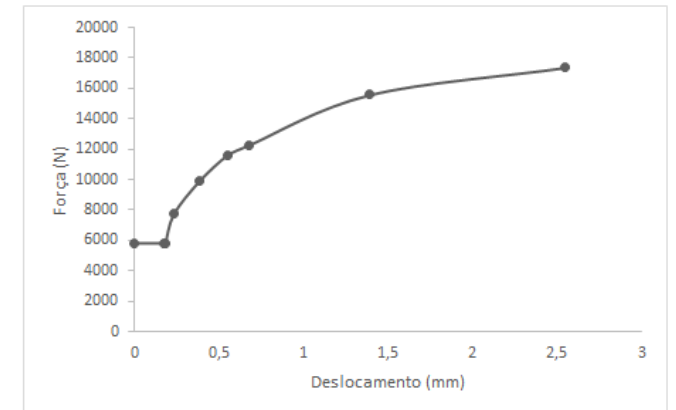
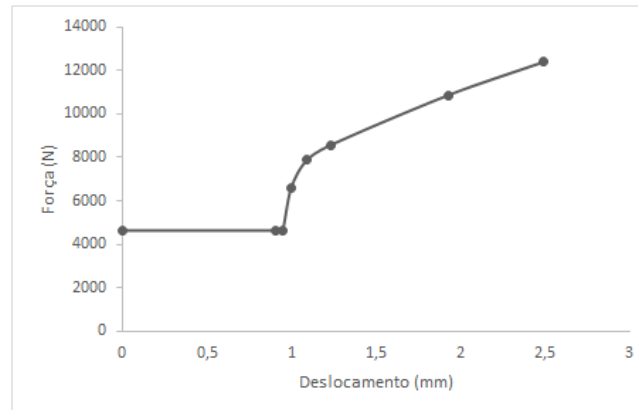
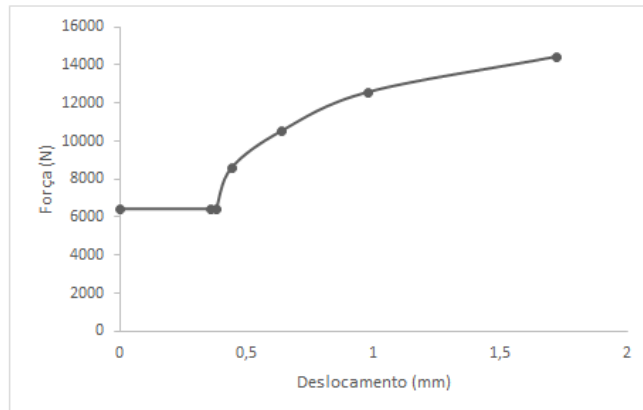
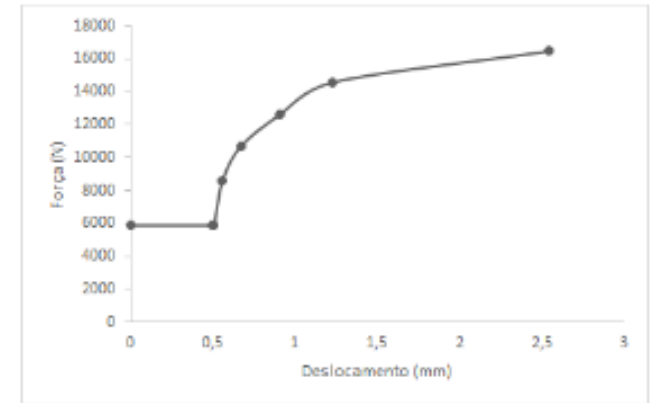
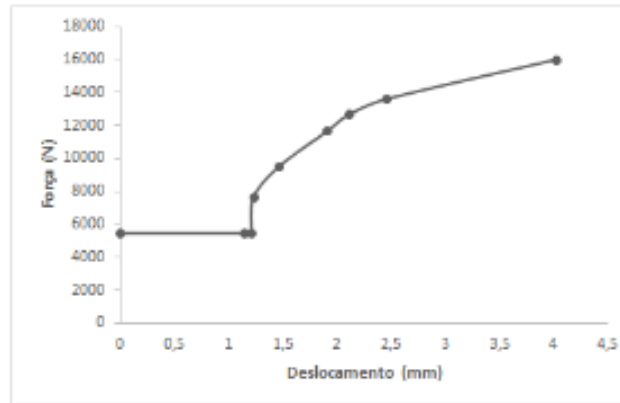
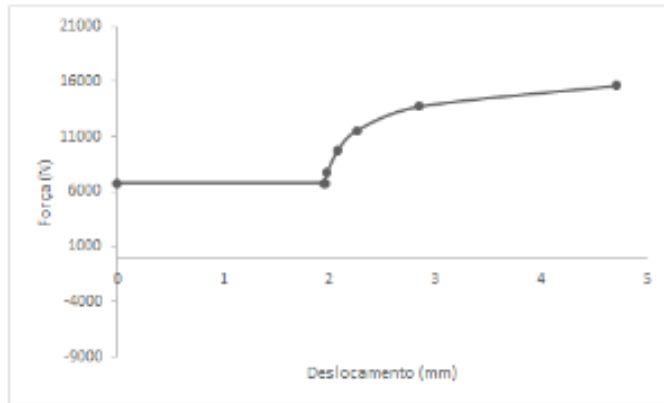
APÊNDICE A – CURVAS FORÇA X DESLOCAMENTO

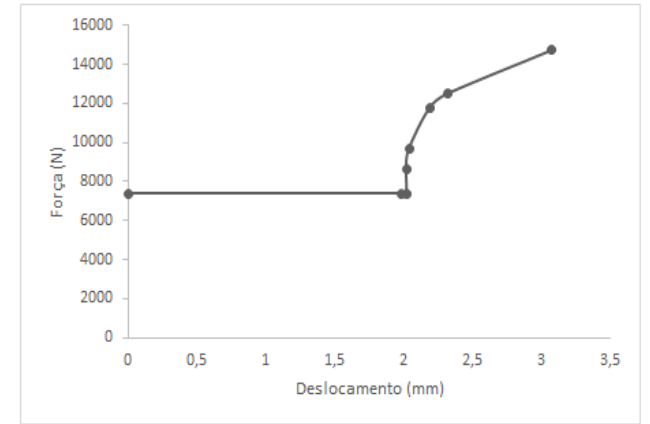
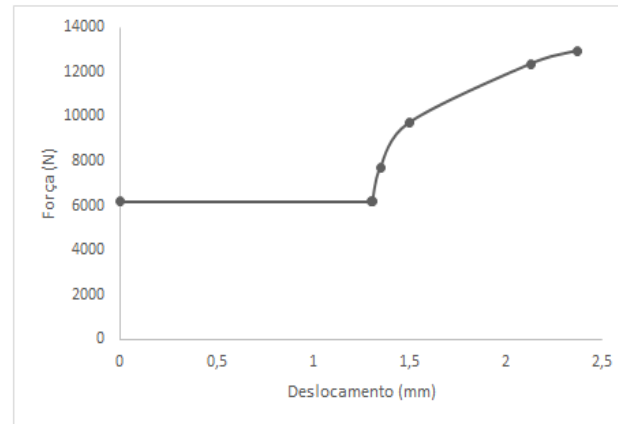
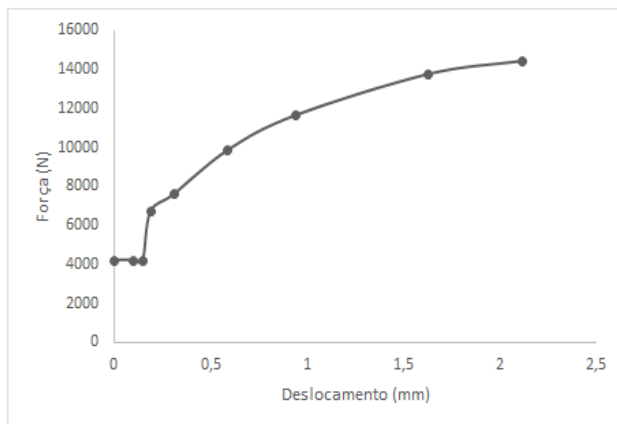
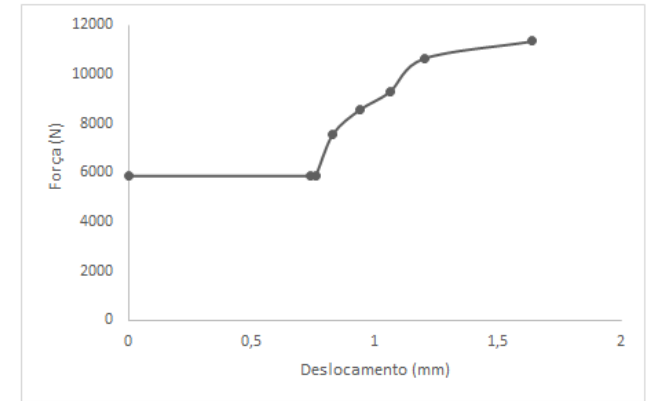
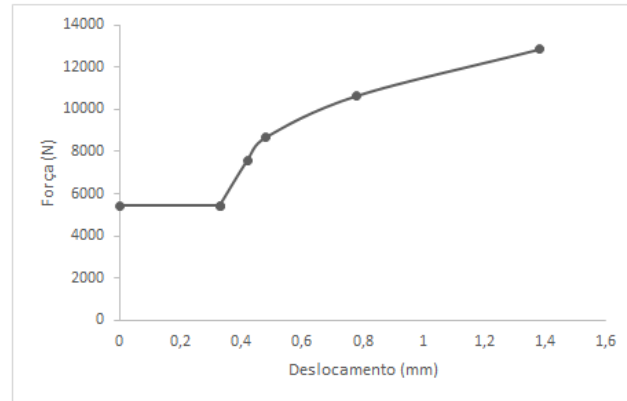
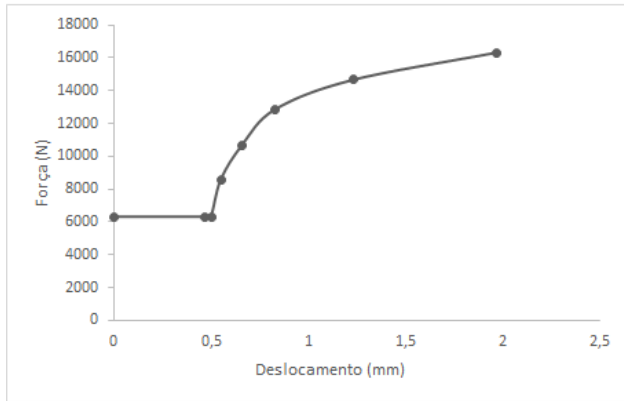
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 30 °C



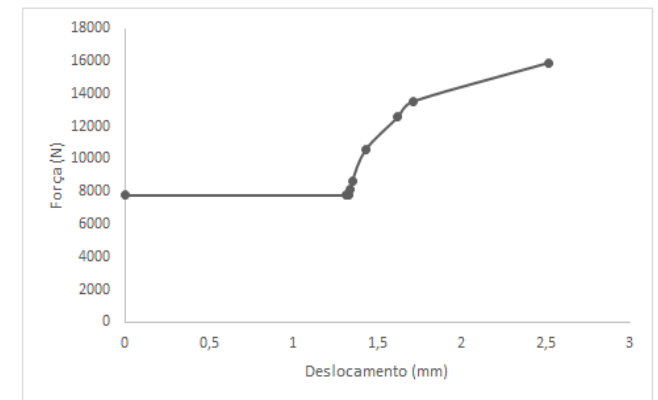
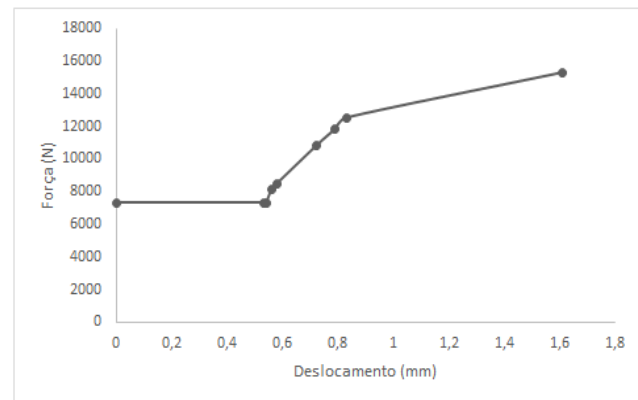
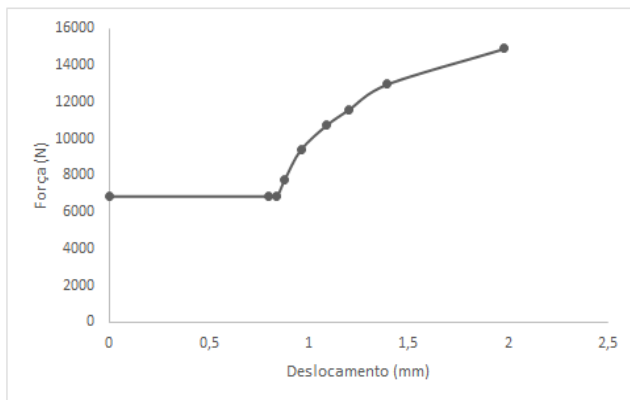
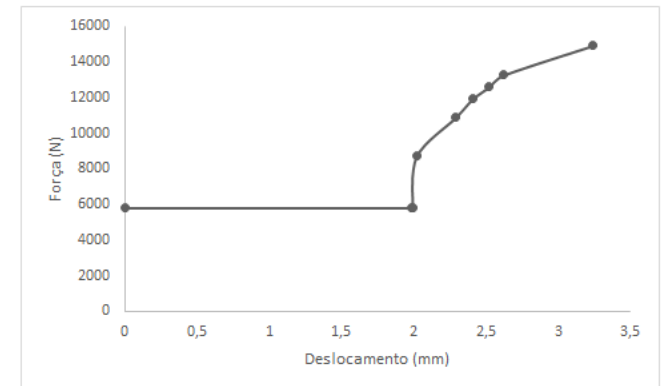
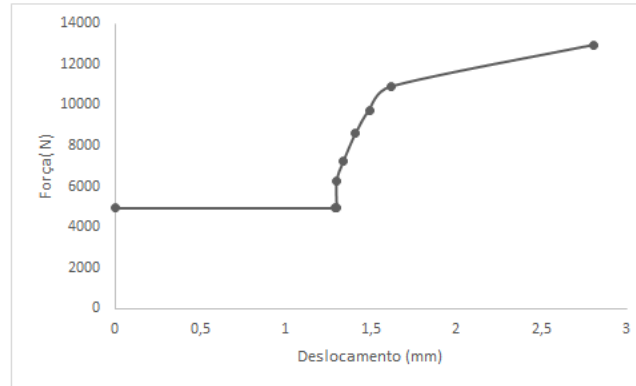
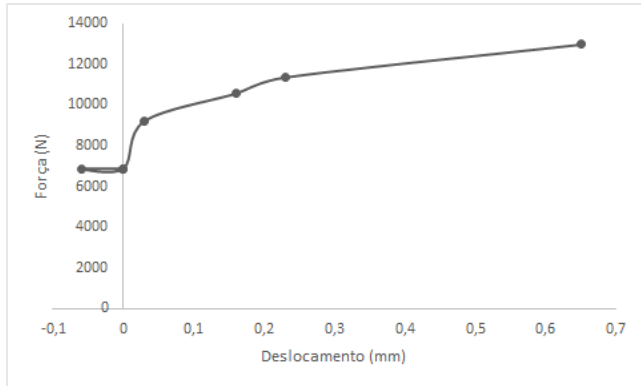


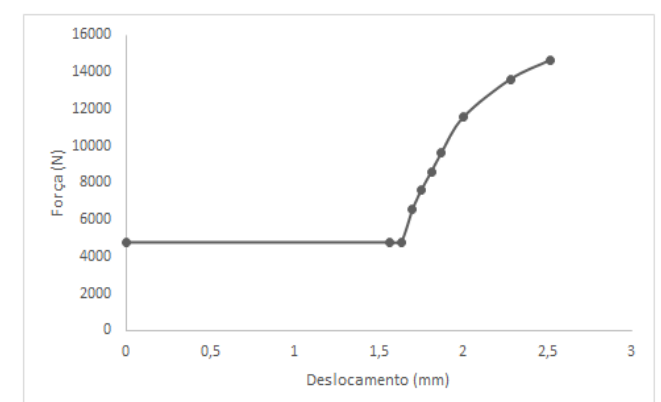
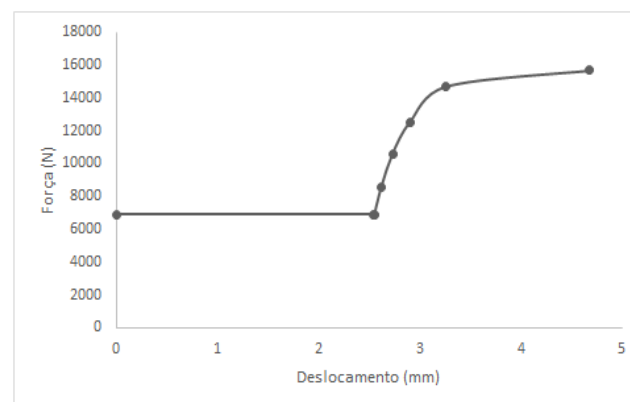
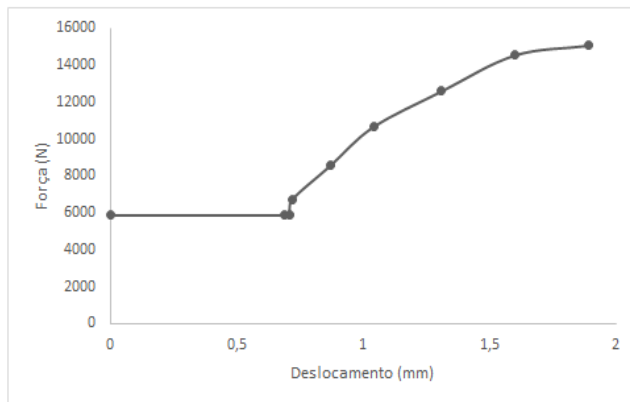
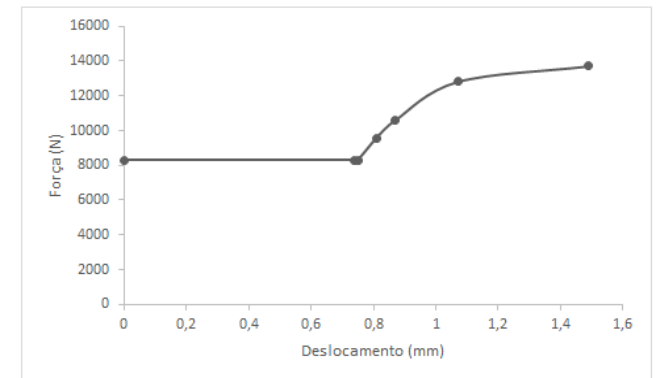
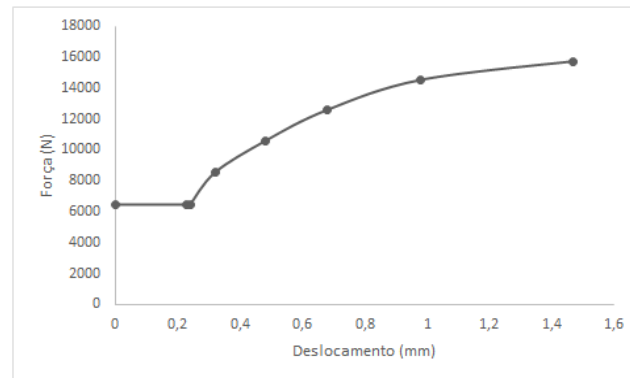
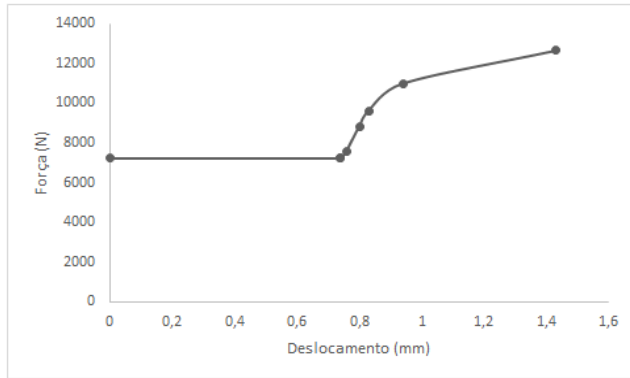
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 100 °C



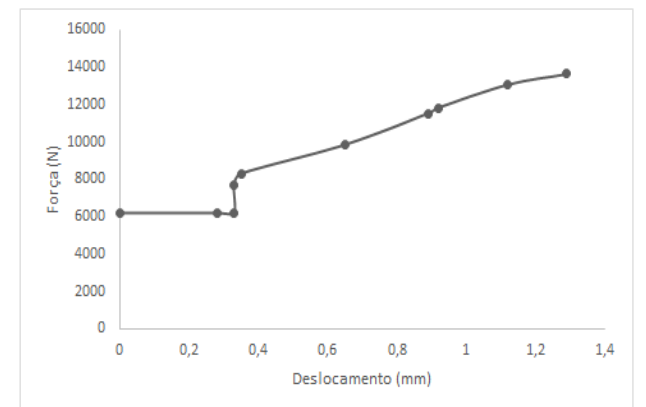
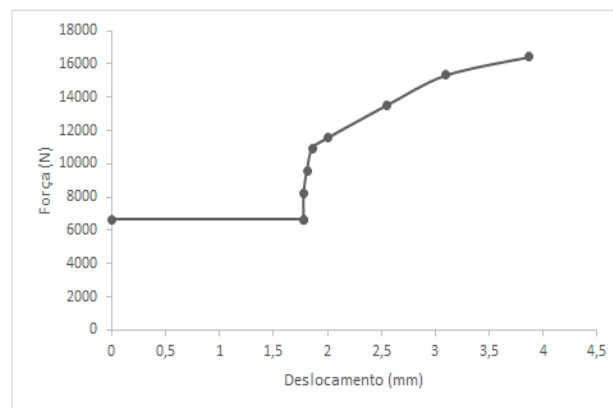
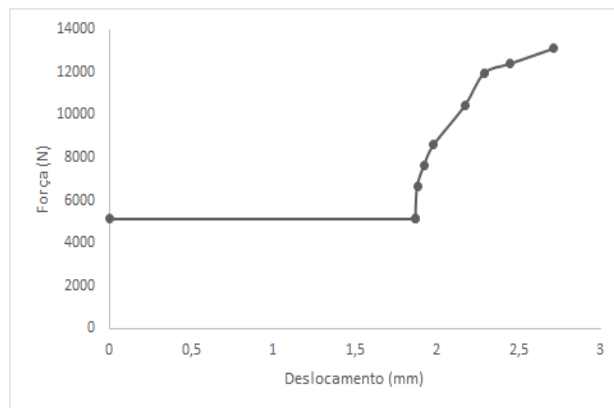
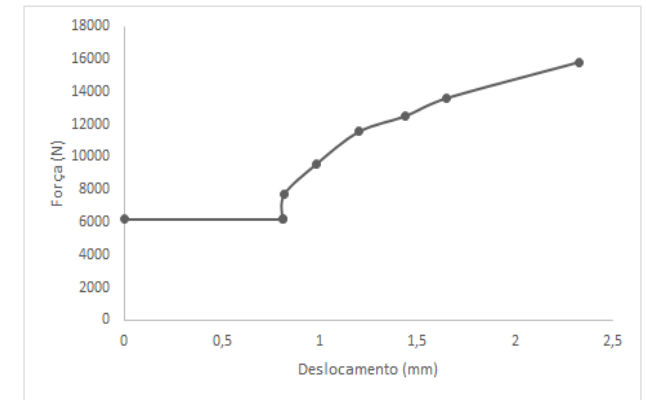
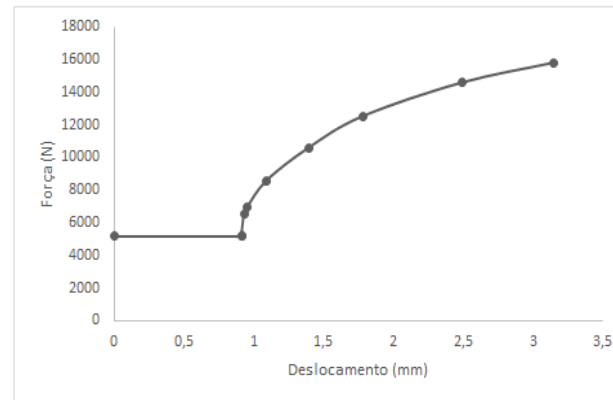
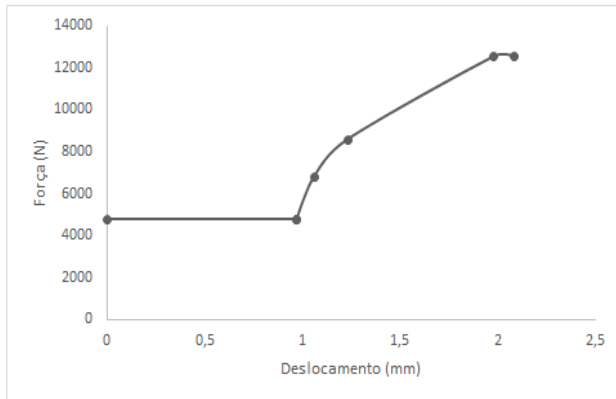


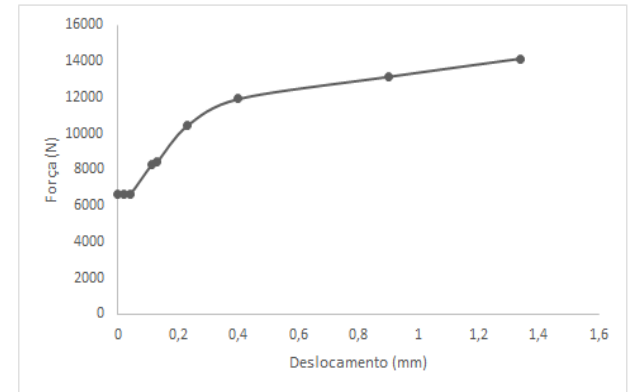
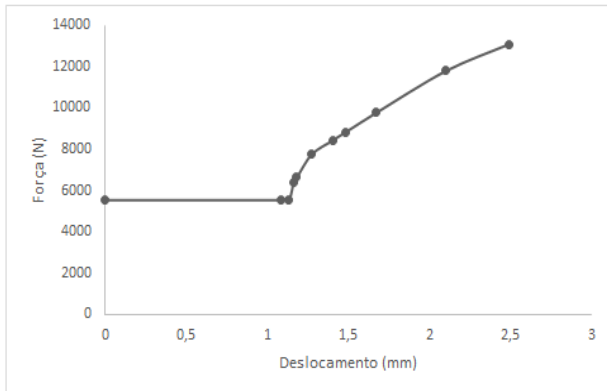
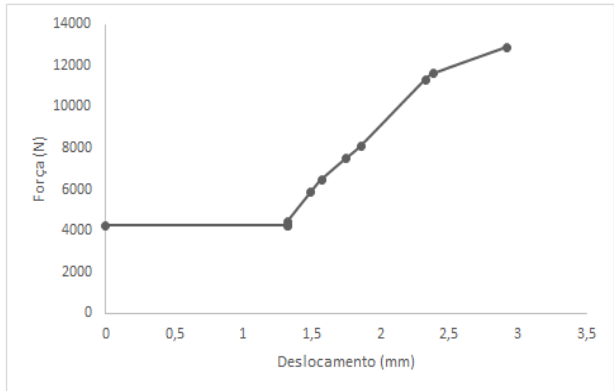
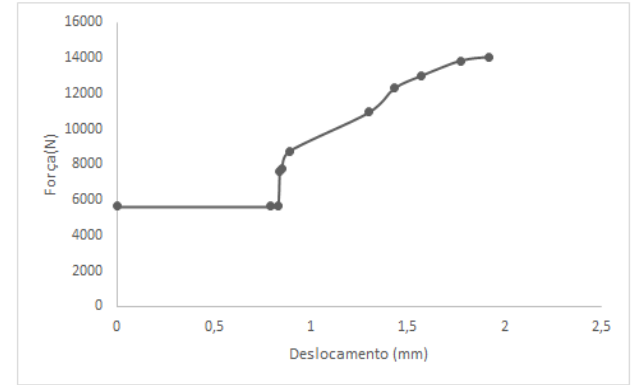
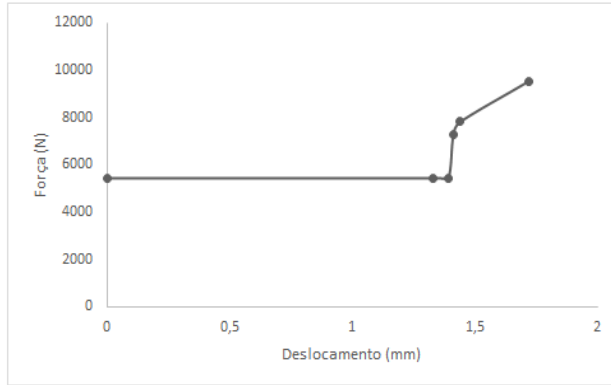
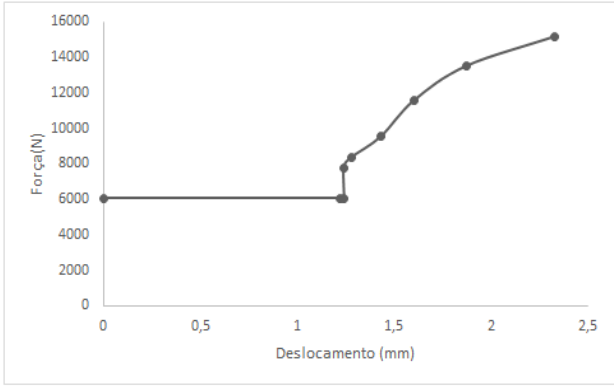
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 125 °C



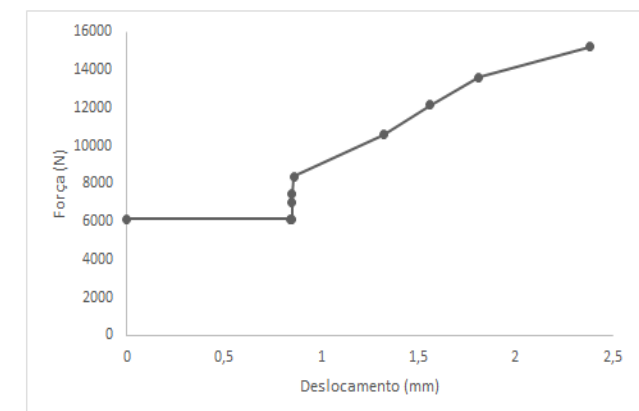
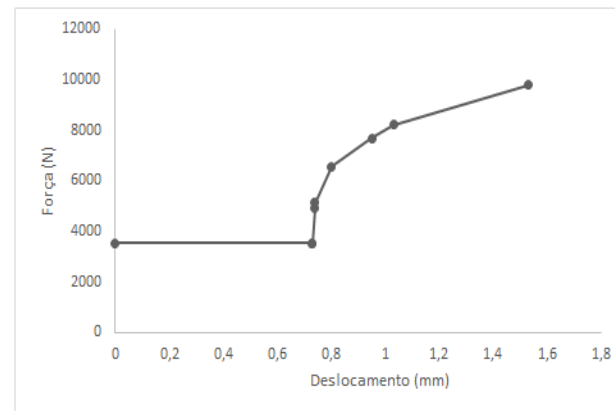
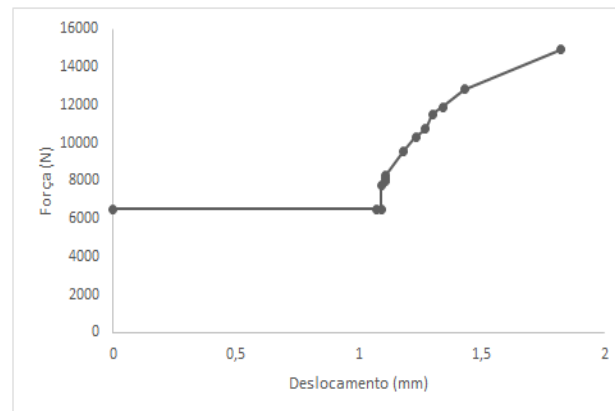
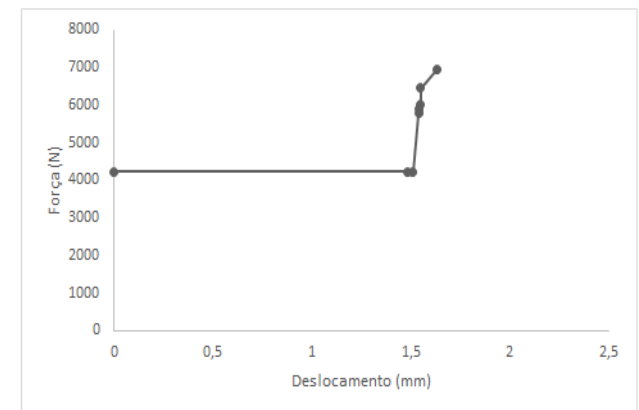
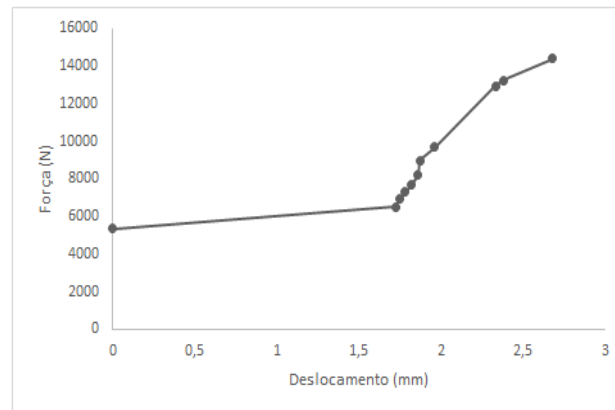
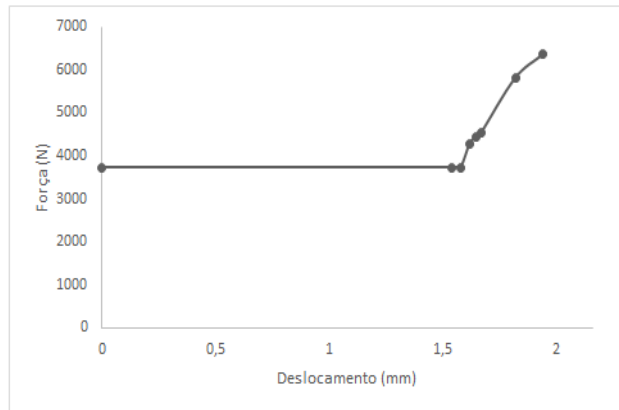


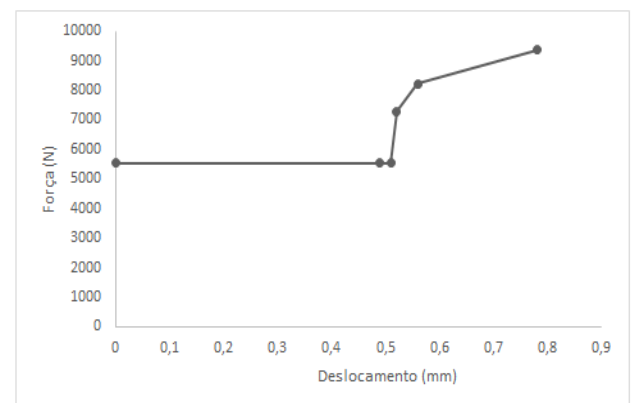
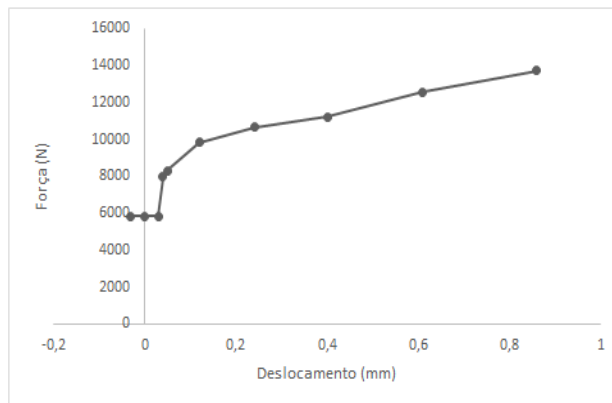
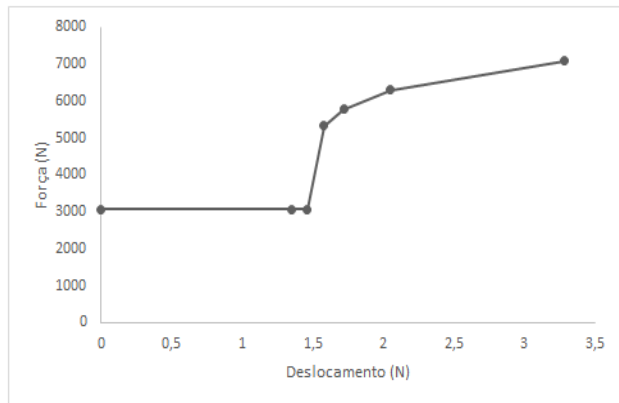
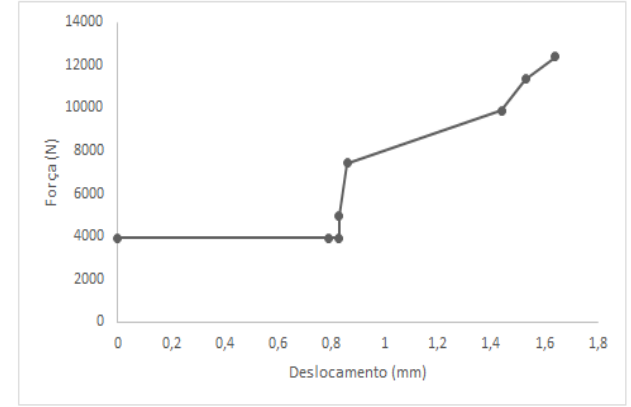
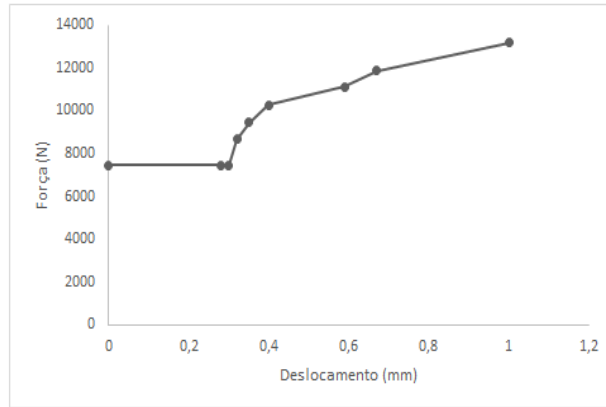
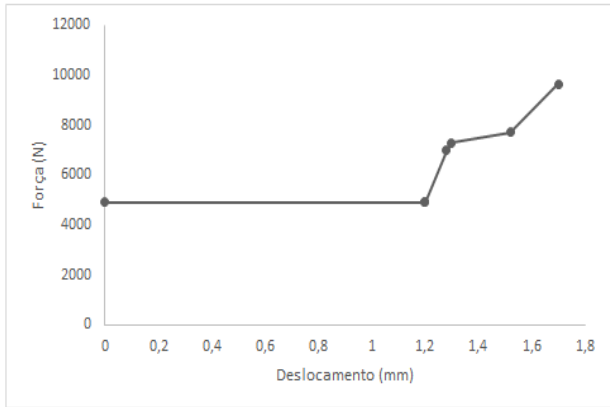
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 150 °C



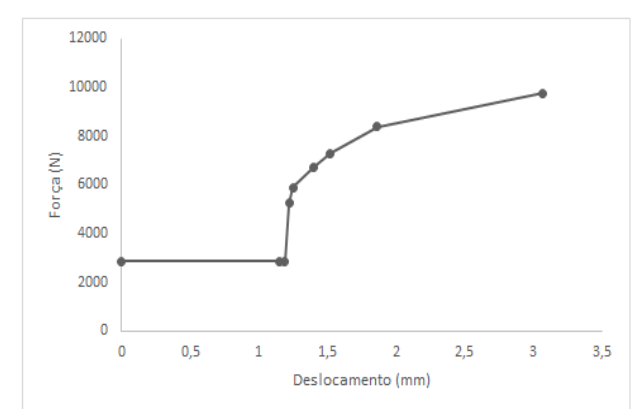
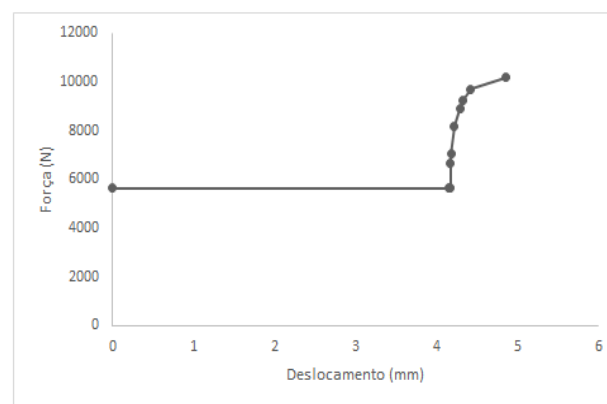
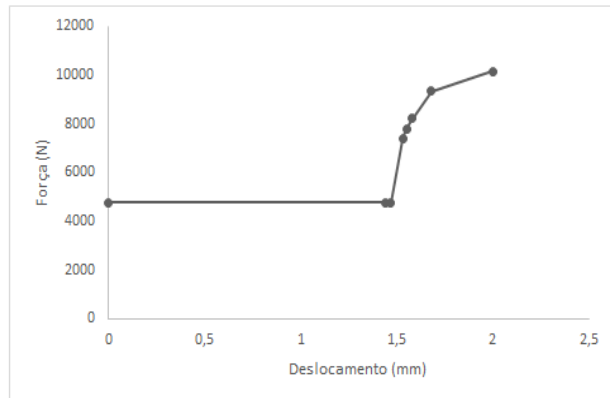
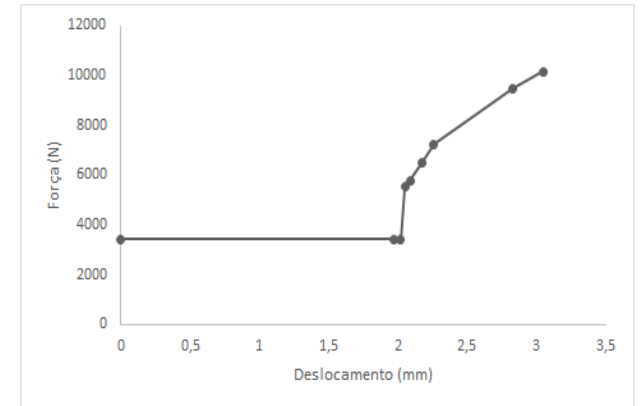
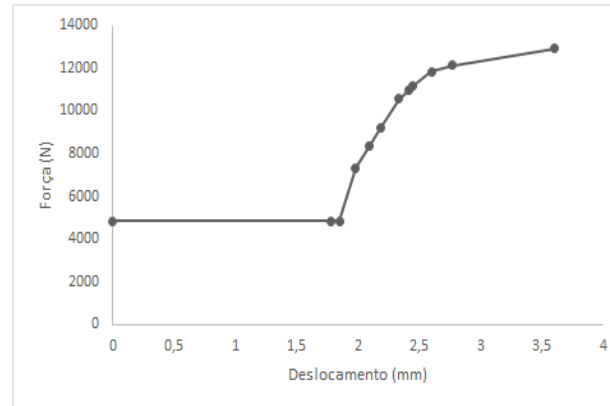
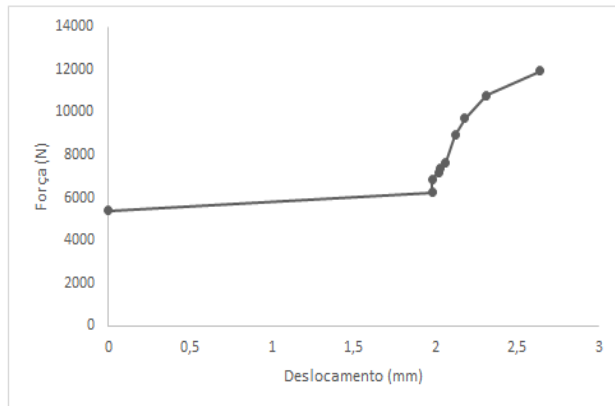


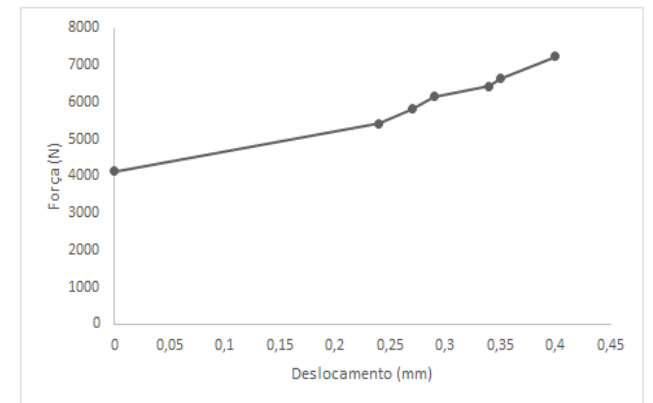
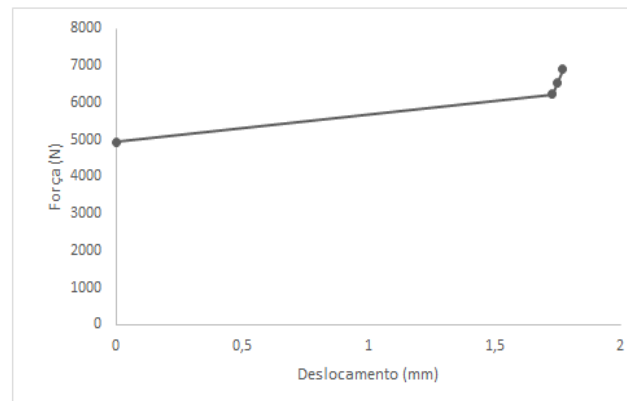
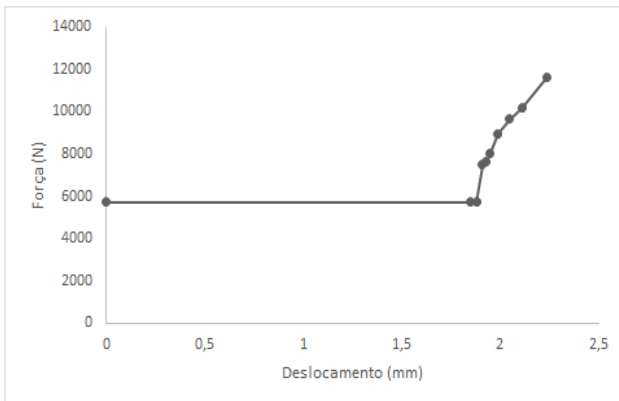
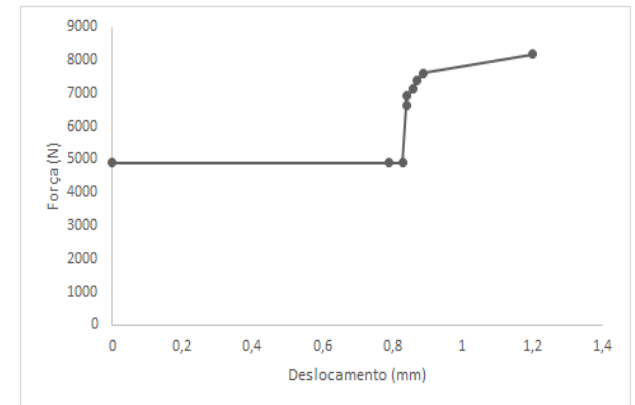
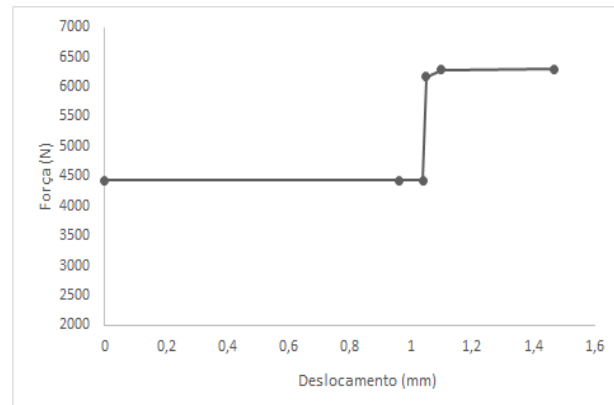
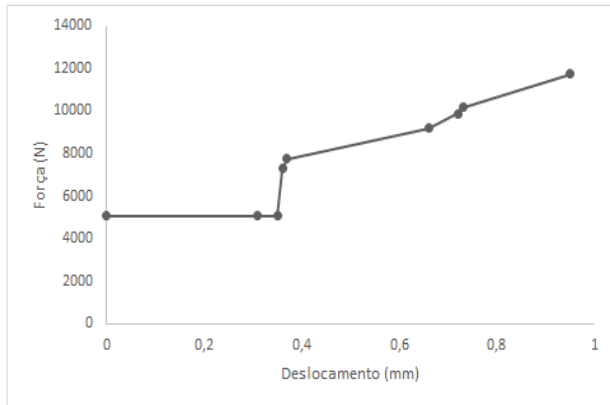
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 200 °C



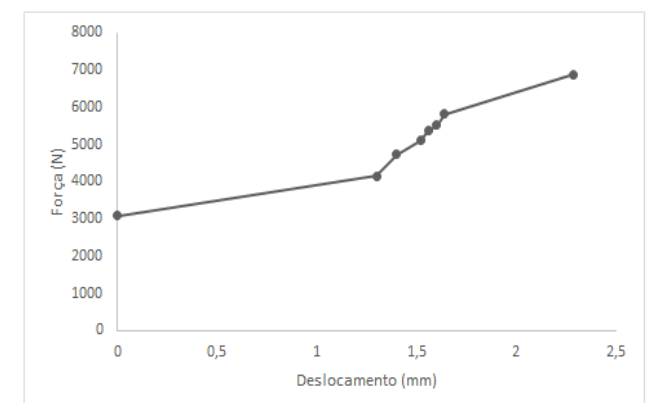
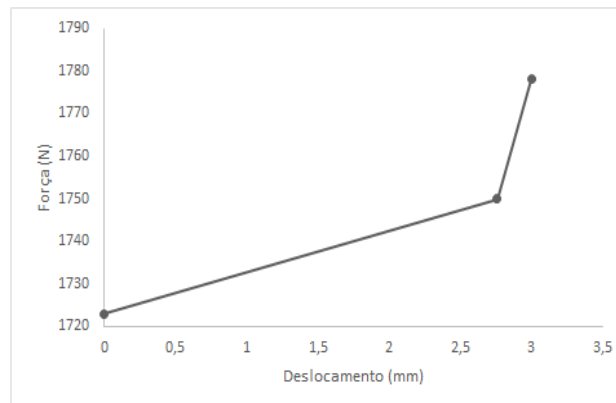
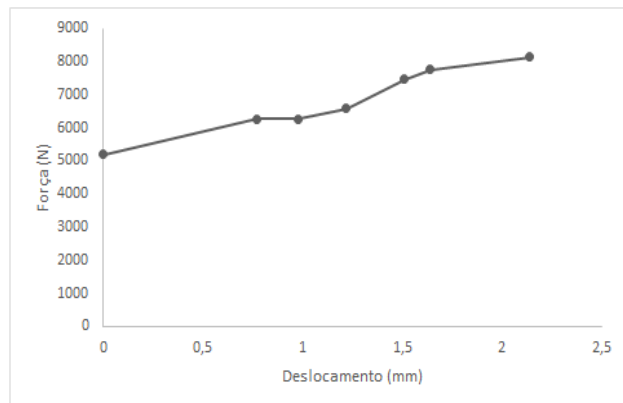
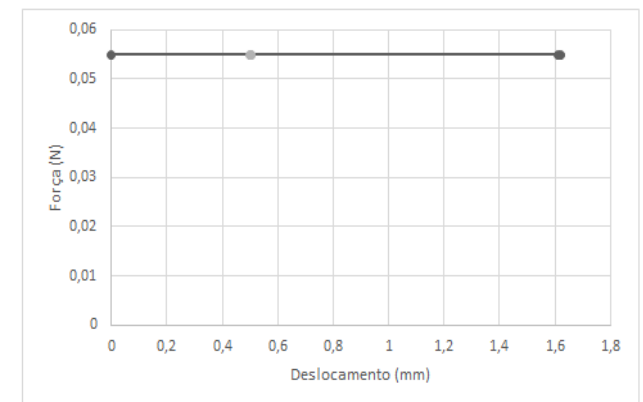
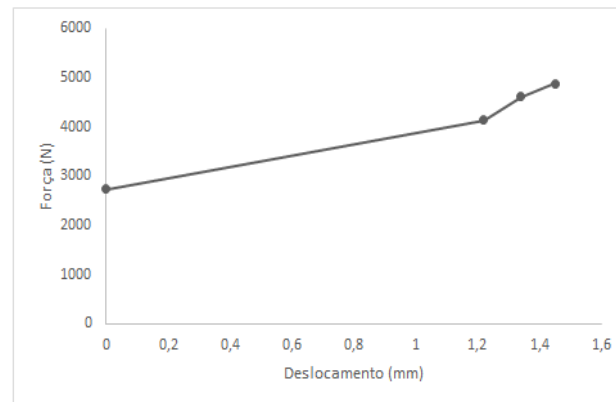
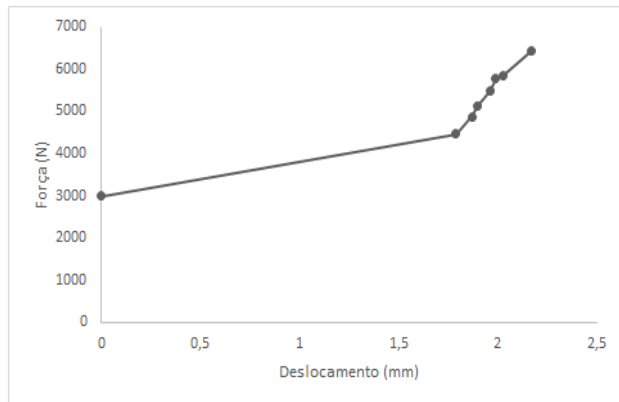


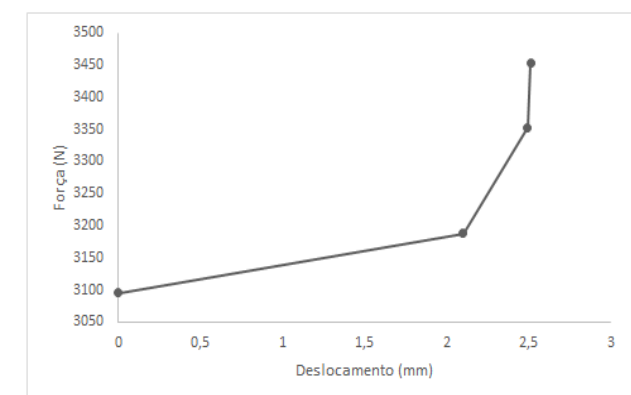
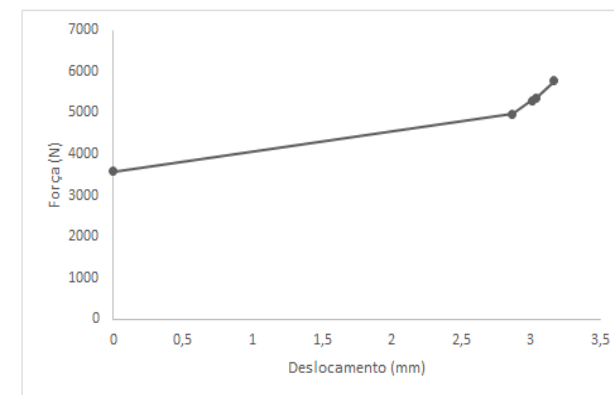
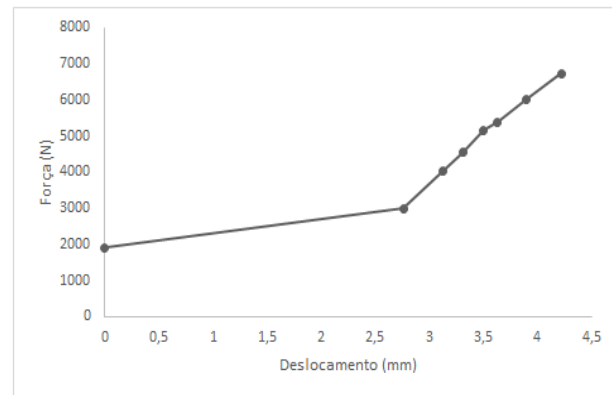
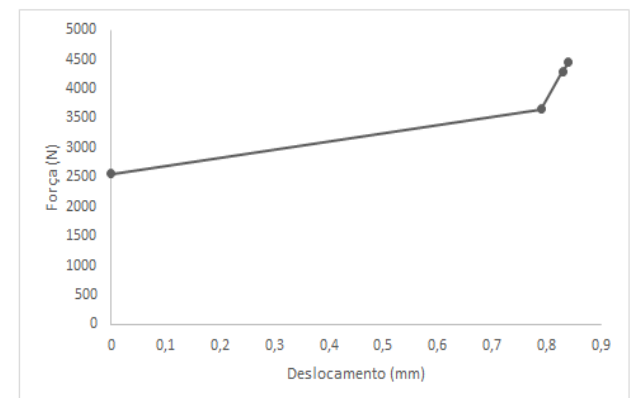
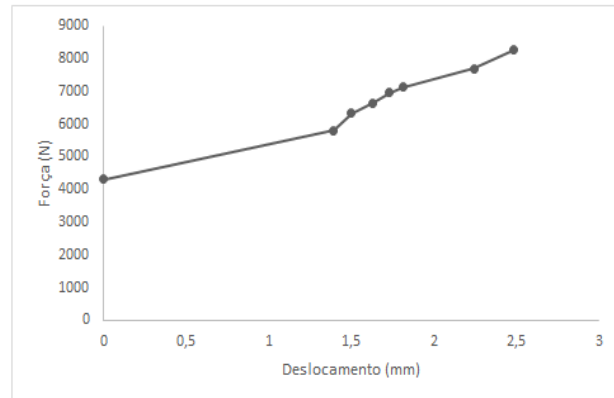
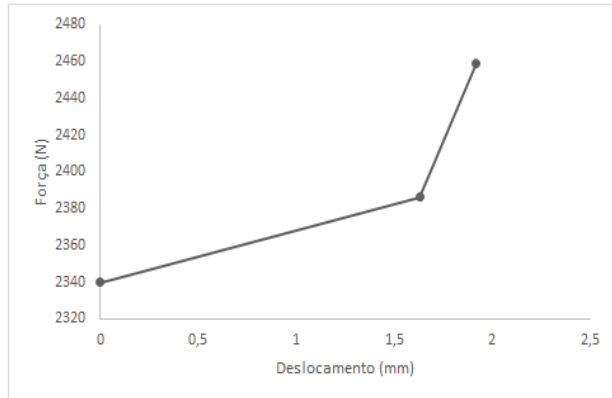
Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 225 °C





Curvas Força x Deslocamento à temperatura de 250 °C





APÊNDICE B – VALORES DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS

Número	Massa Específica (g/cm³)
1	0,707
2	0,713
3	0,679
4	0,678
5	0,711
6	0,681
7	0,708
8	0,696
9	0,671
10	0,695
11	0,685
12	0,686
13	0,705
14	0,683
15	0,709
16	0,680
17	0,702
18	0,691
19	0,665
20	0,673
21	0,685
22	0,669
23	0,697
24	0,722
25	0,709
26	0,683
27	0,673
28	0,667
29	0,689
30	0,693
31	0,703
32	0,688
33	0,701
34	0,680
35	0,717
36	0,686
37	0,678
38	0,704
39	0,693
40	0,690
41	0,693
42	0,703
43	0,681
44	0,703
45	0,702
46	0,698
47	0,696
48	0,693
49	0,698
50	0,696
51	0,693
52	0,687
53	0,682
54	0,688
55	0,682
56	0,671

57	0,703
58	0,690
59	0,695
60	0,699
61	0,669
62	0,673
63	0,712
64	0,683
65	0,678
66	0,684
67	0,687
68	0,690
69	0,667
70	0,675
71	0,660
72	0,680
73	0,697
74	0,688
75	0,662
76	0,655
77	0,683
78	0,708
79	0,661
80	0,701
81	0,681
82	0,689
83	0,679
84	0,701
85	0,698
86	0,684
87	0,668
88	0,678
89	0,681
90	0,662
91	0,700
92	0,698
93	0,669
94	0,672
95	0,663
96	0,704
97	0,681
98	0,687
99	0,688
100	0,686
101	0,687
102	0,696
103	0,687
104	0,671
105	0,680
106	0,691
107	0,707
108	0,693
109	0,705
110	0,688
111	0,719
112	0,685
113	0,696

114	0,663
115	0,663
116	0,680
117	0,682
118	0,688
119	0,677
120	0,688
121	0,703
122	0,688
123	0,690
124	0,689
125	0,685
126	0,671
127	0,691
128	0,666
129	0,680
130	0,668
131	0,656
132	0,662
133	0,686
134	0,663
135	0,666
136	0,680
137	0,653
138	0,667
139	0,680
140	0,686
141	0,667
142	0,664
143	0,739
144	0,655
145	0,662
146	0,743
147	0,692
148	0,742
149	0,685
150	0,707
151	0,732