

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM CONSTRUÇÃO CIVIL,*
ESTRUTURAS E GEOTECNIA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CAVILHAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA

Marcos Vinício de Camargo

São Carlos

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM CONSTRUÇÃO CIVIL,*
ESTRUTURAS E GEOTECNIA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CAVILHAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA

Marcos Vinício de Camargo

Projeto de Pesquisa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Estruturas e Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Drº André Luis Christoforo.

Coorientador: Drº Jorge Daniel de Melo Moura

São Carlos

2023

Dedico esta tese a minha esposa

Laisa, à minhas filhas ***Maria***

Fernanda e Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar todas as oportunidades e me amparar nos momentos difíceis da vida.

A minha esposa Laisa Rebeca do Vale Barcarolo, que me acompanhou ao longo desta pesquisa, sempre me incentivando e mostrando que as dificuldades podem ser superadas.

A minhas Filhas Maria Fernanda e Catarina (que nasceu durante o processo de doutorado), muito obrigado por me mostrarem todos os dias o motivo de toda a minha dedicação. Um dia vocês entenderão o porquê me ausentei de passar momentos maravilhosos ao lado de vocês ao longo deste período. Espero inspirá-las a sempre acreditarem em seus sonhos.

Aos meus pais Marcos e Cleusa “in memoriam”, e a minha irmã Bruna, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. André Luis Christoforo, pela orientação deste trabalho, pelo conhecimento transmitido e pela amizade, contribuindo diretamente para meu crescimento científico.

Ao Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura, pela coorientação deste trabalho, pela amizade, pelo conhecimento e apoio ao longo da pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de estruturas da UEL, Luiz Gustavo Patrocínio e Carlos Alberto Duarte, que não mediram esforços para o êxito deste trabalho, o meu muito obrigado.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de desenvolver a pesquisa.

Aos meus amigos Mario, Lucas, Gustavo, Guilherme, Marcio Nordi, Vilson e demais companheiros e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A Klabin pela doação da madeira utilizada na pesquisa.

A todos aqueles que contribuirão para esta etapa tão importante.

RESUMO

CAMARGO, Marcos Vinício. **Avaliação experimental do desempenho mecânico de cavilhas de madeira engenheirada**. 2023.110f. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos.

A indústria da construção civil no contexto mundial tem buscado sistemas construtivos mais eficientes no que diz respeito à preservação ambiental. A madeira habitualmente utilizada provém de florestas nativas, que estão cada vez mais escassas. Com o fortalecimento dos conceitos de sustentabilidade, criou-se a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional de espécies provenientes de florestas plantadas. Neste contexto o presente trabalho apresenta a utilização da madeira da espécie *Pinus taeda* a fim de agregar valor a esta matéria prima com grande disponibilidade no mercado. A pesquisa apresenta o processo de caracterização das madeiras *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, bem como, o comportamento da madeira *Pinus* após submetida ao processo de impregnação com monômero de metacrilato de metila (MMA) método de impregnação por vácuo – pressão, e assim aumentar os valores médios das propriedades mecânicas da madeira da espécie *Pinus taeda*. Propondo a utilização da madeira engenheirada da espécie *Pinus taeda* na fabricação de cavilhas com propósito de substituição de pinos metálicos em ligações de madeira. Para alcançar tal objetivo, foi realizado um programa experimental de caracterização das madeiras *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, seguido de testes de impregnação e por fim a elaboração e caracterização de cavilhas engenheirada com (MMA). A partir da realização do programa experimental foram encontrados resultados satisfatórios, onde o método de impregnação se mostrou eficaz apresentando ganho de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) da madeira *Pinus taeda* denotando ganhos de até 92% quando comparada com peças sem impregnação. Onde as análises em cavilhas também apresentaram ganhos de rigidez para sua utilização em elementos de ligação.

Palavras-chave: Madeira engenheirada, ligações cavilhadas, metacrilato de metila, madeiras plantadas.

ABSTRACT

ABSTRACT

CAMARGO, Marcos Vinício. **Experimental evaluation of the mechanical performance of connections composed of engineered wooden dowels.** 2023.110f. Thesis (Ph.D.) presented to the Postgraduate Program in Structures and Civil Construction at the Federal University of São Carlos.

The civil construction industry in the world context has sought more efficient construction systems with regard to environmental preservation. The wood usually used comes from native forests, which are increasingly scarce. With the strengthening of sustainability concepts, the need to develop viable alternatives for the rational use of species from planted forests was created. In this context, the present work presents the use of wood from the *Pinus taeda* species in order to add value to this raw material with great availability in the market. The research presents the characterization process of *Pinus taeda* and *Eucalyptus saligna* woods, as well as the behavior of *Pinus* wood after being subjected to the impregnation process with methyl methacrylate monomer (MMA) impregnation method by vacuum - pressure, and thus increase the average values of the mechanical properties of wood from the species *Pinus taeda*. Proposing the use of engineered wood of the *Pinus taeda* species in the manufacture of dowels with the purpose of replacing metallic in wooden connections. To achieve this objective, an experimental program was carried out to characterize *Pinus taeda* and *Eucalyptus saligna* woods, followed by impregnation tests and finally the elaboration and characterization of engineered dowels with (MMA). After carrying out the experimental program, satisfactory results were found, where the impregnation method proved to be effective, showing a gain in resistance to compression parallel to the fibers (f_{c0}) of *Pinus taeda* wood, denoting gains of up to 92% when compared to pieces without impregnation. Where the analyzes in dowels also showed stiffness gains for their use in connection elements.

Keywords: *Wood Engineered, connection wood, methyl methacrylate, planted wood.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Justificativa	16
1.3 Organização da tese	17
1.3.1 Capítulo 1	17
1.3.2 Capítulo 2	17
1.3.3 Capítulo 3	17
1.3.4 Capítulo 4	17
1.3.5 Capítulo 5	17
1.3.6 Capítulo 6	18
2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS.....	18
2.1 Considerações Iniciais	18
2.2 Modos de ruptura de ligações com pinos metálicos.....	18
2.3 Modelagem numérica	21
2.3.1 Modelo Constitutivo de Materiais Anisotrópicos.....	21
2.4 Mecanismos de Resistência de ligações conforme ABNT NBR 7190 (1997).....	22
2.4.1 Resistência de uma cavilha conforme ABNT NBR 7190 (1997).....	22
2.4.2 Resistência das ligações com pinos metálicos de acordo com a ABNT NBR 7190 (2022)	24
2.4.3 Resistência ao embutimento da madeira de acordo com a ABNT NBR 7190 (2022)	27
2.4.4 Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos	28
2.4.5 Ligações em peças de madeira por pinos metálicos.....	30
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.1 Considerações Iniciais	33
3.2 Madeira Engenheirada	33

3.3	Trabalhos experimentais sobre ligações com cavilhas em estruturas de madeira	36
3.4	Trabalhos sobre análise numérica de ligações cavilhadas em estruturas de madeira	41
3.5	Conclusões das revisões	46
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
4.1	Considerações Iniciais	47
4.2	Caracterização física e mecânica das madeiras	49
4.2.1	Ensaio do teor de umidade	50
4.2.2	Ensaio de densidade aparente	52
4.2.3	Ensaio de estabilidade dimensional da madeira	53
4.2.4	Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})	54
4.2.5	Ensaio de resistência à tração paralelas as fibras (f_{t0})	55
4.2.6	Ensaio de resistência à flexão (f_M)	55
4.3	Metacrilato de metila	57
4.4	Testes Preliminares	57
4.5	Impregnação com metacrilato de metila	59
4.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	62
4.7	Fabricação das cavilhas de madeira <i>pinus taeda</i>	62
4.8	Caracterização das cavilhas	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Considerações Iniciais	66
5.2	Propriedades físicas das madeiras	66
5.2.1	Ensaio de umidade	66
5.2.2	Ensaio de densidade aparente	67
5.2.3	Ensaio de estabilidade dimensional da madeira	69
5.3	Propriedades mecânicas das madeiras	70
5.3.1	Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})	70

5.3.2	Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0})	72
5.3.3	Módulo de elasticidade na direção paralela às fibras (E_{t0})	75
5.3.4	Resistência à flexão (f_M) e módulo de elasticidade (E_{M0})	77
5.4	Propriedades mecânicas das madeiras impregnadas.....	80
5.5	Cavilhas de madeira engenheirada.....	87
5.6	Caracterização das Cavilhas de madeira engenheirada	90
6.	CONCLUSÕES.....	92
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	92
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
APÊNDICE A	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modos de ruptura de ligações com pinos em corte simples	19
Figura 2.2 – Modos de ruptura de ligações com pinos em duplo cisalhamento	20
Figura 2.3 - Ligações com cavilhas de madeira com uma ou duas seções de cisalhamento.....	23
Figura 2.4 - Modos de falha em ligações em cisalhamento simples: (a) embutimento do pino na madeira da esquerda; (b) embutimento do pino na madeira da direita; (c) embutimento do pino metálico em ambas as peças de madeira	24
Figura 2.5 - Modos de falha em ligações em cisalhamento simples: (a) flexão do pino na madeira da direita; (b) flexão do pino na madeira da esquerda; (c) flexão do pino metálico em ambas as peças de madeira	25
Figura 2.6 - Modos de falha em ligações em cisalhamento duplo: (a) embutimento do pino nas madeiras externas; (b) embutimento do pino na madeira interna; (c) flexão do pino metálico na peça interna; (d) flexão do pino na peça interna e externa.....	26
Figura 2.7 – Aplicação do carregamento durante ensaio de resistência e rigidez de ligações.....	29
Figura 2.8 – Diagrama força <i>versus</i> deslizamento da ligação.	29
Figura 2.9 - Distribuição dos conectores em ligações de estruturas de madeira	32
Figura 3.1 - Comparação entre madeiras impregnadas e sem impregnação: (a) flexão estática; (b) compressão paralela às fibras.	35
Figura 3.2 - Ligação cavilhada com cavilhas de polímero reforçado com fibra de vidro.	37
Figura 3.3 - Diagrama força deslizamento da ligação.....	37
Figura 3.4 - Modelos experimentais: Cavilhas a 45° e Cavilhas a 90°	38
Figura 3.5 - Ensaio experimental.....	38
Figura 3.6 - Força máxima encontrada para cavilhas à 45° e 90°	39
Figura 3.7 - Esquema de ensaio de ligação e mecanismo de falha da cavilha	40
Figura 3.8 - Ensaio de cisalhamento de cavilhas	40
Figura 3.9 - Curva força <i>versus</i> deslocamento modelos experimentais e numéricos	43
Figura 3.10 - Modelo experimental.....	43
Figura 3.11 - Disposição das cavilhas nos modelos experimentais para aferição de modelo numérico: (a) Cavilhas inseridas a 90°; (b) Cavilhas com inclinação de 60°; (c) Cavilhas cruzadas com ângulo de 60°	44

Figura 3.12 - Modelo experimental: (a) Dimensões do modelo experimental; (b) Ensaio experimental	44
Figura 3.13 - Comparação entre modelo numérico e experimental	45
Figura 3.14 - Comparação entre modelo numérico e experimental	45
Figura 4.1 - Fluxograma procedimentos experimentais	48
Figura 4.2 - Madeira utilizada na pesquisa <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus saligna</i> : (a) Etapa de corte das peças; (b) Armazenada no laboratório de estruturas UEL	49
Figura 4.3 - Amostras para ensaio de umidade: (a) amostras de <i>Pinus taeda</i> ; (b) Amostras de <i>Eucalyptus saligna</i>	51
Figura 4.4 - Procedimento de ensaio de umidade: (a) Balança de precisão; (b) estufa para secagem das amostras.	52
Figura 4.5 - Amostras para ensaio de estabilidade dimensional: (a) Amostras em recipiente; (b) Realização das medições das amostras.....	53
Figura 4.6 - Dimensão dos corpos de prova de ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.....	54
Figura 4.7 - Ensaio de compressão paralela às fibras	54
Figura 4.8 - Ensaio de tração paralela às fibras: (a) Dimensões para ensaio; (b) Realização do ensaio.....	55
Figura 4.9 - Dimensões do corpo de prova de ensaio à flexão paralela às fibras	56
Figura 4.10 - Ensaio de flexão	56
Figura 4.11 - Testes preliminares: (a) Impregnação com poliuretano à base de mamona; (b) Impregnação com Breu.....	57
Figura 4.12 - Resistência à compressão paralela às fibras	58
Figura 4.13 - Análise visual de impregnação da madeira	59
Figura 4.14 - Equipamento de pressão para realização da impregnação: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal	60
Figura 4.15 - Processo de polimerização: (a) Corpos de prova envoltos por papel alumínio; (b) Estufa para processo de polimerização.	61
Figura 4.16 - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura: (a) realização do ensaio; (b) posicionamento das amostras.	62
Figura 4.17 - Cavilhas de madeira <i>Pinus taeda</i> : (a) Amostras impregnadas; (b) Cavilhas posicionadas em balança de precisão.	63
Figura 4.18 - Ensaio de flexão	64

Figura 4.19 - Cavilhas de madeira <i>Pinus taeda</i> para ensaio de flexão vinculação inicial	65
Figura 4.20 - Cavilhas de madeira <i>Pinus taeda</i> para ensaio de flexão vinculação secundária	65
Figura 5.1 - Resistência à compressão paralela às fibras da madeira.....	70
Figura 5.2 - Resistência à tração paralela às fibras das espécies de madeira	73
Figura 5.3 – Curva força <i>versus</i> deslocamento da espécie <i>Pinus taeda</i>	78
Figura 5.4 - Curva força <i>versus</i> deslocamento da espécie <i>Eucalyptus saligna</i>	78
Figura 5.5 - Resistência à flexão	79
Figura 5.6 - Massa da madeira após o processo de impregnação	83
Figura 5.7 - Densidade aparente da madeira	83
Figura 5.8 - Resistência à compressão da madeira impregnada	84
Figura 5.9 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.	86
Figura 5.10 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.	86
Figura 5.11 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.....	87
Figura 5.12 - Densidade das cavilhas de madeira <i>Pinus taeda</i> com e sem impregnação	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Espaçamento mínimo em ligações com pinos metálicos	31
Tabela 4.1 - Ensaio nas espécies de madeira	50
Tabela 4.2 - Processo de impregnação da madeira	61
Tabela 5.1 - Ensaio de determinação do teor de Umidade.....	66
Tabela 5.2 - Densidade aparente da madeira da espécie <i>Pinus taeda</i>	67
Tabela 5.3 - Densidade aparente da madeira da espécie <i>Eucalyptus saligna</i>	68
Tabela 5.4 – Estabilidade dimensional da madeira	69
Tabela 5.5 - Resistência a compressão paralela às fibras da espécie <i>Pinus taeda</i> ..	71
Tabela 5.6 - Resistência a compressão paralela às fibras da espécie <i>Eucalyptus saligna</i>	72
Tabela 5.7 - Resistência à tração paralela às fibras da madeira <i>Pinus taeda</i>	74
Tabela 5.8 - Resistência à tração paralela às fibras da madeira <i>Eucalyptus saligna</i>	75
Tabela 5.9 – Módulo de elasticidade da madeira <i>Pinus taeda</i>	76
Tabela 5.10 - Módulo de elasticidade da madeira <i>Eucalyptus saligna</i>	77
Tabela 5.11 - Valores máximo de tensão de flexão <i>Pinus taeda</i>	79
Tabela 5.12 - Valores máximo de tensão de flexão <i>Eucalyptus saligna</i>	80
Tabela 5.13 - Massa da madeira sem impregnação.....	81
Tabela 5.14 - Massa da madeira impregnada	82
Tabela 5.15 - Resistência à compressão paralela às fibras da madeira impregnada	85
Tabela 5.16 - Massa e densidade das cavilhas sem impregnação.....	87
Tabela 5.17 - Massa e densidade das cavilhas impregnadas	89
Tabela 5.18 - Parâmetros de módulo de elasticidade longitudinal e transversal da cavilha engenheirada	91
Tabela 5.19 - Parâmetros de módulo de elasticidade longitudinal e transversal da cavilha engenheirada	91

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o foco da construção civil tem se voltando para a utilização de materiais sustentáveis na construção de edificações. Isto se deve ao intuito de reduzir os impactos ambientais.

De acordo com O'ceallaigh *et al.* (2021) a madeira é um material que apresenta vantagens em relação a sua facilidade de fabricação de peças, bem como, o desenvolvimento tecnológico que vem sendo cada vez mais explorado. Outro fator que pesquisas de Balasbaneh; Sher (2021) e Goldhahn; Cabane; Chanana (2021) denotam, são as vantagens ao se comparar o consumo de energia e carbono incorporado ao uso da madeira quando comparado com materiais como aço e o concreto.

No entanto, a utilização da madeira na construção civil deve ser realizada de modo controlado tentando minimizar o avanço da degradação de florestas nativas. De acordo com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), a atividade predatória já devastou mais de vinte por cento da área original da Floresta Amazônica de modo permanente e irreversível.

Neste viés a utilização de madeira de reflorestamento (florestas plantadas) na construção civil atenua o desmatamento dos ecossistemas florestais nativos. Como essa madeira em alguns tipos de espécies adotadas possui propriedades mecânicas inferiores às madeiras tradicionalmente utilizadas (peroba, cumaru, etc.), é necessário agregar tecnologia para sua utilização.

As áreas de madeira de reflorestamento apresentam uma maior demanda para as espécies de dois gêneros: o *Pinus* e o *Eucalyptus*, de acordo com De Araujo *et al.* (2017) nos anos de 2014 e 2015, as áreas de plantios florestais foram de aproximadamente 21% para o gênero *Pinus* e 72% para o gênero *Eucalyptus*.

De acordo com Rocco, Christoforo, Fiorelli (2016), a utilização de madeira de florestas plantadas em estruturas, como por exemplo de telhados, pode proporcionar uma economia significativa de materiais e redução de custos para o conjunto da estrutura.

A viabilização de sua utilização em estruturas, por outro lado, agrega valor à esta matéria-prima com grande disponibilidade no mercado. Dentre as espécies de madeira de floresta plantada o gênero de madeira *Pinus* possui mais de 100 espécies, segundo a (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

- EMBRAPA, 2011), sendo mais utilizadas e cultivadas a *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* por apresentarem facilidade de crescimento em território brasileiro, sendo a primeira preterida para produção de celulose e papel e a segunda para produção de madeira serrada e chapas (SHIMIZU, 2008).

Quanto às suas propriedades mecânicas, segundo Oliveira *et al.* (2006), a espécie *Pinus* apresenta valores variando de 53,14 MPa a 79,97 MPa para o módulo de ruptura a partir de plantios com idades de 9, 13 e 20 anos. A ABNT NBR 7190 (1997), apresenta um valor médio de resistência à tração paralela às fibras de 82,8 MPa para o *Pinus taeda*. A referida norma em sua última revisão apresenta valores próximos para madeiras analisando as referidas resistências para madeiras das classes coníferas e folhosas. Moya; Baño (2017) encontraram uma resistência à tração de 80,12 MPa para espécies de *Pinus taeda* originárias do Uruguai. Nos estudos de Ballarin *et al.* (2018), foram estudadas 125 peças de *Pinus taeda* submetidas à flexão dinâmica e estática para avaliar a possibilidade de redução da quantidade de classes visuais. Foi constatado que os defeitos visuais das amostras estudadas tiveram influência nas propriedades físicas da madeira. A variação mais significativa foi na resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), sendo encontrado diferenças de resistências de até 25,3%. Os resultados quanto à rigidez da madeira na direção paralela às fibras a partir do seu módulo de elasticidade (E_{c0}) de cada elemento foram de queda de até 19,7%.

Em estruturas de madeira, as ligações frequentemente representam os pontos mais fracos e, portanto, necessitam de atenção especial. O comportamento mecânico entre o elemento de ligação e a madeira depende de vários fatores, incluindo as propriedades geométricas e mecânicas do componente fixador, as propriedades físicas e mecânicas da madeira e a interação entre esses elementos (IZZU *et al.*, 2018).

Dentre os tipos de ligações utilizadas em estruturas de madeira cita-se a utilização de pinos metálicos, submetidos a casos de cisalhamento duplos ou simples. No entanto este tipo de conexão pode apresentar desvantagens como o surgimento de patologias decorrentes da presença da umidade (CERALDI. *et al.*, 2017).

Neste contexto pesquisas desenvolvidas por Barcarolo (2019), Almeida, Moura (2022) apresentam estudos do comportamento de cavilhas confeccionadas com compósitos poliméricos, como alternativa para substituição de pinos metálicos.

A presente pesquisa tem foco na análise do desempenho estrutural de cavilhas engenheiradas da espécie *Pinus taeda*. Foi desenvolvido um programa experimental analisando os parâmetros de resistência de madeiras da espécie *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, bem como madeiras engenheiradas da espécie *Pinus taeda* realizando o estudo de rigidez na direção paralela às fibras por meio do módulo de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) de cavilhas de madeira engenheirada.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa foi estudar o desempenho estrutural de cavilhas de madeira engenheirada, utilizando cavilhas da espécie *Pinus taeda*.

Para alcançar essa finalidade, os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Desenvolver o processo de caracterização das madeiras da espécie *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* para determinar suas propriedades mecânicas e de rigidez;
- Desenvolver o processo de impregnação do metacrilato de metila na madeira do gênero *Pinus taeda* para alterar as propriedades mecânicas da madeira;
- Desenvolver cavilhas de madeira engenheirada a serem utilizadas em ligações com madeiras coníferas e folhosas;
- Compreender o desempenho mecânico de cavilhas de madeira engenheirada por meio de sua caracterização;

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), em ligações que se fazem uso de cavilhas devem ser utilizadas madeiras duras da classe C60 ou com madeiras moles que apresentem densidade de $\rho_{ap} \leq 600 \text{kg} / \text{m}^3$ impregnadas com resinas que aumentem sua resistência.

Dessa maneira, a utilização de impregnação de resina em madeiras coníferas as torna viáveis para serem utilizadas em ligações cavilhadas. Esta metodologia onde alteram-se as propriedades da madeira por meio de impregnação foi utilizada na pesquisa de Stolf et al. (2017), que apresentou aumento significativo dos resultados de resistência para madeiras dos gêneros *Pinus*.

Assim, o presente trabalho apresenta a aplicação do monômero de metacrilato de metila (MMA) em madeiras coníferas do gênero *Pinus taeda* para viabilizar sua utilização em elementos de ligação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

1.3.1 CAPÍTULO 1

O capítulo 1 apresenta a introdução sobre o tema abordado na elaboração da referida tese, seguindo-se do objetivo e justificativas para realização do trabalho.

1.3.2 CAPÍTULO 2

O capítulo 2 apresenta os aspectos fundamentais abordados no referido trabalho. São apresentados aspectos importantes sobre as características da madeira, modos de ruptura de ligações com cavilhas e considerações referentes a modelagem numérica.

1.3.3 CAPÍTULO 3

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica a respeito da utilização da madeira engenheirada na construção civil, elaboração de cavilhas com madeira engenheirada, modelos numéricos de ligações cavilhadas.

1.3.4 CAPÍTULO 4

O capítulo 4 apresenta as etapas do programa experimental: caracterização da madeira, caracterização da cavilha, bem como resultados de testes preliminares utilizando resinas naturais.

1.3.5 CAPÍTULO 5

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos resultados obtidos na pesquisa.

1.3.6 CAPÍTULO 6

O capítulo 6 apresenta as conclusões, bem como as considerações a serem realizadas em projetos futuros.

2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir apresenta-se uma revisão a respeito dos aspectos fundamentais de ligações em estruturas de madeira utilizando cavilhas, denotando os modos de ruptura, critérios de modelagem numérica, modelos constitutivos de materiais anisotrópicos e mecanismos de resistência de ligação com cavilhas.

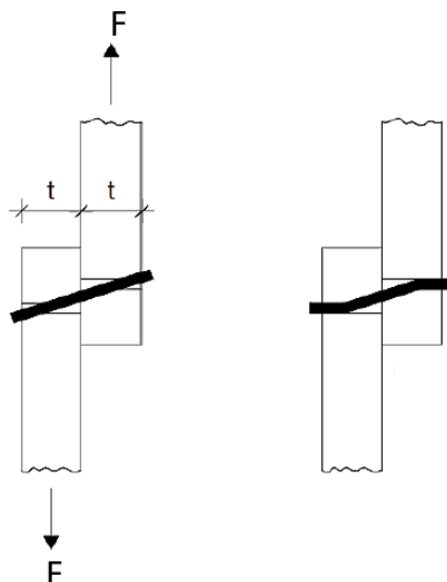
2.2 MODOS DE RUPTURA DE LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS

O modelo de cálculo utilizado que permite estimar a capacidade de carga entre ligações de madeira que fazem uso de pinos, que fundamentou as premissas da norma europeia EUROCODE 5 (2004) bem como, ABNT NBR 7190 (2022) refere-se ao estudo desenvolvido por Johansen (1949), onde prevê os modos de ruptura por meio do embutimento e pelo momento resistente do conector, levando em consideração situações de cisalhamento simples ou duplo.

Johansen (1949) apresenta os modos de ruptura por situações de cisalhamento simples, considerando a ruptura por meio do embutimento do pino na madeira ou a presença de flexão do pino de ligação.

O embutimento da madeira ocorre quando o pino metálico apresenta rigidez capaz de ocasionar ruptura na peça de madeira. No entanto quando o pino metálico apresenta rigidez menor, a ruptura ocorre pela presença de flexão no pino, a Figura 2.1 apresenta os modos de ruptura para situações de cisalhamento simples.

Figura 2.1 – Modos de ruptura de ligações com pinos em corte simples



Fonte: Adaptado de Johansen (1949)

As equações (2.1) e (2.2), denotam o comportamento da ligação para determinar a força F , sendo a equação (2.1) relacionada ao embutimento da madeira e a equação (2.2) relacionada a flexão no pino metálico.

$$F = (\sqrt{2} - 1)f_h t d \quad (2.1)$$

$$F = \frac{d^2}{4} \sqrt{\pi f_h f_y} \quad (2.2)$$

Sendo:

f_h : Resistência ao embutimento da madeira;

f_y : Resistência ao escoamento do pino metálico;

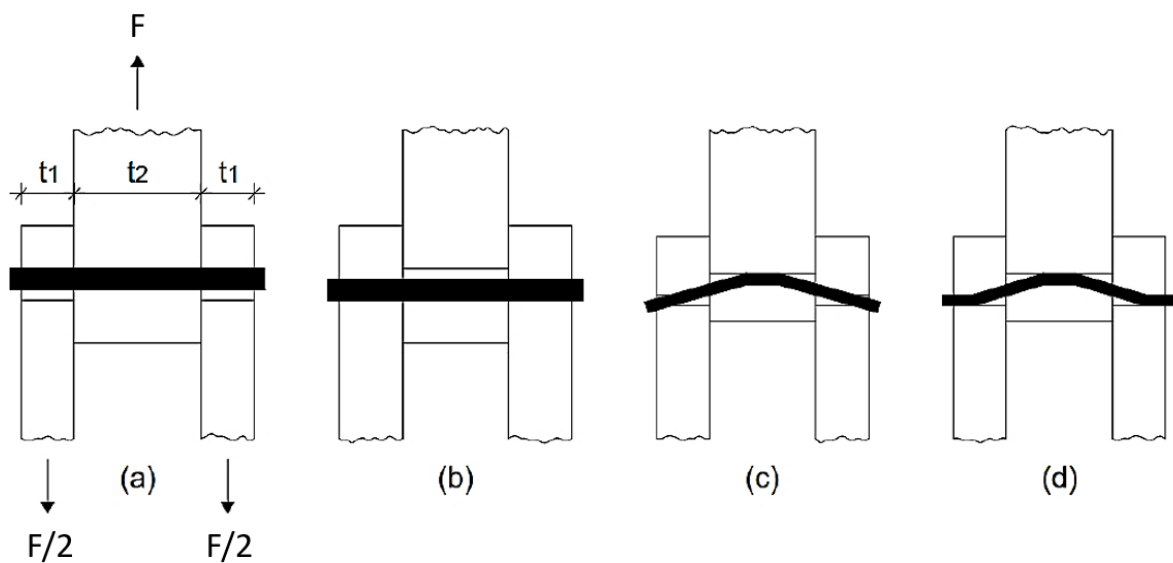
t : Espessura dos elementos da madeira;

d : Diâmetro do pino.

Para as situações de cisalhamento duplo Johansen (1949) considera os quatro tipos de ruptura apresentados na Figura 2.2, denotando o embutimento do

pino de ligação nas peças externas ou internas, flexão do pino de ligação na peça interna ou externa.

Figura 2.2 – Modos de ruptura de ligações com pinos em duplo cisalhamento



Fonte: Adaptado de Johansen (1949)

$$F = 2f_h t_1 d \quad (2.3)$$

$$F = 2f_h t_2 d \quad (2.4)$$

$$F = \frac{2f_h d t_1}{3} \left(\sqrt{4 + \frac{3\pi f_y d^2}{8f_h t_1^2}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

$$F = \frac{d^2}{4} \sqrt{\pi f_h f_y} \quad (2.6)$$

Sendo:

t_1 : Espessura dos elementos externos da madeira;

t_2 : Espessura dos elementos internos da madeira.

2.3 MODELAGEM NUMÉRICA

2.3.1 MODELO CONSTITUTIVO DE MATERIAIS ANISOTRÓPICOS

A simulação do comportamento da madeira referente as propriedades mecânicas consideradas, correspondem a espécie *Pinus taeda*. O modelo constitutivo para o comportamento da madeira quando submetida à tração na direção paralela às fibras caracteriza-se por um comportamento linear até tensões próximas a tensão de ruptura, denotando pequenas deformações e apresentando comportamento frágil.

O critério de resistência utilizado para previsão da ruptura da madeira foi o critério de resistência de Hill, este critério apresenta um comportamento generalizado ao critério de Von Mises para considerar o comportamento anisotrópico do material. A adoção desse critério consiste na relação das tensões de plastificação com uma tensão de referência.

O modelo idealizado de HILL para o comportamento elasto-plástico é expresso conforme a Equação 1, de acordo com as pesquisas de (WANG; SONG; GU, 2018) e (XU; BOUCHAÏR; *et al.*, 2009).

$$A = \begin{bmatrix} (H+G) & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & (F+H) & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & (F+G) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Os parâmetros referentes as propriedades dos materiais são expressas por meio da equação (2).

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\ G &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \\ H &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \\ N &= \frac{3}{2R_{23}^2}; N = \frac{3}{2R_{13}^2}; L = \frac{3}{2R_{12}^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde as razões entre as resistências podem ser expressas conforme a equação 3.

$$\begin{aligned} R_{11} &= \frac{f_{11}}{f_0}; R_{22} = \frac{f_{22}}{f_0}; R_{33} = \frac{f_{33}}{f_0} \\ R_{13} &= \frac{\sqrt{3}f_{13}}{f_0}; R_{23} = \frac{\sqrt{3}f_{23}}{f_0}; R_{12} = \frac{\sqrt{3}f_{12}}{f_0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Sendo f_{11}, f_{22} e f_{33} equivalentes a tensão de compressão e tração nas direções longitudinal, radial e tangencial e f_{12}, f_{13} e f_{23} as tensões de cisalhamento correspondente a cada direção.

2.4 MECÂNISMOS DE RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES CONFORME ABNT NBR 7190 (1997)

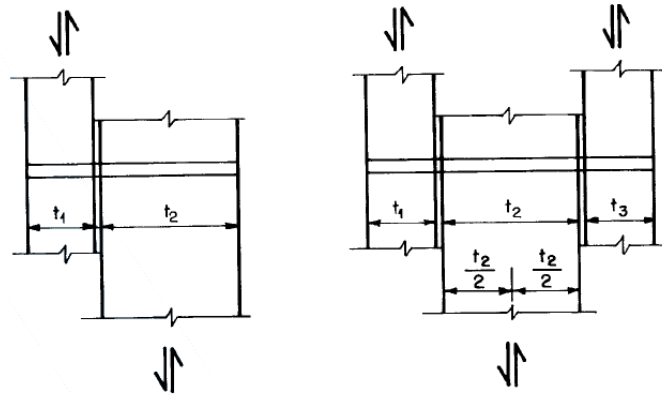
2.4.1 RESISTÊNCIA DE UMA CAVILHA CONFORME ABNT NBR 7190 (1997)

As premissas da ABNT NBR 7190 (1997) indicam a utilização de cavilhas com diâmetros de 16mm, 18mm e 20mm. Sendo estas verificadas quanto as considerações de resistência ao embutimento da cavilha na madeira, a resistência ao esmagamento e flexão da cavilha.

A referida norma cita que em ligações que se fazem uso de cavilhas devem ser utilizadas madeiras duras da classe C60 ou com madeiras moles que apresentem densidade de $\rho_{ap} \leq 600 \text{kg} / \text{m}^3$ impregnadas com resinas que aumentem sua resistência.

A Figura 2.3 apresenta as considerações de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) para análise da ligação.

Figura 2.3 - Ligações com cavilhas de madeira com uma ou duas seções de cisalhamento



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

A resistência de cálculo da cavilha $R_{vd,1}$ corresponde a uma única seção de corte da mesma maneira que se determinam para os casos de pinos metálicos. Sendo considerado para cavilhas as equações (2.10) e (2.11) a seguir.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (2.10)$$

$$\beta_{lim} = \sqrt{\frac{f_{c0,d,cav}}{f_{c90,d,cav}}} \quad (2.11)$$

Onde $f_{c0,d,cav}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela e $f_{c90,d,cav}$ refere-se ao valor de cálculo da resistência à compressão normal da cavilha.

As resistências ao esmagamento da cavilha e a flexão são apresentadas nas equações (2.) e (2.), para valores de β maiores ou menores que β_{lim} .

Para as situações em que $\beta \leq \beta_{lim}$ tem-se:

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{c90d,cav} \quad (2.12)$$

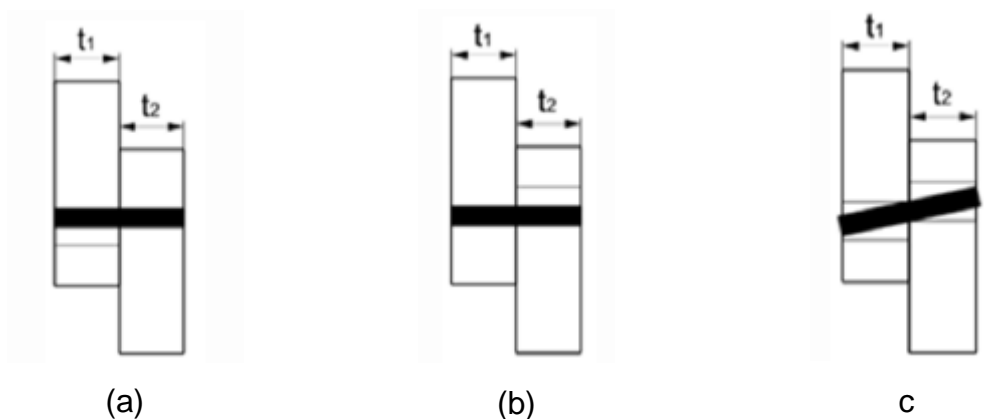
Para as situações em que $\beta > \beta_{lim}$ tem-se:

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{co,d,cav} \quad (\text{Com } \beta = \beta_{lim}) \quad (2.13)$$

2.4.2 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS DE ACORDO COM A ABNT NBR 7190 (2022)

A ABNT NBR 7190 (2022) em sua última revisão retirou de seu escopo as delimitações referentes as verificações de resistência de ligações cavilhadas. Apresentando equações para resistência de ligações com uma seção de corte (“cisalhamento simples”) ou duplo cisalhamento. Uma vez que as considerações para ligações cavilhadas não fazem parte do escopo da referida norma, foram adotados os limites e verificações de resistência de ligações com pinos metálicos. Onde as equações a seguir, apresentam a resistência de ligações em cisalhamento simples, bem como, o mecanismo de falha conforme figura 2.4 e 2.5.

Figura 2.4 - Modos de falha em ligações em cisalhamento simples: (a) embutimento do pino na madeira da esquerda; (b) embutimento do pino na madeira da direita; (c) embutimento do pino metálico em ambas as peças de madeira



Fonte: ABNT NBR 7190 (2022)

As resistências para cada ligação associadas ao modo de falha (a), (b) e (c) são apresentadas nas equações 2.14, 2.15 e 2.16.

$$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad (2.14)$$

$$F_{V,Rk2} = f_{e1,k} t_2 d \beta \quad (2.15)$$

$$F_{V,Rk3} = \frac{f_{e1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.16)$$

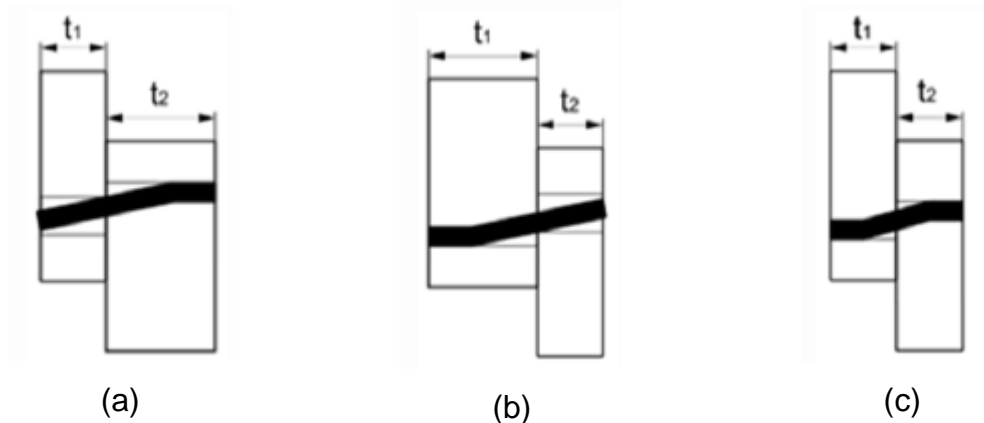
Sendo:

$f_{e1,k}$: São as resistências ao embutimento dos elementos de madeira 1 respectivamente;

t_1 : É a menor espessura dentre os elementos de madeira laterais, para os casos em corte simples e corte duplo.

β : É a razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira interligadas;

Figura 2.5 - Modos de falha em ligações em cisalhamento simples: (a) flexão do pino na madeira da direita; (b) flexão do pino na madeira da esquerda; (c) flexão do pino metálico em ambas as peças de madeira



Fonte: ABNT NBR 7190 (2022)

As resistências para cada ligação associadas ao modo de falha (a), (b) e (c) são apresentadas nas equações 2.17, 2.18 e 2.19.

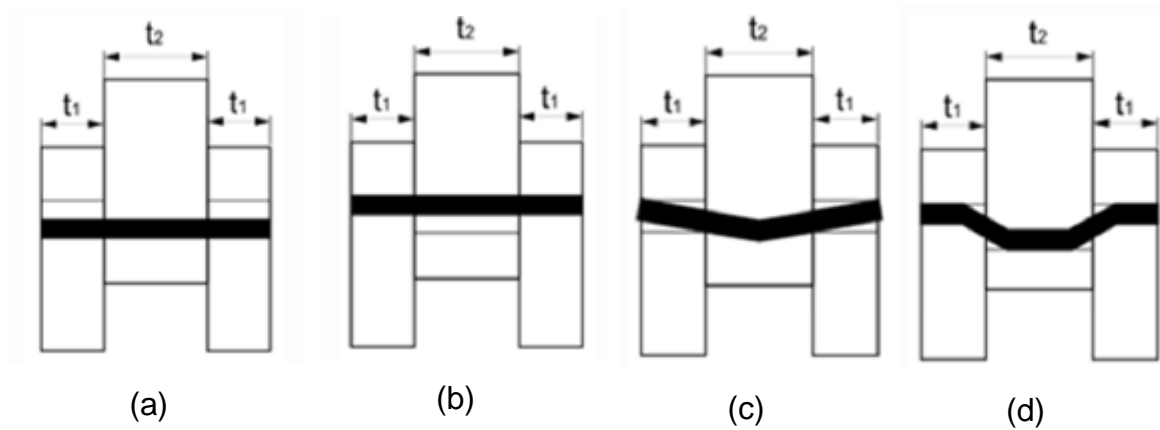
$$F_{V,Rk4} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.17)$$

$$F_{V,Rk5} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} dt_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.18)$$

$$F_{V,Rk6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.19)$$

Para as ligações submetidas em cisalhamento duplo, os mecanismos de falha são apresentados na figura 2.6, bem como, as resistências máximas por plano de cisalhamento são apresentadas nas equações 2.20, 2.21, 2.22, 2.23.

Figura 2.6 - Modos de falha em ligações em cisalhamento duplo: (a) embutimento do pino nas madeiras externas; (b) embutimento do pino na madeira interna; (c) flexão do pino metálico na peça interna; (d) flexão do pino na peça interna e externa



Fonte: ABNT NBR 7190 (2022)

$$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad (2.20)$$

$$F_{V,Rk2} = 0,5f_{e1,k} t_2 d \beta \quad (2.21)$$

$$F_{V,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.22)$$

$$F_{V,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2.23)$$

Onde para cada caso o valor de $F_{V,Rk}$ adotado é sempre o menor valor dentre os resultados analisados.

Sendo o valor de β determinado a partir da razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira interligadas conforme a equação 2.23 a seguir.

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (2.23)$$

O momento resistente característico do pino metálico $M_{y,k}$ em N.mm é determinado pela equação (2.24).

$$M_{yR,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2.24)$$

Onde:

$f_{u,k}$ é a resistência última característica à tração do aço do pino metálico, expressa em (MPa);

d é o diâmetro nominal do pino metálico, expresso em milímetros (mm).

2.4.3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DE ACORDO COM A ABNT NBR 7190 (2022)

A ABNT NBR 7190-1 (2022) apresenta as considerações referentes a resistência ao embutimento para o caso da ausência da realização de ensaios específicos. A referida norma relaciona a análise sem ou com pré-furação, bem como o diâmetro do elemento de ligação.

Para a determinação da resistência ao embutimento são necessários os valores da densidade característica (ρ_k), sendo determinada por meio de ensaios de caracterização.

Na referida análise lista-se as equações para uma análise com pré-furação e pinos com diâmetro de até 30 mm. O cálculo para a resistência ao embutimento são apresentados nas equações a seguir, sendo a equação (2.25) considerado o ângulo α em relação as fibras e a equação (2.26) na direção paralela às fibras, respectivamente.

$$f_{e90,K} = \frac{f_{e0,K}}{K_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2.25)$$

$$f_{e0,K} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_K \text{ (em } N/mm^2\text{)} \quad (2.26)$$

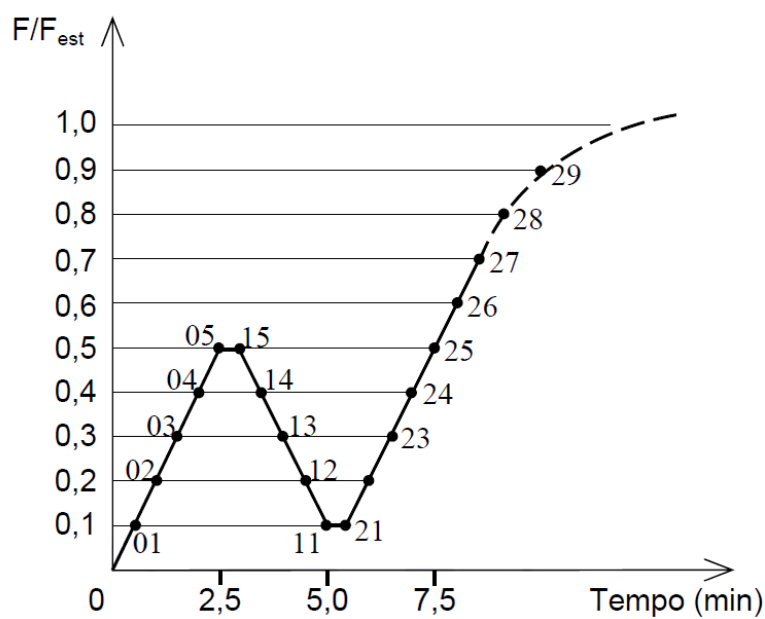
Sendo K_{90} adotado da seguinte maneira:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{(Para madeiras de coníferas)} \\ 1,30 + 0,015d & \text{(Para painéis de LVL)} \\ 0,90 + 0,015d & \text{(Para madeiras de folhosas)} \end{cases}$$

2.4.4 MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES COM CONECTORES MECÂNICOS

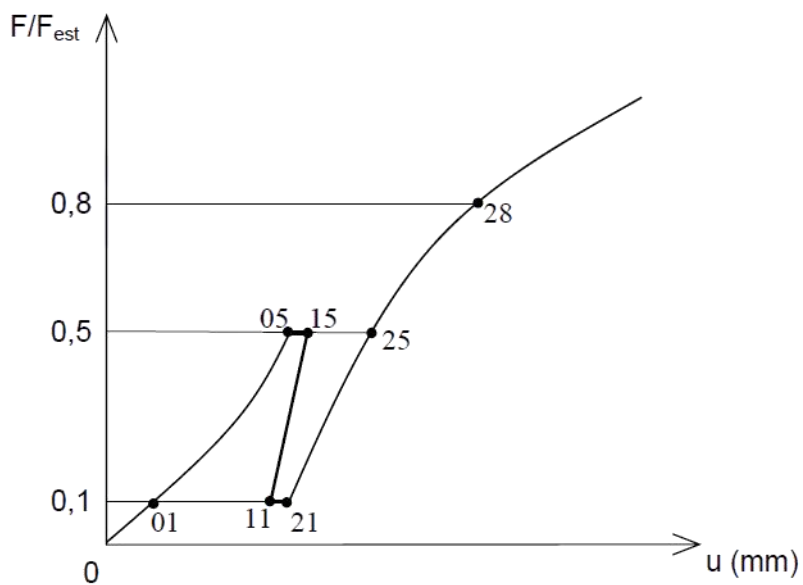
A análise da resistência das ligações com cavilhas foi realizada de acordo com as especificações da ABNT NBR 7190 - 5 (2022), mesma norma que embasou este ensaio. O ensaio realizou-se em dois ciclos de carga e descarga, 10% e 50% da resistência estimada da amostra - F_{est} .

Figura 2.7 – Aplicação do carregamento durante ensaio de resistência e rigidez de ligações.



Os valores dos deslocamentos devem ser anotados, e conforme a Figura 2.8, ser registrados para cada ensaio, bem como o deslocamento para a força máxima.

Figura 2.8 – Diagrama força *versus* deslocamento da ligação.



A partir das medidas registradas, devem ser determinados os seguintes valores, para cada ensaio:

- Força máxima: $F_{m\acute{a}x}$;
- Força máxima estimada: F_{est} ;
- Deslizamento inicial: $u_i = u_{05}$;
- Deslizamento inicial modificado: $u_{i,mod} = \frac{5}{4}(u_{05} - u_{01})$;
- Acomodação da ligação: $u_s = u_i - u_{i,mod}$;
- Deslizamento elástico: $u_e = \frac{5}{8}(u_{15} + u_{25} - u_{11} - u_{21})$;
- Módulo de deslizamento inicial: $k_i = 0,5F_{est} / u_i$;
- Módulo de deslizamento: $k_s = 0,5F_{est} / u_{i,mod}$;
- Deslizamento para $0,8F_{m\acute{a}x} = u_{0,8}$;
- Deslizamento para $0,8F_{m\acute{a}x}$ modificado: $u_{0,8,mod} = u_{0,8} - u_{25} + u_{i,mod}$.

2.4.5 LIGAÇÕES EM PEÇAS DE MADEIRA POR PINOS METÁLICOS

Conforme ABNT NBR 7190-1 (2022), as ligações com pinos metálicos apresentam comportamento misto levando em consideração a flexão do pino ou embutimento do pino na madeira. A referida norma complementa que para ligações com pinos metálicos devem ser respeitados os espaçamentos e pré-furações, conforme indicado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Espaçamento mínimo em ligações com pinos metálicos

Espaçamento ou distância	Ângulo α	Pregos com pré-furação	Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados	Pinos lisos
Espaçamento a_1 (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$	$(3 + 3 \cos \alpha) d$
Espaçamento a_2 (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 6 \sin \alpha) d$	4 d	3.d
Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(7 + 5 \cos \alpha) d$	Maior entre 7 d e 80 mm	Maior entre 7 d e 80 mm
Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	7 d 7 d 7 d	$(1 + 6 \sin \alpha) d$ 4 d $(1 + 6 \sin \alpha) d$	Maior entre $[(a_{3,t} \sin \alpha) d]$ e d 3d Maior entre $[(a_{3,t} \sin \alpha)] d$ e d
Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	Para $d < 5$ mm: $(3 + 2 \sin \alpha) d$ Para $d \geq 5$ mm: $(3 + 4 \sin \alpha) d$	Maior entre $(2 + 2 \sin \alpha) d$ e 3 d	Maior entre $(2 + 2 \sin \alpha) d$ e 3 d)
Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3 d	3 d	3 d

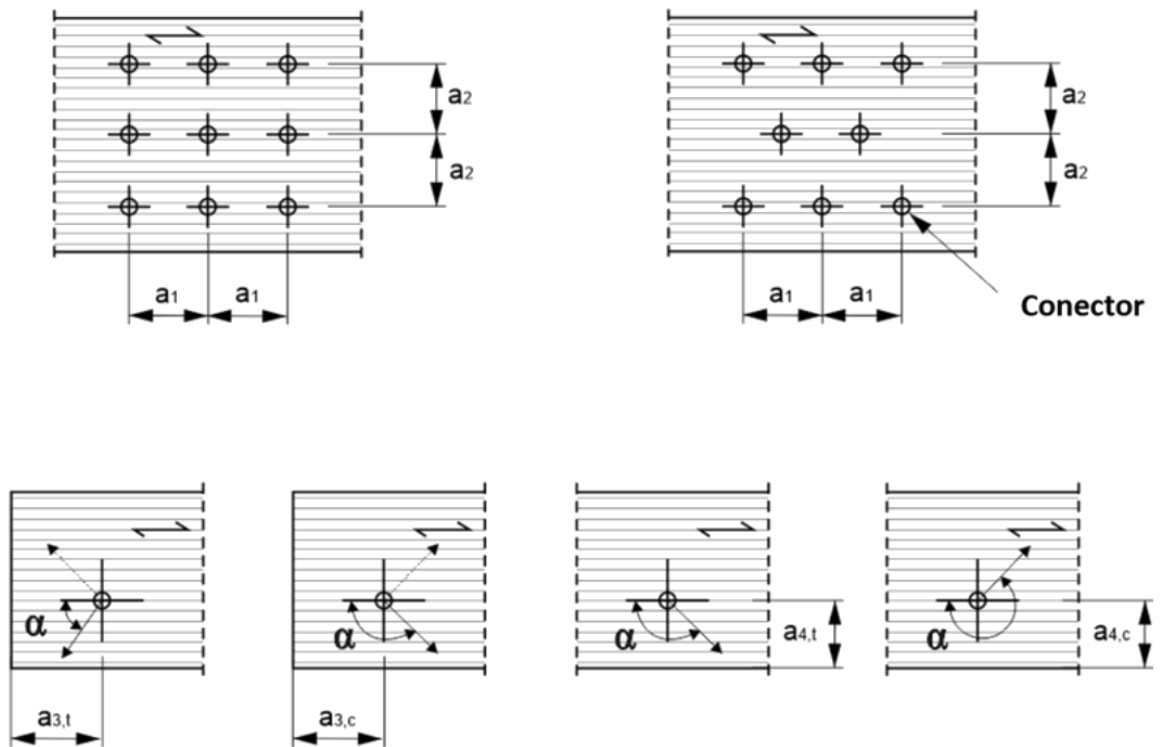
Fonte: ABNT NBR 7190 (2022)

Onde os valores indicados na tabela correspondem aos apresentados a seguir:

- a_1 refere-se ao espaçamento entre o centro de dois conectores situados em uma mesma linha paralela às fibras da madeira.
- a_2 refere-se ao espaçamento entre o centro de dois conectores situados em uma mesma linha perpendicular às fibras da madeira;
- $a_{3,c}$ é a distância do centro do conector à extremidade não carregada;
- $a_{3,t}$ é a distância do centro do conector à extremidade carregada;
- $a_{4,c}$ é a distância do centro do conector à borda lateral não carregada;
- $a_{4,t}$ distância do centro do conector à borda lateral carregada;
- α é o ângulo de inclinação entre a força e a direção das fibras.

A Figura 2.9 apresenta os espaçamentos descritos na Tabela XX.

Figura 2.9 - Distribuição dos conectores em ligações de estruturas de madeira



Fonte: ABNT NBR 7190 (2022)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Estruturas de madeira apresentam particularidades, muitos referentes a anisotropia do material, cujo apresenta bom comportamento a forças de tração e compressão na direção paralela às fibras.

O estudo de ligações tem recebido uma atenção especial em pesquisas, a exemplo no comportamento de ligações de madeira, utilizando os mais diversos tipos de materiais.

A seguir apresenta-se uma revisão bibliográfica a respeito das características gerais de ligações em estruturas de madeira utilizando cavilhas de madeira engenheirada para entendimento das disposições construtivas, mecanismos de falha, além de estudos realizados por diversos autores sobre o comportamento de ligações.

3.2 MADEIRA ENGENHEIRADA

A madeira apresenta ampla utilização em setores industriais, dentre eles, produção de celulose, energia de biomassa e painéis de madeira recomposta. Quanto as suas propriedades mecânicas, a madeira apresenta anisotropia, heterogeneidade, como também apresenta como característica, ser um material suscetível a biodegradação quando comparado a outros materiais (SOARES *et al.*, 2018).

Soares (2018), ainda cita o desenvolvimento de pesquisas quanto a tratamentos alternativos ou tradicionais, que proporcionam variações nas propriedades da madeira, dentre elas o aumento na resistência à compressão paralela às fibras e o incremento na estabilidade dimensional da madeira.

Dentre os tratamentos, Stolf (2005), denota a aplicação de monômeros líquidos internamente a madeira, por meio de métodos de impregnação, construindo os chamados compósitos polímero-madeira (CPMs).

Nos CPMs a impregnação é obtida por meio da aplicação de substâncias químicas no interior da madeira. Dentre os métodos de impregnação que podem ser realizados cita-se a impregnação por vácuo-imersão, que consiste na aplicação

de vácuo inicial, seguido da imersão no monômero, introduzido ainda sob vácuo, em seguida retira-se o vácuo e a impregnação é realizada à pressão atmosférica (MEYER, 1981).

Outro método de impregnação é por meio de vácuo-pressão onde as amostras são submetidas à vácuo, em seguida imersas no monômero ainda sob vácuo, e por último, ocorre a impregnação que é realizada com pressão acima da pressão atmosférica (MANRICH, 1984).

Autores como Gomes (1997), Stolf (2005) citam em suas pesquisas que o processo de impregnação se mostrou mais eficiente com aplicação de pressão de aproximadamente 1 MPa.

Após o processo de impregnação dá-se início a outra etapa, que consiste no processo de polimerização.

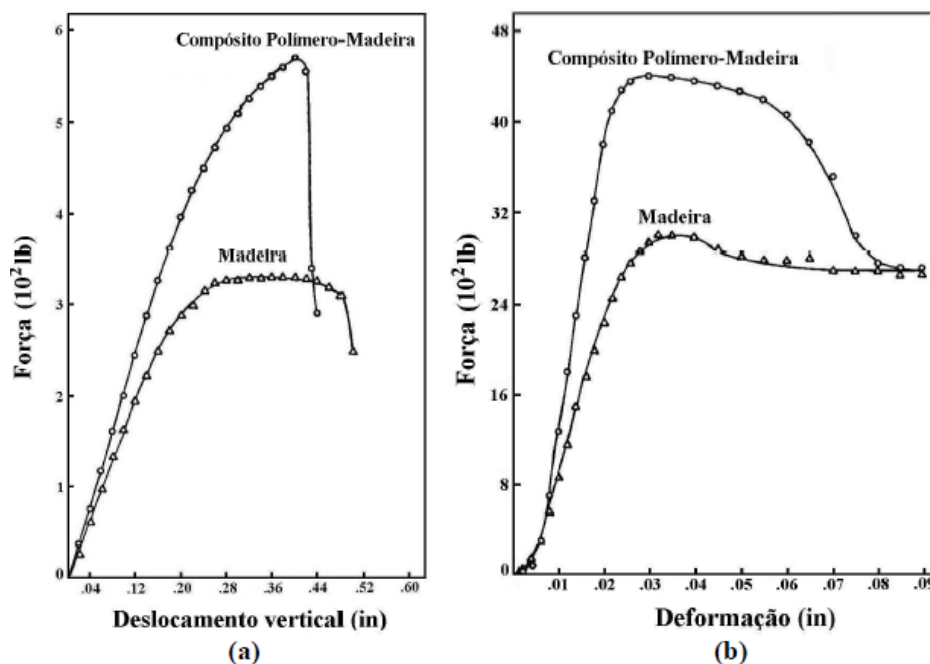
Conforme Gomes (1997), a polimerização é o processo de reação química onde as moléculas dos monômeros se unem umas às outras para ao final formar os polímeros. Sendo um dos processos mais comuns denominado polimerização por adição. Neste processo, a impregnação na madeira ocorre por polimerização via radicais livres dos monômeros, por meio de um iniciador. Stolf (2005), cita que o processo de polimerização feito por iniciadores, os quais os compostos que, com o aumento da temperatura facilmente decompõe-se em radicais livres é mais simples e econômico.

Nos processos de alteração das propriedades físicas e mecânicas da madeira, ressalta-se a utilização de monômeros bem como impregnação com resinas naturais.

De acordo com Schneider, Witt (2004) as substâncias utilizadas devem apresentar propriedades mecânicas superiores as da madeira não impregnada. Uma vez que a impregnação consiste no preenchimento dos poros da madeira indica-se utilizar substâncias duras, plásticas e sólidas (STOLF *et al.*, 2017).

A Figura 3.1 apresenta o comportamento de um CPMs comparado com uma madeira não impregnada.

Figura 3.1 - Comparação entre madeiras impregnadas e sem impregnação: (a) flexão estática; (b) compressão paralela às fibras.



Fonte: Langwig apud Stolf (2005)

Tais considerações fizeram que, com o passar dos anos, o interesse por materiais estruturais a base de madeira aumentasse. E como resultado, constantes pesquisas são realizadas a fim de aumentar o desempenho mecânico da madeira (PONOMAREV; RASSOKHIN, 2016).

Stolf (2005), cita que as espécies de madeiras mais efetivas para impregnação são as espécies de baixa densidade, devido apresentarem maior quantidade de poros e suficiente permeabilidade. Conforme pesquisa desenvolvida por Stolf (2005), a espécie *Pinus Caribea var. hondurensis* apresentou respostas significativas quanto a impregnação de monômeros, bem como ganhos significativos quanto as propriedades mecânicas, dentre elas cita-se a resistência à compressão paralela as fibras. Já a espécie *Eucalyptus grandis* não mostrou resposta significativa a impregnação de monômeros, não alterando suas propriedades mecânicas.

Diversos pesquisadores avaliaram as alterações das propriedades mecânicas da madeira por meio do método de impregnação, utilizando monômeros como o metacrilato de metila, resinas estirenicas, ou resinas naturais.

A impregnação de resinas naturais consiste no uso de extratos provenientes da própria madeira, à exemplo cita-se a resina de Breu, produto da resinagem da madeira *Pinus*, como também resíduos com baixa ou nenhuma utilização nas indústrias, como exemplo os bio-óleos (SOARES *et al.*, 2018). A pesquisa desenvolvida por Zeng *et al.* (2022) apresentam aumento de aproximadamente 39% na resistência à compressão paralela as fibras, bem como, os efeitos do tempo de impregnação na resistência de madeiras coníferas da região da China utilizando impregnação com resinas naturais.

Soares *et al.*(2018) apresenta ganho de resistência biológica de madeiras da espécies *Pinus* tratadas com resinas naturais à base de breu, sendo uma alternativa viável para alterar as propriedades físicas da madeira *Pinus*.

Já pesquisas desenvolvidas por Stolf *et al.* (2017a), Gomes (1997), Li *et al.*(2011), Li *et al.* (2010) apresentam o comportamento de madeiras impregnadas com monômeros, dentre eles, metacrilato de metila e estireno.

Stolf (2005) apresenta ganhos significativos de aumento da dureza paralela e normal às fibras na ordem de 300% e 400% após a impregnação de monômeros de estireno e metacrilato de metila em madeiras da espécie *Pinus Caribea var. hondurensis*.

3.3 TRABALHOS EXPERIMENTAIS SOBRE LIGAÇÕES COM CAVILHAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

O estudo de ligações com cavilhas em estruturas de madeira é objeto de pesquisas de muitos autores, dentre eles, cita-se Barcarolo (2019), Almeida; Moura (2022), Ceraldi *et al* (2017), Dorno *et al* (2013), Teodorescu (2020).

Barcarolo (2019) desenvolveu uma pesquisa que analisou o comportamento de ligações em cavilhas poliméricas confeccionadas com matriz polimérica com base em epóxi reforçadas com fibra de vidro. Na referida pesquisa analisou-se o comportamento da ligação quando a mesma foi submetida ao esforço de duplo corte na linha de ação da força. Obtendo resultados significativos quando comparando aos valores resistentes por ligações pregadas e parafusadas. Barcarolo (2019) conseguiu resultados de até 75,40 kN para cavilhas confeccionadas com matriz epóxi reforçadas com fibra de vidro. As Figuras 3.2 e

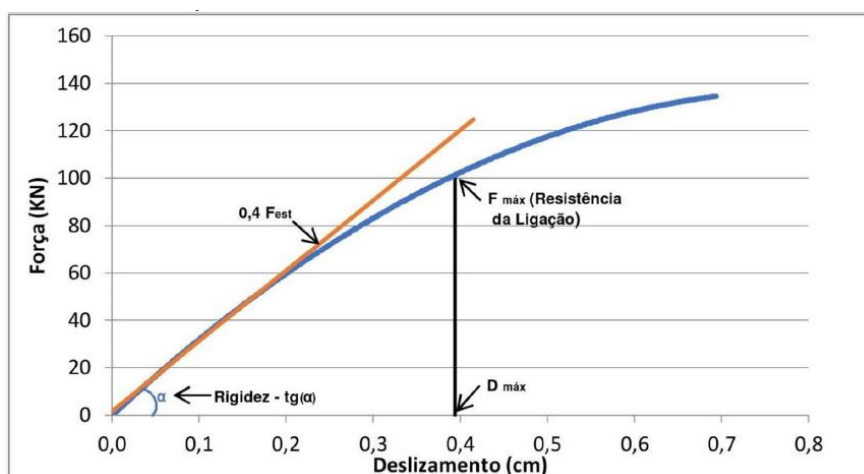
3.3 apresentam o ensaio realizado e o diagrama força deslizamento encontrada por Barcarolo (2019).

Figura 3.2 - Ligação cavilhada com cavilhas de polímero reforçado com fibra de vidro.



Fonte: Barcarolo (2019)

Figura 3.3 - Diagrama força deslizamento da ligação

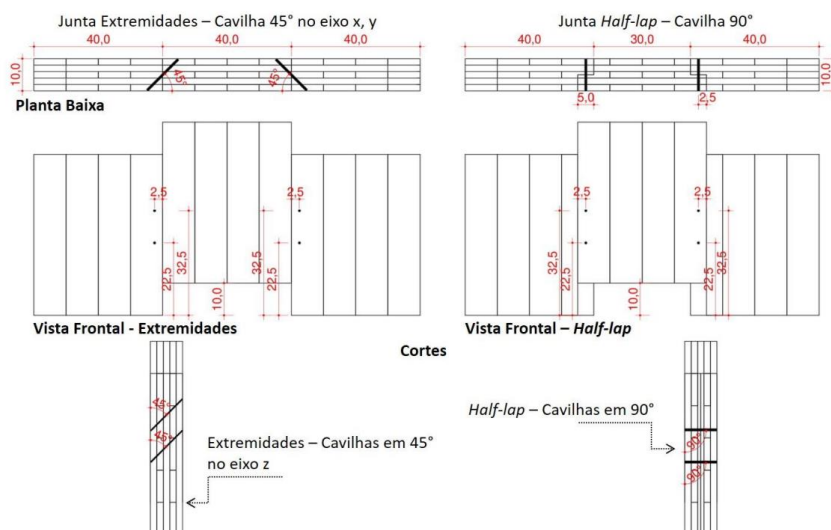


Fonte: Barcarolo (2019)

Almeida; Moura (2022), ressaltam a questão de sustentabilidade aplicada a construção civil, levando a indústria da construção civil a adotar tecnologias mais ecológicas como alternativa a construção tradicional. Neste contexto Almeida;

Moura (2022) avaliaram o comportamento de ligações cavilhadas com cavilhas confeccionadas com fibra de vidro aplicadas em painéis CLT, submetendo as ligações a esforços de cisalhamento, utilizando cavilhas inclinadas a 45° e 90° , obtendo resistências maiores para as cavilhas posicionadas a 90° . As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os modelos experimentais e os resultados obtidos.

Figura 3.4 - Modelos experimentais: Cavilhas a 45° e Cavilhas a 90°



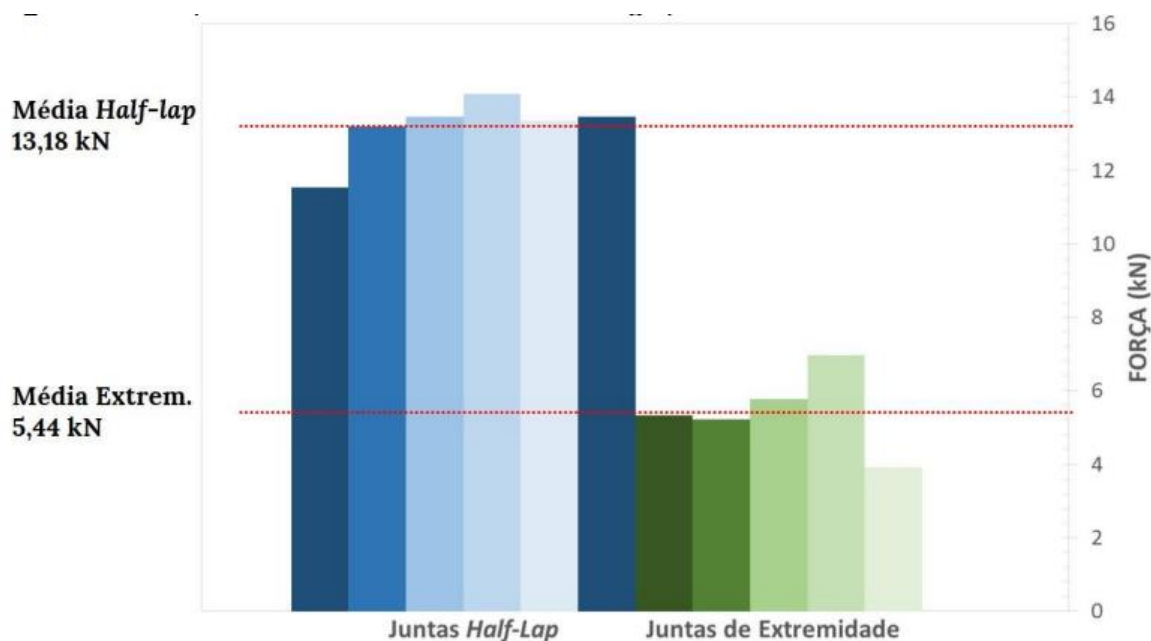
Fonte: Almeida (2019)

Figura 3.5 - Ensaio experimental



Fonte: Almeida (2019)

Figura 3.6 - Força máxima encontrada para cavilhas à 45° e 90°

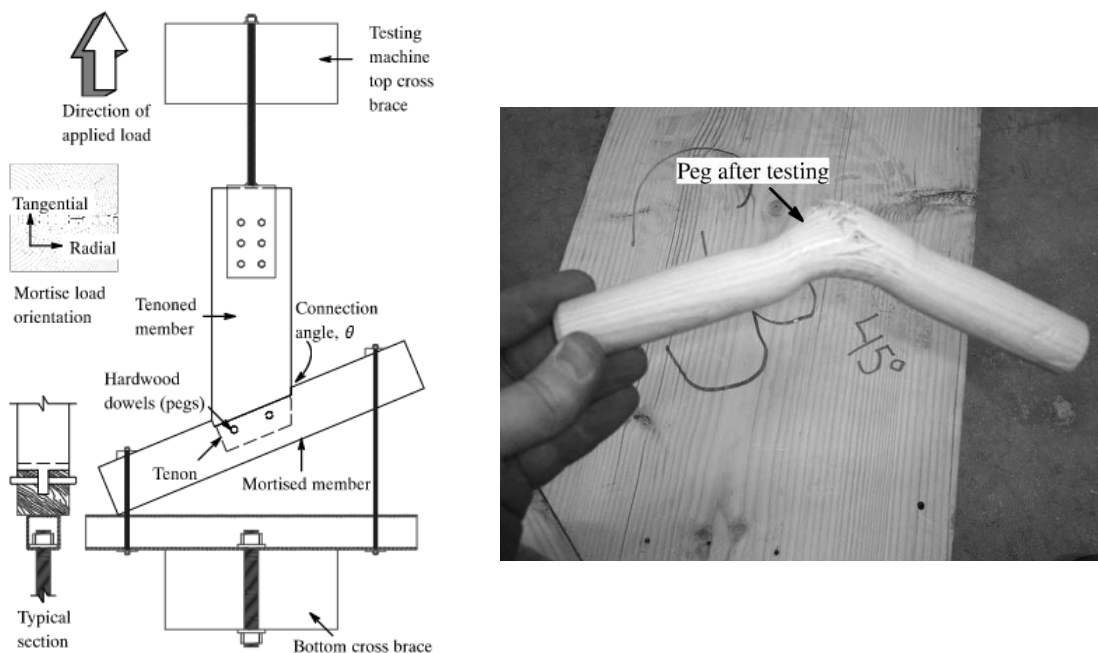


Fonte: Almeida (2019)

A pesquisa desenvolvida por Ceraldi *et al* (2017) avaliou por meio de um programa experimental a aplicação da teoria de Johansen, no modelo de falha de cavilhas de madeira. Ceraldi *et al* (2017), cita que a teoria de Johansen formulada para ligações com pinos metálicos apresentou diferentes respostas para ligações com cavilhas de madeira, onde, de acordo com o programa experimental, quando o diâmetro da cavilha é menor que a espessura das placas de ligação se faz necessário um amplo estudo experimental e numérico para diferentes espécies de madeira.

Como já citado anteriormente a teoria de Johansen é utilizada por normativas europeias para previsão do mecanismo de ruptura de ligações com pinos metálicos. A comparação entre as resistências analíticas e experimentais são objeto de estudo em pesquisas sobre o comportamento de ligações com cavilhas de madeira. Judd *et al.* (2012) compararam a resistência teórica de ligações utilizando cavilhas de madeira com os valores obtidos por meio de análise experimental, encontrando valores médios de 14% a 9% de diferença, como o mecanismo de ruptura dos elementos de ligação.

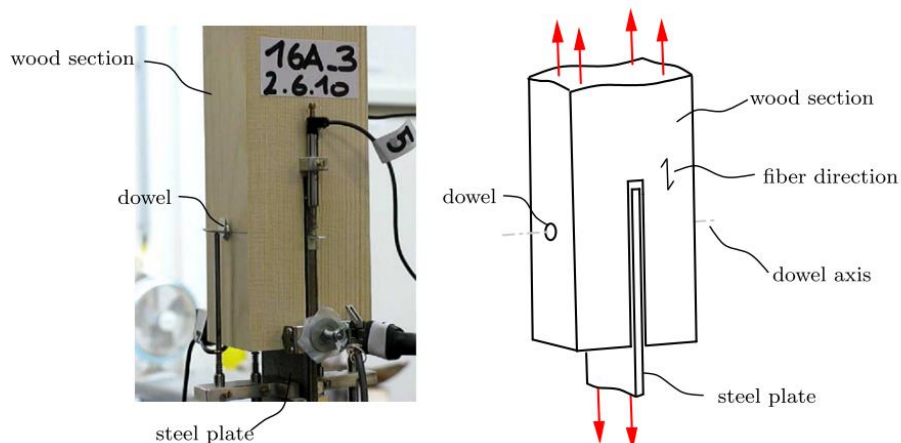
Figura 3.7 - Esquema de ensaio de ligação e mecanismo de falha da cavilha



Fonte: Judd *et al.* (2012)

Já Dorno *et al* (2013), pesquisou o comportamento de ligações cavilhadas com diâmetro de 12 mm sob ação de forças de cisalhamento na direção paralela às fibras na linha de ação da ligação, analisando a resistência da ligação com madeiras de baixa densidade e alta densidade, como também, a análise do comportamento da ligação quanto a utilização de cavilhas com rugosidade nas paredes comparando com superfícies lisas, comparando resultados analíticos com experimentais.

Figura 3.8 - Ensaio de cisalhamento de cavilhas



Fonte: Dorno *et al.* (2013)

Durante o programa experimental foi encontrado que cavilhas elaboradas com madeiras de maior densidade (madeiras duras), apresentaram cargas finais significativamente maiores do que cavilhas elaboradas com madeiras de menor densidade (madeiras moles).

Ainda de acordo com Dorno *et al* (2013), ligações com cavilhas elaboradas com madeiras mais densas são propensas a ruptura frágil, e para madeiras menos densas a resposta a ruptura da ligação foi com comportamento inverso, ou seja, uma ruptura dúctil com extenso patamar de escoamento até a ruptura.

Teodorescu (2020), apresenta estudos do comportamento de ligações cavilhadas, ressaltando sua utilização em situações de retrofit, ou reforços em estruturas de madeira com idade avançada. O referido autor indica que a utilização de cavilhas é uma solução eficaz e com menores custos quando comparada com outros tipos de ligações.

Ainda de acordo com Teodorescu (2020), existe uma falta de informação quando ao comportamento destes tipos de ligações elaboradas com cavilhas de madeira, em termos de expressões analíticas bem como modelos numéricos.

3.4 TRABALHOS SOBRE ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES CAVILHADAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

Muitos trabalhos tratam sobre o comportamento de ligações utilizando cavilhas e suas variações. Os estudos se devem as ausências de informações na interpretação do comportamento de ruptura e força última, sendo a base dos estudos utilizando modelos numéricos por meio do método dos elementos finitos, utilizando a exemplo o programa ABAQUS.

Desenvolver um modelo numérico para estimar o comportamento de ligações de madeira é uma análise complexa, isso devido a interação entre os materiais que compõe a ligação bem como os modos de falha (KHELIFA *et al.*, 2016).

Ainda de acordo com o referido autor, simular o comportamento da madeira requer critérios de falha específicos para representar o comportamento anisotrópico do material.

Xu *et al.* (2009), apresenta a utilização do critério de falha para prever o comportamento de ligações cavilhadas em ligações de madeira submetidas a forças de tração na direção paralela as fibras da madeira. Para analisar tal

comportamento o modelo do material adotado é baseado no comportamento isotrópico do aço e no comportamento isotrópico transversal da madeira, sendo utilizado o critério de Hill para controlar o escoamento plástico da madeira combinado com sua evolução de dano.

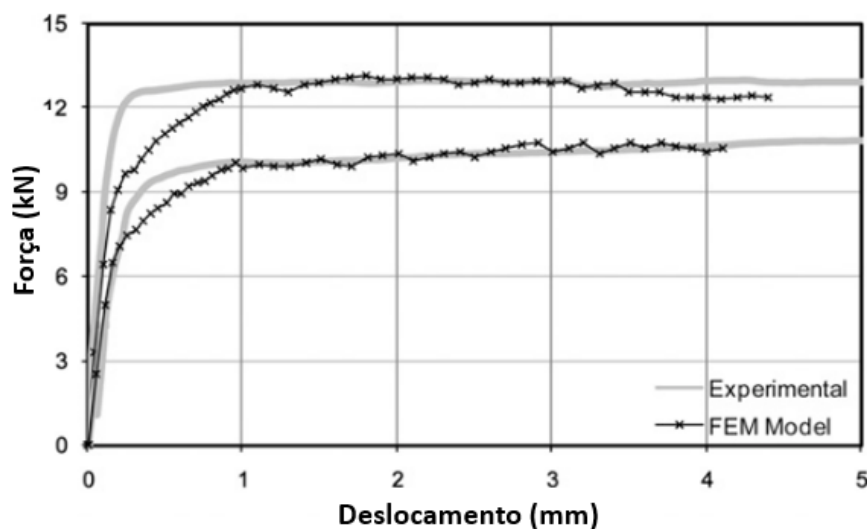
O método dos elementos finitos (MEF) é um método que cada vez mais predomina na análise da mecânica estrutural (LACOURT; CRISAFULLI; MIRASSO, 2016). O referido autor apresenta a construção de um modelo numérico proposto, com base em um modelo experimental. A modelagem inclui uma combinação de elementos não lineares, que representa de maneira adequada o comportamento da ligação, perda de rigidez e mecanismo de falha. O mecanismo de modelagem apresentado é definido como a transição do comportamento da resposta elástica para inelástica por meio de molas de amortecimento com diferentes graus de liberdade, onde as propriedades das molas podem ser alteradas sempre que necessário para modificar a resposta do modelo.

Ressalta-se que estudos de modelagem em ligações de madeira variam desde modelos mais simples com base no comportamento de curvas carga x deslocamento, até modelos de cargas cíclicas incluindo elementos não lineares detalhadas para cada elemento que compõe a ligação (SCHNEIDER, J. *et al.*, 2015).

Modelos de ligações por meio do MEF podem ser desenvolvidos considerando contato deformável, bem como modelos de contato considerando o atrito entre as superfícies (CHEN; LEE; JENG, 2003), (RACHER; BOCQUET, 2005).

Dias *et al.* (2010) apresentam resultados significativos comparando modelos numéricos e modelos experimentais, analisando comportamento de ligações cavilhadas elaboradas utilizando madeiras moles e madeiras duras. Para que o modelo numérico apresente comportamento idealizado os referidos autores desenvolveram modelos não lineares, utilizando como critério de dano o critério de Hill. A Figura 3.9 apresenta os resultados obtidos.

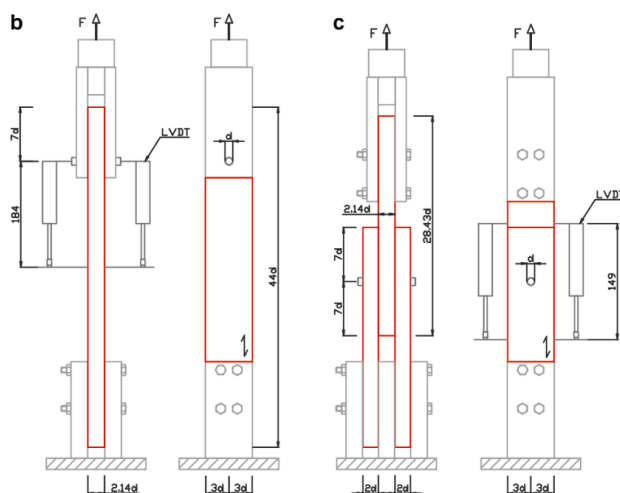
Figura 3.9 - Curva força versus deslocamento modelos experimentais e numéricos



Fonte: Dias *et al.* (2010)

Santos *et al.* (2009) apresentam análises comparativas entre resultados experimentais e numéricos para prever o mecanismo de ruptura de ligações utilizando cavilhas de madeira Pinus, submetidas a situação de corte simples e duplo. Comparando os resultados com equações analíticas presentes em normativas Eurocode (2004), bem como, a calibração do modelo numérico. A Figura 3.10 apresenta o modelo experimental utilizado.

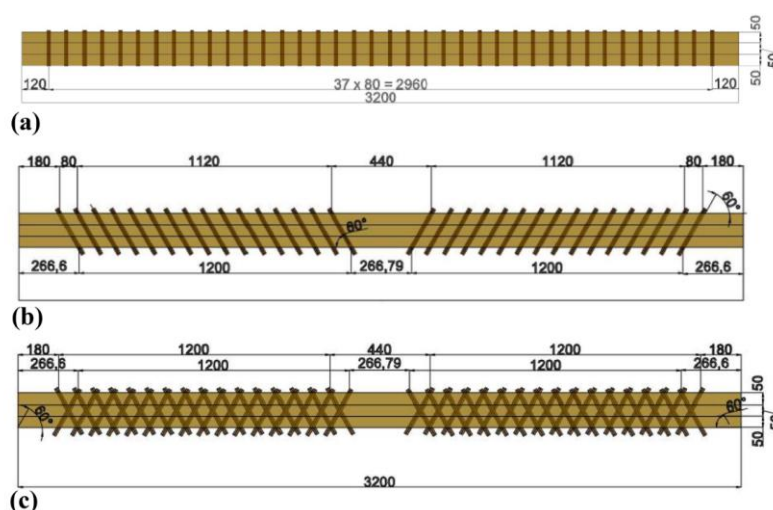
Figura 3.10 - Modelo experimental



Fonte: Santos *et al.* (2009)

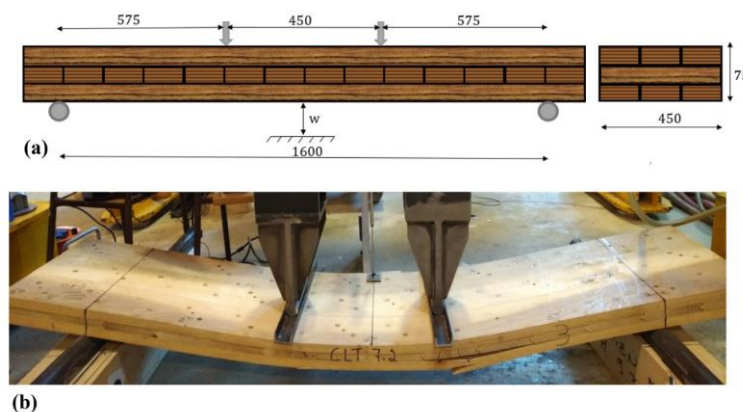
El Houjeyri *et al* (2021) apresentam a utilização de cavilhas na confecção de vigas ou painéis de madeira lamelada colada sem a utilização de adesivos. De modo que fixação entre as camadas são realizadas por meio de cavilhas de madeira. Os referidos autores também desenvolvem um modelo numérico aferido por meio de dados experimentais. A Figura 3.11 apresenta o modelo proposto para a confecção das vigas e painéis.

Figura 3.11 - Disposição das cavilhas nos modelos experimentais para aferição de modelo numérico: (a) Cavilhas inseridas a 90°; (b) Cavilhas com inclinação de 60°; (c) Cavilhas cruzadas com ângulo de 60°.



Autor: El Houjeyri *et al* (2021)

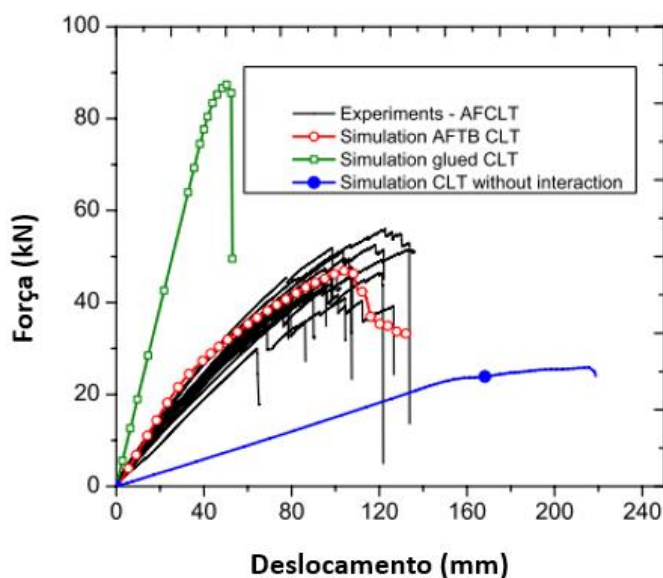
Figura 3.12 - Modelo experimental: (a) Dimensões do modelo experimental; (b) Ensaio experimental



Fonte: El Houjeyri *et al* (2021)

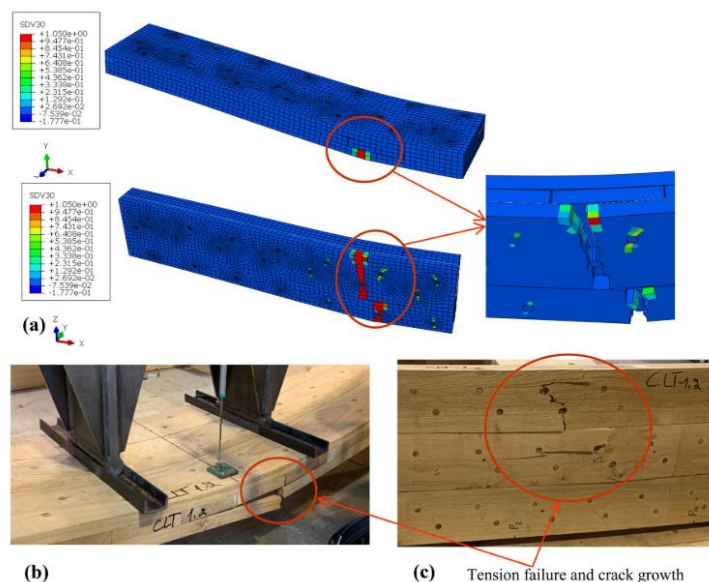
Para o desenvolvimento numérico os autores utilizaram o critério de falha proposto por Hoffman, isso porque este modelo considera diferenças entre esforços de tração e compressão não presente no critério de Hill. Obtendo resultados significativos quando comparado a resposta numérica com o modelo experimental. As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam a curva tensão *versus* deformação, e um comparativo entre o modelo numérico desenvolvido com o modelo experimental.

Figura 3.13 - Comparação entre modelo numérico e experimental



Fonte: El Houjeyri et al (2021)

Figura 3.14 - Comparação entre modelo numérico e experimental



Fonte: El Houjeyri et al (2021)

3.5 CONCLUSÕES DAS REVISÕES

Neste capítulo foram apresentadas algumas propriedades mecânicas fundamentais para o estudo numérico e experimental de ligações cavilhadas, bem como, a forma de obtê-las e relação entre elas, de acordo com o encontrado em diversa pesquisas e normas técnicas. As principais conclusões para aplicação no trabalho são apresentadas a seguir.

A impregnação em madeiras coníferas é uma técnica que apresenta respostas eficientes, tanto para controle de qualidade da madeira e alguns pesquisadores apresentam respostas eficientes quanto ao ganho de resistência, quando utilizam monômeros de estireno ou metacrilato de metila, viabilizando a utilização da metodologia para utilização em ligações.

O estudo de ligações tem sido alvo de pesquisas, sendo que em alguns casos foram realizados testes com materiais poliméricos, como por exemplo, o polímero reforçado com fibra de vidro.

Pesquisas indicam a utilização de cavilhas em situações de reforço de estruturas de madeira, onde muitas vezes a mesma apresenta vantagens quanto ao surgimento de manifestações patológicas, citando a exemplo a presença de corrosão quando comparado com ligações que utilizam pinos metálicos.

Pesquisas apresentam modelos numéricos que convergem com modelos experimentais, mas ainda existe um amplo campo de estudo, visto a dificuldade do desenvolvimento de modelos em elementos finitos de materiais anisotrópicos.

Dentre os modelos constitutivos cita-se o critério de Hill, utilizado por vários pesquisadores quando verificam o comportamento de ligações em situação de cisalhamento duplo ou simples.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

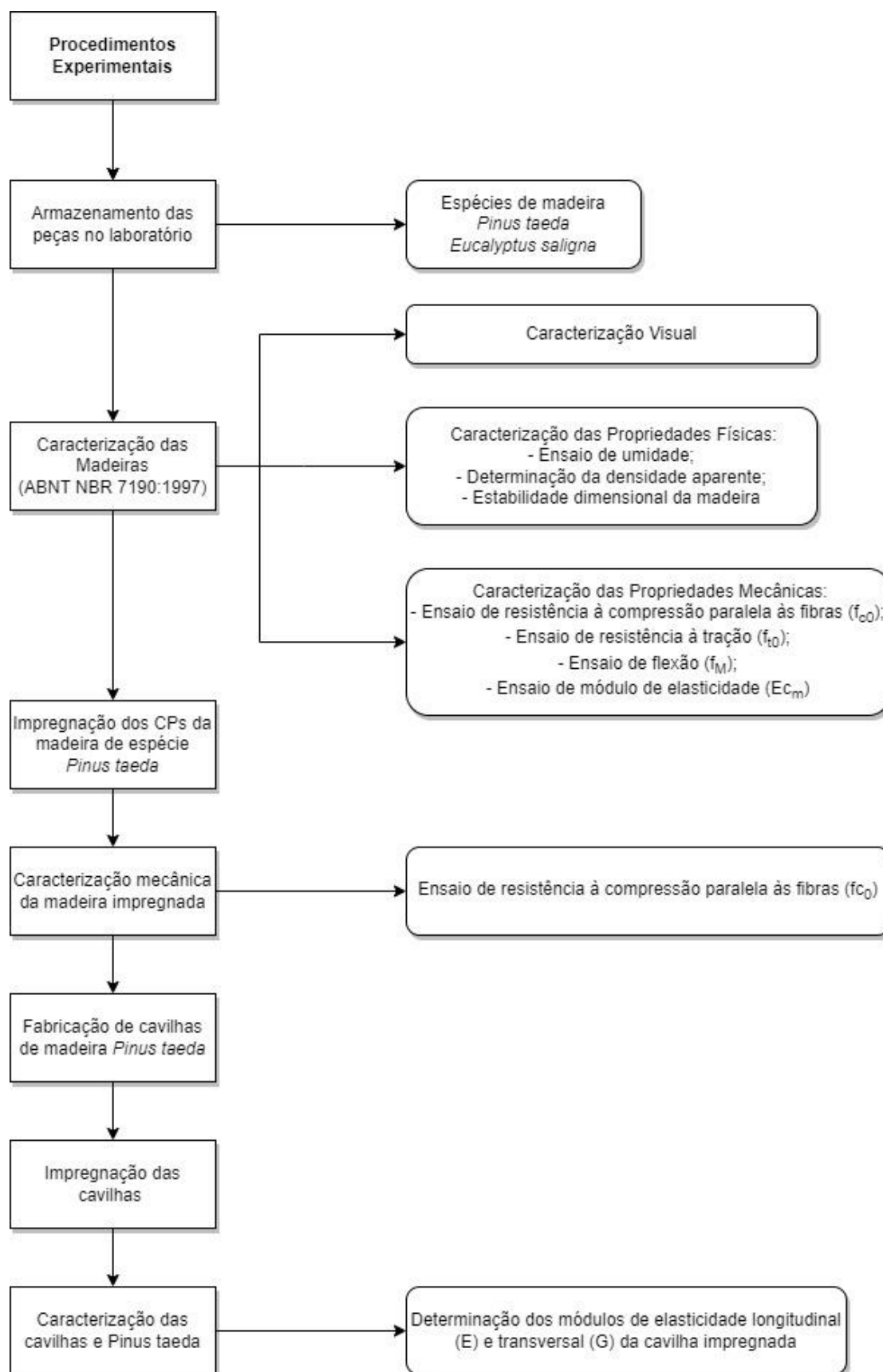
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi realizado em duas etapas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A primeira etapa consistiu nos ensaios de caracterização de acordo com ABNT NBR 7190 (1997) das madeiras da espécie *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, sendo realizados os seguintes ensaios: densidade aparente, estabilidade dimensional, resistência à compressão paralela as fibras (f_{c0}), resistência à tração paralela as fibras (f_{t0}), ensaio de flexão (f_M). A madeira também foi caracterizada como madeira engenheirada por meio dos ensaios de resistência à compressão paralela as fibras (f_{c0}). A segunda etapa consistiu na caracterização das cavilhas de madeira engenheirada da espécie *Pinus taeda* por meio do ensaio de flexão.

Nota-se que durante a realização da pesquisa a ABNT NBR 7190 sofreu uma revisão denotando outras considerações de caracterização para madeira de florestas plantadas. No entanto para não se alterar o processo de caracterização já iniciado, foram adotadas as premissas da ABNT NBR 7190 (1997).

Na Figura 4.1 são apresentadas as propriedades dos materiais empregados, bem como a descrição dos ensaios realizados.

Figura 4.1 - Fluxograma procedimentos experimentais



Fonte: o Autor (2023)

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS MADEIRAS

Nesta pesquisa foram utilizadas madeiras das espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, o estudo consiste em avaliar qual madeira apresentaria resposta mais significativa ao processo de impregnação. Assim que as espécies de madeira foram recebidas, as mesmas foram submetidas a uma inspeção visual, que não apresentou defeitos significativos. Sendo as peças armazenadas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina – PR, conforme Figura 4.2. As espécies de madeira utilizadas na pesquisa foram fornecidas pela empresa Klabin® unidade de Telêmaco Borba -PR.

Figura 4.2 - Madeira utilizada na pesquisa *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*: (a) Etapa de corte das peças; (b) Armazenada no laboratório de estruturas UEL



(a)

(b)

Fonte: o Autor (2023)

Após inspeção visual foram iniciados os ensaios de caracterização física e mecânica das referidas espécies de madeira. O processo de caracterização foi desenvolvido de acordo com as determinações da ABNT NBR 7190 (1997). A Tabela 4.1 a seguir apresenta as propriedades avaliadas, bem como a quantidade de corpos de prova para cada ensaio.

Tabela 4.1 - Ensaio nas espécies de madeira

Propriedades avaliadas		Número de corpos de prova por espécie de madeira	
		<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
Classificação		6	6
Visual	ABNT NBR 7190 (1997)	6	6
Físicas	Ensaio de umidade	12	12
	Ensaio de densidade aparente	12	12
	Ensaio de estabilidade dimensional	12	12
Mecânicas	Resistência à compressão paralela às fibras	12	12
	Ensaio de resistência à tração paralela às fibras	8	8
	Ensaio de resistência à flexão	5	5
	Ensaio de módulo de elasticidade da resistência à tração paralela às fibras	8	8
	Ensaio de módulo de elasticidade na flexão	5	5

Fonte: o Autor (2023)

As dimensões efetivas das madeiras foram avaliadas para a realização dos ensaios de caracterização listados, sendo as premissas estabelecidas pela ABNT NBR 7190 (1997).

4.2.1 ENSAIO DO TEOR DE UMIDADE

Para se determinar a umidade de cada espécie de madeira foram adotadas as premissas da ABNT NBR 7190-2 (2022). O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa de água nela contida seca, calculada conforme Equação 4.1 a seguir:

$$U_{\%} = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Sendo:

m_i é a massa inicial do corpo de prova expressa em gramas (g);

m_s é massa da madeira do corpo de prova expressa em gramas (g).

Para a determinação do teor de umidade da madeira os corpos de prova foram elaborados com seção transversal nominal de 2 cm por 3 cm e comprimento de 5 cm, conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3 - Amostras para ensaio de umidade: (a) amostras de *Pinus taeda*; (b) Amostras de *Eucalyptus saligna*



(a)

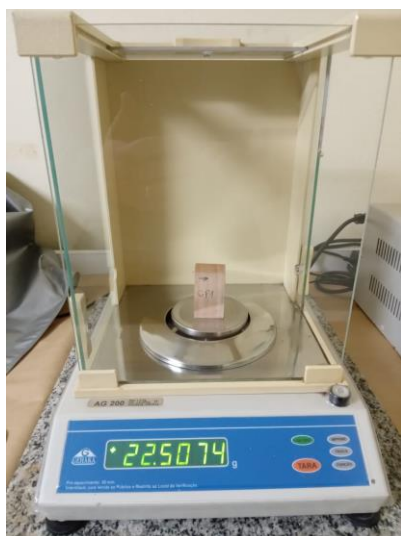


(b)

Fonte: o Autor (2023)

Em seguida foram determinadas as massas iniciais m_i com balança com precisão de 0,01 g. Em seguida foram colocados em estufa para secagem com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Figura 4.4 - Procedimento de ensaio de umidade: (a) Balança de precisão; (b) estufa para secagem das amostras.



(a)



(b)

Fonte: o Autor (2023)

Durante a etapa de secagem foram retiradas a massa de cada corpo de prova a cada 6 horas até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5%.

4.2.2 ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE

Para se determinar a densidade de cada espécie de madeira foram adotadas as premissas da ABNT NBR 7190 - 3 (2022). A referida norma apresenta a relação entre a massa e o volume dos corpos de prova com teor de umidade de 12%, conforme à equação 4.3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (4.3)$$

Sendo:

m_{12} é a massa do corpo de prova a 12% de umidade, expressa em quilogramas (kg);

v_{12} é o volume do corpo de prova a 12% de umidade, expressa em metros cúbicos (m^3).

Para a determinação da densidade aparente os corpos de prova foram confeccionados com seção transversal nominal de 2 cm por 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Atentando – se para a distância radial entre anéis de crescimento menor que 4 mm.

4.2.3 ENSAIO DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DA MADEIRA

O ensaio de estabilidade dimensional, consistiu em determinar o grau de estabilidade da madeira por meio de retração e inchamento, conforme indicado a ABNT NBR 7190 – 3 (2022).

Figura 4.5 - Amostras para ensaio de estabilidade dimensional: (a) Amostras em recipiente; (b) Realização das medições das amostras.



(a)



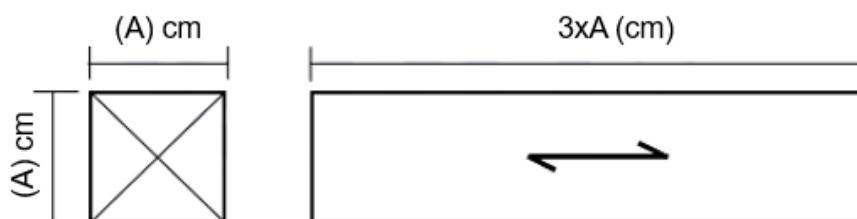
(b)

Fonte: o Autor (2023)

4.2.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (f_{c0})

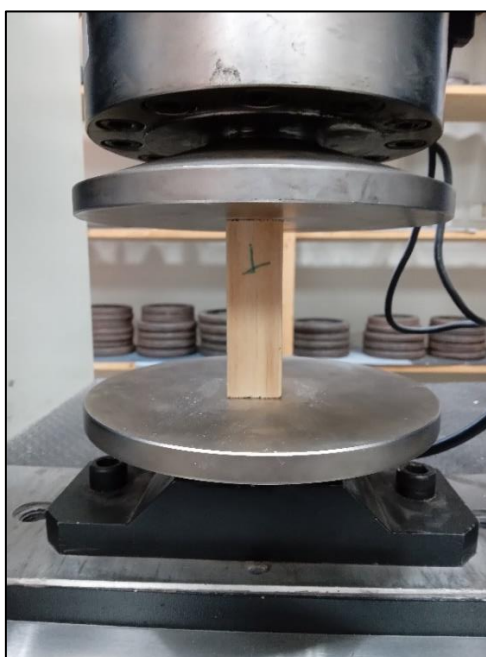
A obtenção da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), foram consideradas as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997), posicionando os corpos de prova (carregamento e descarregamento) nos pratos do equipamento de ensaio Instron EMIC DL 30000, conforme a Figura 4.6. O carregamento foi aplicado com controle de deslocamento a uma velocidade de 10 MPa/min conforme indicado pela referida norma.

Figura 4.6 - Dimensão dos corpos de prova de ensaio de resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: Adaptado ABNT NBR 7190 (1997)

Figura 4.7 - Ensaio de compressão paralela às fibras

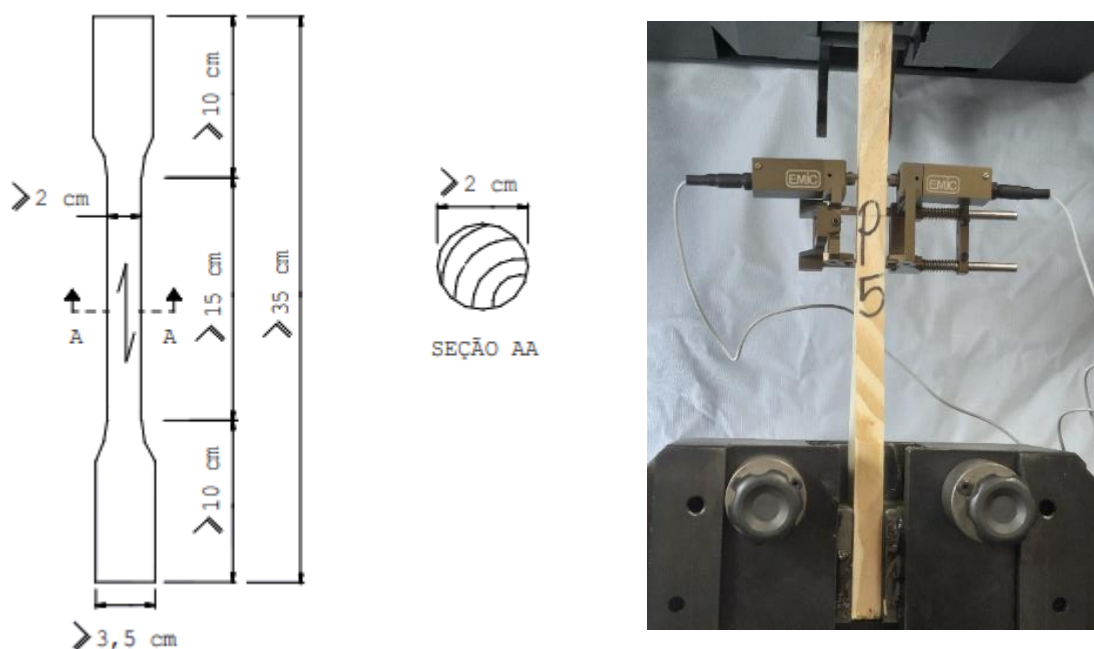


Fonte: o Autor (2023)

4.2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELAS AS FIBRAS (f_{t0})

Para a obtenção da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), foram consideradas as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997), posicionando os corpos de prova (carregamento e descarregamento) no equipamento de ensaio Instron EMIC DL 30000, conforme as Figuras 4.8 (a) e 4.8 (b). O carregamento foi aplicado com controle de deslocamento a uma velocidade de 10 MPa/min. Foram posicionados dois clips gages de base igual a 50 mm, posicionados de maneira simétrica nas faces do corpo de prova. Com isso, foi possível obter a curva tensão *versus* deformação específica, determinando assim, o módulo de elasticidade das madeiras medido entre 10% e 50% da máxima resistência à tração.

Figura 4.8 - Ensaio de tração paralela às fibras: (a) Dimensões para ensaio; (b) Realização do ensaio



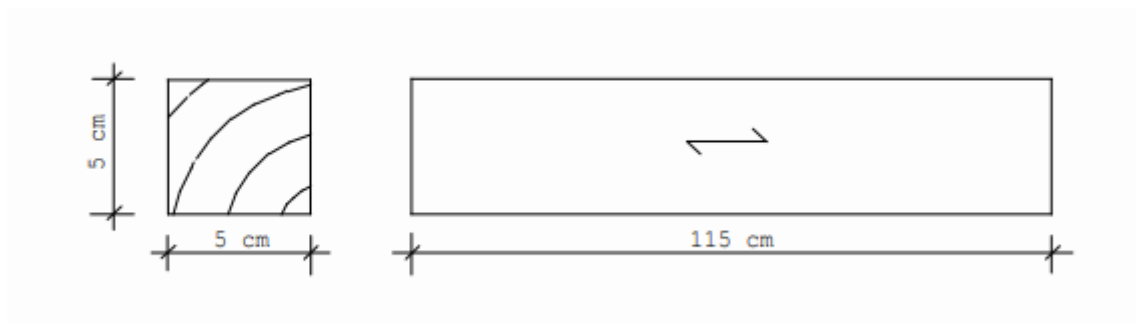
Fonte: o Autor (2023)

4.2.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO (f_M)

Para a obtenção da resistência à flexão, foram consideradas as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997), posicionando os corpos de prova

(carregamento e descarregamento) no equipamento de ensaio Instron EMIC DL 30000, conforme a Figura 4.8. O carregamento foi aplicado com controle de deslocamento a uma velocidade de 10 MPa/min. Com isso, foi possível obter a curva força *versus* deslocamento, determinando assim o módulo de elasticidade das madeiras medido entre 10% e 50% da máxima resistência à flexão.

Figura 4.9 - Dimensões do corpo de prova de ensaio à flexão paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

A Figura 4.10 apresenta a realização do ensaio de flexão no Laboratório de estruturas das Universidade Estadual da Londrina.

Figura 4.10 - Ensaio de flexão



Fonte: o Autor (2023)

4.3 METACRILATO DE METILA

De acordo com Stolf (2005), o monômero de metacrilato de metila (MMA), é obtido por meio da esterificação de duas matérias primas, sendo elas, acetona cianídrica e o metanol.

Sua utilização está presente na fabricação de chapas acrílicas, polímeros para uso de tintas, vernizes e resinas para papel.

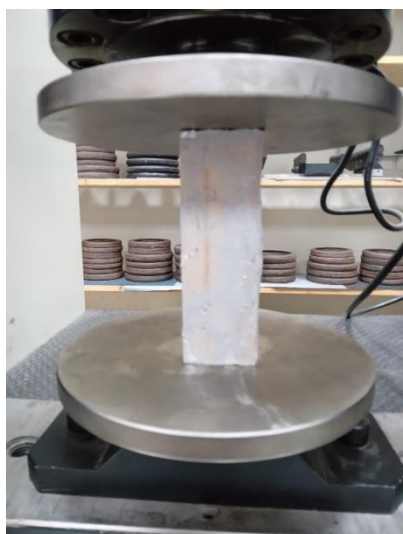
O monômero de metacrilato de metila (MMA) foi comprado no laboratório ADRIA Laboratórios, na cidade de Londrina-PR.

4.4 TESTES PRELIMINARES

A presente pesquisa tentou realizar impregnação na madeira *Pinus taeda* utilizando poliuretano à base de mamona, e impregnação com Breu extraído da própria árvore *Pinus*. A Figura 4.11 a seguir apresenta a impregnação da madeira *Pinus* com poliuretano a base de mamona e Breu.

Para a realização do processo de impregnação adotou-se o mesmo processo apresentado no item 4.5.

Figura 4.11 - Testes preliminares: (a) Impregnação com poliuretano à base de mamona; (b) Impregnação com Breu.



(a)

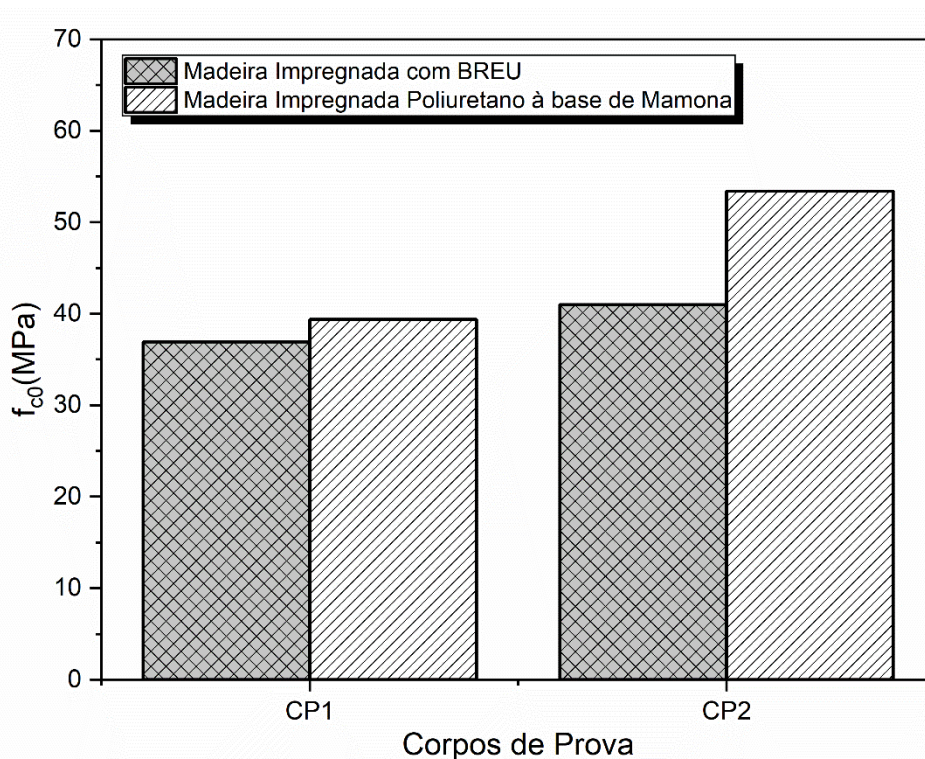


(b)

Fonte: o Autor (2023)

A Figura 4.12 apresenta o gráfico com os resultados característicos da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) para os testes com resinas naturais.

Figura 4.12 - Resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: o Autor (2023)

Como é possível observar nenhum CP conseguiu atingir a resistência mínima imposta no valor de 60 MPa. No entanto o CP2 impregnado com resina de poliuretano a base de mamona, apresentou uma resistência de 53,4 MPa, mas, ao ser avaliado internamente o mesmo não apresentou penetração da resina internamente à madeira, sendo a concentração de resina localizada nas paredes do corpo-de-prova. A Figura 4.13 a seguir apresenta a análise realizada.

Figura 4.13 - Análise visual de impregnação da madeira



Fonte: o Autor (2023)

4.5 IMPREGNAÇÃO COM METACRILATO DE METILA

Para a realização da impregnação na madeira *Pinus taeda*, utilizando monômero de metacrilato de metila, foram seguidas as seguintes etapas, listadas a seguir, de acordo com as pesquisas de (GOMES, 1997), (STOLF, 2005).

Antes do processo de impregnação com metacrilato de metila, foi realizada a secagem dos corpos-de-prova, em função do teor de umidade presente na madeira. Os corpos-de-prova foram posicionados em estufa em uma temperatura de 50 °C, até a umidade de 12%.

Para o processo de dosagem foi utilizado o monômero de metacrilato de metila na forma líquida e peróxido de benzoíla na forma de pó.

A dosagem utilizou-se da proporção no preparo das resinas, de acordo com a pesquisa de Stolf (2005), sendo o volume do monômero igual à soma dos volumes aparentes de todos os CPs e 1,24% deste volume de peróxido de benzoíla.

O método utilizado para impregnação da solução monômero-iniciador foi por meio de vácuo-pressão, em um sistema de câmara com pressão. Os corpos-de-prova foram posicionados internamente, onde, após o fechamento da mesma, aplicou-se vácuo de 30 minutos. Após este período, foi injetada a solução monômero-iniciador, onde, em seguida aplicou-se uma pressão de 0,8 MPa,

durante 30 minutos. A Figura 4.14 apresenta o equipamento de pressão utilizado para o processo de impregnação.

Figura 4.14 - Equipamento de pressão para realização da impregnação: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal



Fonte: o Autor (2023)

Após impregnados, os corpos de prova foram retirados do equipamento de pressão, retirando o excesso da resina de impregnação, utilizando papel toalha.

Os CPs foram pesados e embrulhados em papel alumínio, e levados à estufa por um período de 48 horas a uma temperatura de 60°C. Após este período os CPs, foram desembulhados, pesados e colocados em estufa por 72 horas a temperatura de 50°C, para conclusão do processo de polimerização. Após este período os CPs foram submetidos a ensaios mecânicos. A Tabela 4.2 apresenta o resumo do processo de impregnação realizado.

Tabela 4.2 - Processo de impregnação da madeira

Corpo de prova	Tempo (min)	Pressão (MPa)	Temperatura	
			48h (°C)	72h (°C)
CP1	30	0,8	60	50
CP2	30	0,8	60	50
CP3	30	0,8	60	50
CP4	30	0,8	60	50
CP5	30	0,8	60	50
CP6	30	0,8	60	50
CP7	30	0,8	60	50
CP8	30	0,8	60	50
CP9	30	0,8	60	50
CP10	30	0,8	60	50
CP11	30	0,8	60	50
CP12	30	0,8	60	50

Fonte: o Autor (2023)

Figura 4.15 - Processo de polimerização: (a) Corpos de prova envoltos por papel alumínio; (b) Estufa para processo de polimerização.



(a)



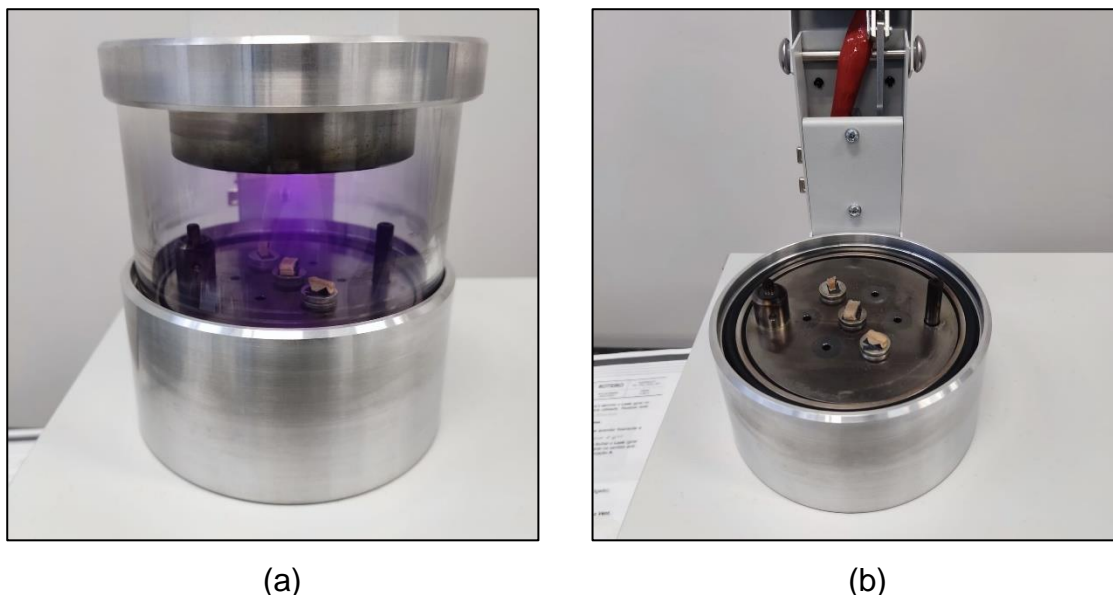
(b)

Fonte: o Autor (2023)

4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para aferir o método de impregnação foi realizado uma análise por meio de análise microscópica do *Pinus taeda*. Para realização do ensaio utilizou-se do laboratório de estruturas do Instituto Senai de Inovação em Engenharia de estruturas. As Figuras 4.16 (a) e 4.16 (b) apresentam o corpo de prova utilizado para a realização das imagens. Denotando imagens nas direções longitudinais, transversais e radiais. Para a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) fez-se uso do equipamento vega tescan 3 sendo aplicada uma camada de 10 nm de Au-Pd.

Figura 4.16 - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura: (a) realização do ensaio; (b) posicionamento das amostras.



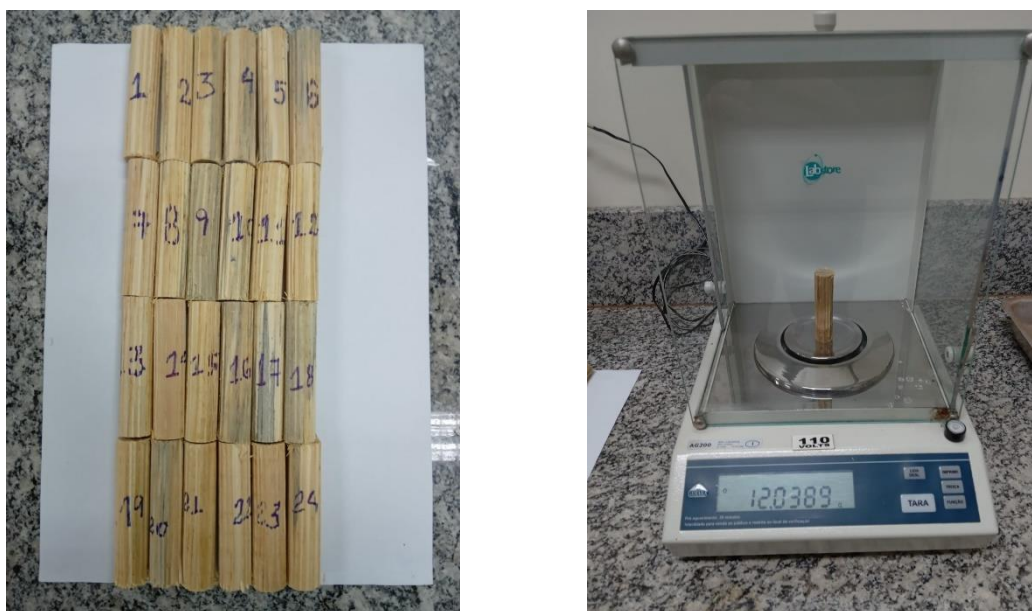
Fonte: o Autor (2023)

4.7 FABRICAÇÃO DAS CAVILHAS DE MADEIRA *PINUS TAEDA*

A determinação das dimensões das cavilhas foi realizada de acordo com as premissas da ABNT NBR 7190 (1997). Onde a referida norma apresenta os diâmetros de 16, 18 e 20 mm para cavilhas de madeira. Neste contexto adotou-se o diâmetro mínimo de 16 mm.

Para realização da impregnação nas cavilhas de madeira *Pinus taeda* foram elaborados 24 corpos de prova, com diâmetros de 16 mm e comprimento de 7 cm, conforme Figura 4.17 (a). As cavilhas foram fabricadas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina. Em seguida as cavilhas foram submetidas a leituras de massa, conforme Figura 4.17 (b), para realização do processo de caracterização, bem como análise da efetividade do processo de impregnação.

Figura 4.17 - Cavilhas de madeira *Pinus taeda*: (a) Amostras impregnadas; (b) Cavilhas posicionadas em balança de precisão.

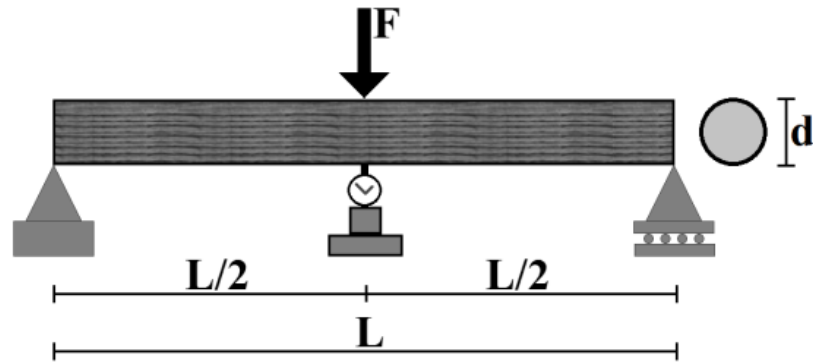


Fonte: o Autor (2023)

4.8 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS

A caracterização das cavilhas foi realizada de acordo com o proposto por (CHRISTOFORO *et al.*, 2013). A metodologia experimental consiste em determinar os módulos de elasticidade E e G de peças circulares de madeira. O módulo de elasticidade é obtido admitindo uma condição de linearidade geométrica e os deslocamentos experimentais, sendo limitado a uma relação $L/200$. A Figura 4.18 apresenta o ensaio experimental de 3 pontos para a determinação dos módulos de elasticidade E e G .

Figura 4.18 - Ensaio de flexão



Fonte: Christoforo et al. (2013)

Para se determinar o comprimento da cavilha para a realização do ensaio será adotada uma relação para o vão de $18xd$, onde d equivale ao diâmetro da cavilha.

O ensaio experimental para se determinar os módulos de elasticidade E e G , consiste em dois ensaios sucessivos com a mesma peça, considerando o comprimento L_1 com a relação $L_1/d \geq 18$, determinando o valor da força F_1 para um deslocamento $\delta_1 = L_1/200$. Em um segundo ensaio os apoios são aproximados com um novo comprimento L_2 sendo respeitada a relação $L_2/d \geq 5/4$, determinando uma força F_2 para um deslocamento $\delta_2 = L_2/200$.

A partir das forças e vãos considerados nos ensaios obtêm-se um sistema com duas equações e duas variáveis cuja solução fornece os módulos de elasticidade longitudinal e transversal.

$$E = \frac{4 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (L_1^2 - L_2^2)}{3 \cdot \pi \cdot d^4 \cdot (F_2 \cdot L_2 \cdot \delta_1 - F_1 \cdot L_1 \cdot \delta_2)} \quad (4.4)$$

$$G = \frac{f_s \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (L_1^2 - L_2^2)}{\pi \cdot d^2 \cdot (F_1 \cdot L_1^3 \cdot \delta_2 - F_2 \cdot L_2^3 \cdot \delta_1)} \quad (4.5)$$

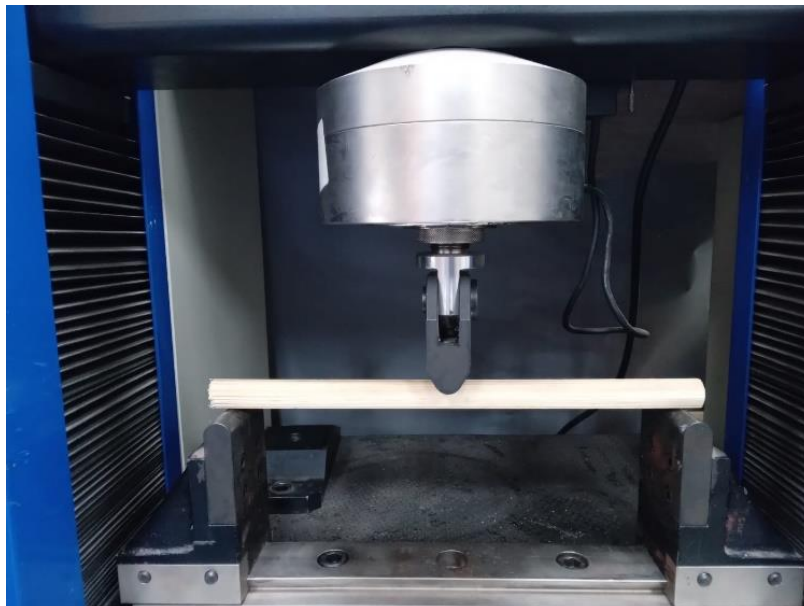
Sendo:

f_s É o fator de forma em função da geometria da seção transversal;

Para a realização dos ensaios de flexão nas cavilhas impregnadas foram elaboradas 2 cavilhas com diâmetro de 16 mm com comprimento de 28 cm, para

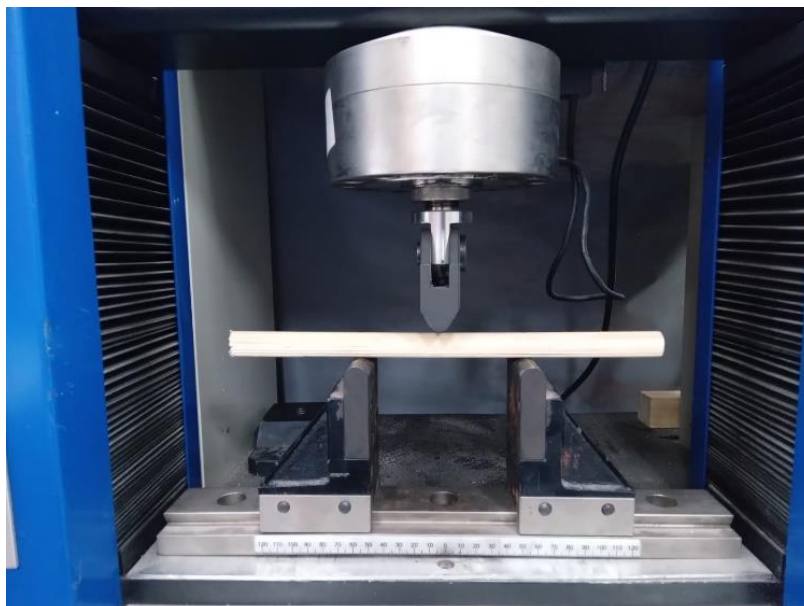
estabelecer uma relação de $18 \times d$, onde d para sua caracterização dos parâmetros E e G, conforme as Figuras 4.19 e 4.20.

Figura 4.19 - Cavilhas de madeira *Pinus taeda* para ensaio de flexão vinculação inicial



Fonte: o Autor (2023)

Figura 4.20 - Cavilhas de madeira *Pinus taeda* para ensaio de flexão vinculação secundária



Fonte: o Autor (2023)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do programa experimental que foi desenvolvido.

5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MADEIRAS

5.2.1 ENSAIO DE UMIDADE

Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores de umidade das madeiras após a realização do ensaio.

Tabela 5.1 - Ensaio de determinação do teor de Umidade

Ensaio de Caracterização					
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Umidade - U (%)			Massa Seca (g)
		m1/m2	m2/m3	m3/m4	
<i>Pinus taeda</i>	CP1	-10,89	-1,07	0,07	14,83
<i>Pinus taeda</i>	CP2	-11,46	-1,19	0,00	14,97
<i>Pinus taeda</i>	CP3	-11,08	-1,16	-0,22	13,61
<i>Pinus taeda</i>	CP4	-11,54	-1,14	0,14	14,80
<i>Pinus taeda</i>	CP5	-12,73	-1,33	0,06	15,63
<i>Pinus taeda</i>	CP6	-11,99	-1,10	0,00	13,43
<i>Pinus taeda</i>	CP7	-11,53	-1,21	0,00	15,46
<i>Pinus taeda</i>	CP8	-11,37	5,56	-6,49	14,55
<i>Pinus taeda</i>	CP9	-10,62	-1,13	-0,07	13,97
<i>Pinus taeda</i>	CP10	-10,48	-1,15	0,07	13,78
<i>Pinus taeda</i>	CP11	-10,90	-1,35	0,00	15,40
<i>Pinus taeda</i>	CP12	-10,53	-1,28	-0,07	14,67
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP1	-16,68	-2,24	0,00	12,21
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP2	-12,30	-1,72	-0,08	12,53
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP3	-13,35	-1,89	-0,08	12,98
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP4	-12,69	-1,85	-0,08	12,75
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP5	-19,73	-2,87	-0,08	12,16
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP6	-13,75	-1,86	0,00	12,68
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP7	-16,29	-1,97	0,03	11,94
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP8	-12,58	-2,01	0,00	12,67
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP9	-19,94	-2,52	0,00	12,37
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP10	-13,68	-6,43	0,00	12,22
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP11	-19,44	-2,77	0,00	12,29
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP12	-17,73	-5,50	-0,08	12,53

Fonte: o Autor (2023)

A madeira da espécie *Pinus* apresentou valor de massa seca mínimo de 13,43 g e máximo de 15,63 g. O valor médio referente a massa seca do foi de 14,59 g, com coeficiente de variação de 5,10%, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de massa seca obtidos durante o ensaio da madeira *Pinus taeda*.

Os valores obtidos para a massa seca da madeira *Pinus taeda* foram maiores quando comparados com a madeira *Eucalyptus saligna*, que apresentou resultados mínimo de 11,94 g e máximo de 12,98 g. Já o valor médio para a massa seca foi de 12,44g, com coeficiente de variação de 2,38%, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de massa seca obtidos durante o ensaio da madeira *Eucalyptus saligna*.

5.2.2 ENSAIO DE DENSIDADE APARENTE

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam-se os valores de densidade aparente das madeiras após a realização do ensaio.

Tabela 5.2 - Densidade aparente da madeira da espécie *Pinus taeda*

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Densidade aparente
		kg/m ³
<i>Pinus taeda</i>	CP1	365,05
<i>Pinus taeda</i>	CP2	360,83
<i>Pinus taeda</i>	CP3	432,18
<i>Pinus taeda</i>	CP4	377,25
<i>Pinus taeda</i>	CP5	359,71
<i>Pinus taeda</i>	CP6	447,25
<i>Pinus taeda</i>	CP7	374,50
<i>Pinus taeda</i>	CP8	366,34
<i>Pinus taeda</i>	CP9	391,13
<i>Pinus taeda</i>	CP10	361,72
<i>Pinus taeda</i>	CP11	382,49
<i>Pinus taeda</i>	CP12	391,09

Fonte: o Autor (2023)

Tabela 5.3 - Densidade aparente da madeira da espécie *Eucalyptus saligna*

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Densidade aparente
		kg/m ³
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP1	803,13
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP2	816,28
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP3	858,07
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP4	862,58
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP5	854,04
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP6	818,62
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP7	830,74
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP8	820,86
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP9	814,88
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP10	833,56
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP11	827,42
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP12	851,52

Fonte: o Autor (2023)

Em análise a Tabela 5.2 madeira da espécie *Pinus taeda* apresentou valor de médio referente a densidade aparente de 382,32 kg/m³, com coeficiente de variação de 6,94%, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de densidade aparente obtidos durante o ensaio da madeira da espécie *Pinus taeda*.

Na Tabela 5.3 madeira da espécie *Eucalyptus saligna* apresentou valor de médio referente a densidade aparente de 834,54 kg/m³, com coeficiente de variação de 2,29%, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de densidade aparente obtidos durante o ensaio da madeira da espécie *Eucalyptus saligna*.

5.2.3 ENSAIO DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DA MADEIRA

Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores de estabilidade dimensional das madeiras da espécie *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* após a realização do ensaio.

Tabela 5.4 – Estabilidade dimensional da madeira

<i>Estabilidade dimensional da madeira</i>							
<i>Espécie de madeira</i>	<i>Corpo de Prova</i>	<i>Deformação específica de retração</i>			<i>Deformação específica de inchamento</i>		
		ϵ_r1	ϵ_r2	ϵ_r3	ϵ_i1	ϵ_i2	ϵ_i3
<i>Pinus Taeda</i>	CP1	0,36	8,13	6,98	0,37	8,85	7,50
<i>Pinus Taeda</i>	CP2	0,36	8,29	6,18	0,37	9,04	6,58
<i>Pinus Taeda</i>	CP3	0,04	7,90	4,76	0,04	8,58	4,99
<i>Pinus Taeda</i>	CP4	0,56	8,41	6,48	0,57	9,19	6,93
<i>Pinus Taeda</i>	CP5	0,36	1,03	7,00	0,36	1,04	7,53
<i>Pinus Taeda</i>	CP6	0,04	8,14	4,60	0,04	8,86	4,82
<i>Pinus Taeda</i>	CP7	0,46	7,92	7,18	0,46	8,60	7,74
<i>Pinus Taeda</i>	CP8	0,68	8,70	6,28	0,68	9,52	6,70
<i>Pinus Taeda</i>	CP9	0,04	7,85	4,50	0,04	8,52	4,71
<i>Pinus Taeda</i>	CP10	0,06	7,59	5,17	0,06	8,22	5,45
<i>Pinus Taeda</i>	CP11	0,10	8,00	6,88	0,10	8,70	7,39
<i>Pinus Taeda</i>	CP12	0,68	7,65	6,15	0,69	8,29	6,55
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP1	0,02	3,09	7,87	0,02	3,19	8,54
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP2	0,38	3,35	7,46	0,38	3,46	8,06
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP3	0,28	4,42	6,17	0,28	4,63	6,58
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP4	0,18	5,50	6,79	0,18	5,82	7,29
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP5	1,11	3,01	7,81	1,12	3,10	8,47
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP6	0,84	4,98	5,91	0,84	5,24	6,28
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP7	0,57	3,56	8,54	0,57	3,69	9,34
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP8	0,95	4,92	5,83	0,96	5,17	6,19
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP9	0,04	4,33	6,72	0,04	4,52	7,20
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP10	0,61	5,81	6,45	0,61	6,17	6,89
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP11	0,24	2,82	8,45	0,24	2,90	9,22
<i>Eucalyptus saligna</i>	CP12	0,16	3,62	5,97	0,16	3,76	6,35

Fonte: o Autor (2023)

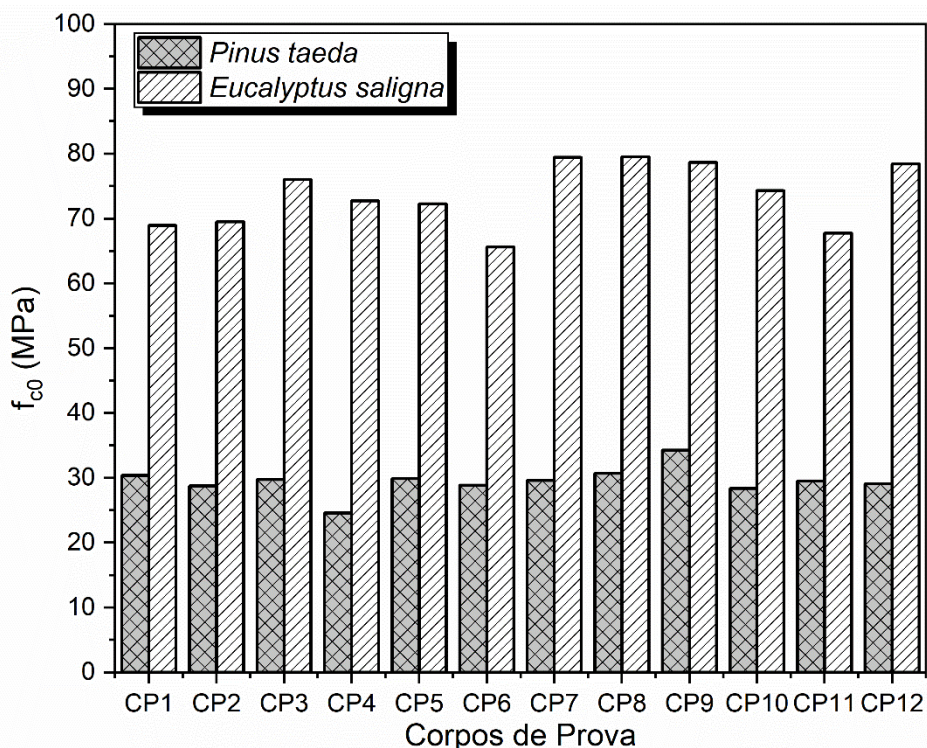
Os valores apresentados na tabela 5.4, denotam os resultados obtidos das madeiras *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, durante a realização do ensaio de estabilidade dimensional, uma vez que estes valores sofrem alterações significativas após a realização de impregnação de resinas, de acordo com resultados encontrados por (SOARES *et al.*, 2018).

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MADEIRAS

5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (f_{c0})

A Figura 5.1 apresenta o gráfico com os resultados característicos da resistência à compressão paralela às fibras de cada espécie de madeira.

Figura 5.1 - Resistência à compressão paralela às fibras da madeira



Fonte: o Autor (2023)

A relação entre as resistências (f_{c0}) das madeiras da espécie *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* foi de aproximadamente 2,5 vezes. Sendo que a madeira *Pinus* apresentou uma resistência à compressão paralela as fibras de aproximadamente 30 MPa enquanto em todos os resultados a espécie *Eucalyptus saligna* ultrapassaram 60 MPa.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os resultados médios, bem como desvio padrão e coeficiente de variação para cada espécie ensaiada.

Tabela 5.5 - Resistência a compressão paralela às fibras da espécie *Pinus taeda*.

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Força de compressão	f_{c0}	Tensão Média	Desvio Padrão	COV
		(N)	(MPa)	(MPa)		
<i>Pinus taeda</i>	CP1	18544,8	30,34			
<i>Pinus taeda</i>	CP2	17591,5	28,73			
<i>Pinus taeda</i>	CP3	18183,6	29,72			
<i>Pinus taeda</i>	CP4	14631,1	24,57			
<i>Pinus taeda</i>	CP5	18053,1	29,88			
<i>Pinus taeda</i>	CP6	16608,0	28,82	29,46	2,08	7,06%
<i>Pinus taeda</i>	CP7	18223,7	29,58			
<i>Pinus taeda</i>	CP8	17982,8	30,70			
<i>Pinus taeda</i>	CP9	20240,7	34,26			
<i>Pinus taeda</i>	CP10	17360,7	28,35			
<i>Pinus taeda</i>	CP11	17551,3	29,50			
<i>Pinus taeda</i>	CP12	16579,9	29,06			

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) da madeira *Pinus taeda* foi de 30,70 MPa e o menor valor foi de 24,57 MPa. O coeficiente de variação foi de 7,06%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo os valores encontrados após a realização do ensaio apresentam boa representatividade quanto a resistência à compressão.

Tabela 5.6 - Resistência a compressão paralela às fibras da espécie *Eucalyptus saligna*.

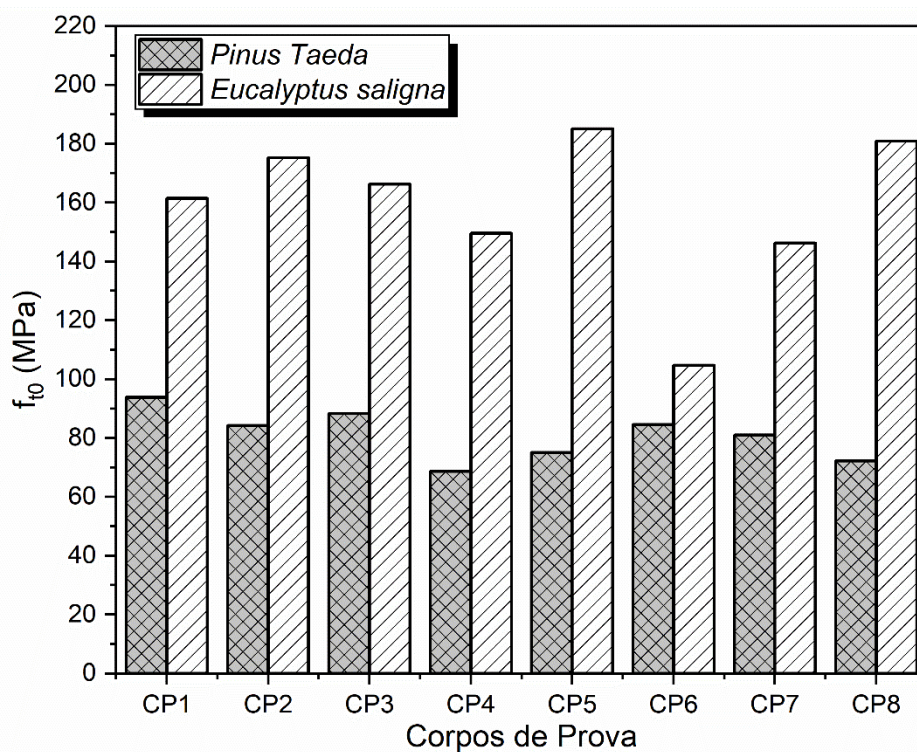
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Força de compressão	f_{c0}	Tensão Média	Desvio Padrão	COV
		(N)	(MPa)	(MPa)		
<i>E. saligna</i>	CP1	35855,3	68,91			
<i>E. saligna</i>	CP2	36417,3	69,52			
<i>E. saligna</i>	CP3	38053,0	76,02			
<i>E. saligna</i>	CP4	36126,3	72,72			
<i>E. saligna</i>	CP5	36266,8	72,23			
<i>E. saligna</i>	CP6	34398,0	65,63			
<i>E. saligna</i>	CP7	39257,2	79,42	73,59	4,68	6,37%
<i>E. saligna</i>	CP8	41485,0	79,50			
<i>E. saligna</i>	CP9	40692,2	78,67			
<i>E. saligna</i>	CP10	39558,3	74,27			
<i>E. saligna</i>	CP11	35554,3	67,73			
<i>E. saligna</i>	CP12	39558,3	78,44			

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) da madeira espécie *Eucalyptus saligna* foi de 79,50 MPa e o menor valor foi de 65,63 MPa. O coeficiente de variação foi de 6,37%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo os valores encontrados após a realização do ensaio apresentam boa representatividade quanto a resistência à compressão.

5.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS (f_{t0})

A Figura 5.2 apresenta o gráfico com os resultados característicos da resistência à compressão paralela às fibras de cada espécie de madeira.

Figura 5.2 - Resistência à tração paralela às fibras das espécies de madeira

Fonte: o Autor (2023)

A relação entre as resistências (f_{t0}) das madeiras da espécie *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* foi de aproximadamente 1,9 vezes. Sendo que a madeira *Pinus* apresentou uma resistência à tração paralela as fibras de aproximadamente 80 MPa enquanto em todos os resultados a espécie *Eucalyptus saligna* ultrapassaram 158 MPa.

As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam os resultados médios, bem como desvio padrão e coeficiente de variação para cada espécie ensaiada.

Tabela 5.7 - Resistência à tração paralela às fibras da madeira *Pinus taeda*

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Força de tração	f_{t0}	Tensão Média	Desvio Padrão	COV
		(N)	(MPa)	(MPa)		
<i>Pinus taeda</i>	CP1	21798	93,87			
<i>Pinus taeda</i>	CP2	18806	84,19			
<i>Pinus taeda</i>	CP3	19859	88,27			
<i>Pinus taeda</i>	CP4	14732	68,63			
<i>Pinus taeda</i>	CP5	16621	74,98	80,96	7,97	9,84%
<i>Pinus taeda</i>	CP6	19160	84,55			
<i>Pinus taeda</i>	CP7	17202	80,94			
<i>Pinus taeda</i>	CP8	15234	72,21			

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) da madeira espécie *Pinus taeda* foi de 93,87 MPa e o menor valor foi de 72,21 MPa. O coeficiente de variação foi de 9,84%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo os valores encontrados após a realização do ensaio apresentam boa representatividade quanto a resistência à tração.

Valor este muito próximo da pesquisa de Moya; Baño (2017) que encontraram uma resistência à tração de 80,12 MPa para espécies de *Pinus taeda* originárias do Uruguai.

Tabela 5.8 - Resistência à tração paralela às fibras da madeira *Eucalyptus saligna*

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Força de tração	f_{t0}	Tensão Média	Desvio Padrão	COV
		(N)	(MPa)	(MPa)		
<i>E. saligna</i>	CP1	36028	161,45			
<i>E. saligna</i>	CP2	36146	175,21			
<i>E. saligna</i>	CP3	35811	166,28			
<i>E. saligna</i>	CP4	33164	149,52	158,97	24,21	15,26%
<i>E. saligna</i>	CP5	41313	185,08			
<i>E. saligna</i>	CP6	23914	104,63			
<i>E. saligna</i>	CP7	32623	146,26			
<i>E. saligna</i>	CP8	40033	180,93			

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) da madeira espécie *Eucalyptus saligna* foi de 185,08 MPa e o menor valor foi de 104,63 MPa. O coeficiente de variação foi de 15,26%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão ultrapassou 10%.

5.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS (E_{t0})

As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados médios, bem como desvio padrão e coeficiente de variação para a rigidez da madeira na direção paralela às fibras (E_{t0}) de cada espécie cada espécie ensaiada.

Tabela 5.9 – Módulo de elasticidade da madeira *Pinus taeda*

Módulo de Elasticidade						
<i>Espécie de madeira</i>	<i>Corpo de Prova</i>	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\epsilon_{50\%}$	$\epsilon_{10\%}$	(E_{t0}) (MPa)
<i>Pinus taeda</i>	CP1	48,40	10,34	0,0077	0,00248	7249,85
<i>Pinus taeda</i>	CP2	53,27	10,71	0,0049	0,00090	10633,61
<i>Pinus taeda</i>	CP3	41,73	8,71	0,0053	0,00119	7985,00
<i>Pinus taeda</i>	CP4	42,78	9,12	0,0033	0,00070	12762,26
<i>Pinus taeda</i>	CP5	43,20	9,06	0,0174	0,00651	3138,02
<i>Pinus taeda</i>	CP6	42,51	8,73	0,0095	0,00155	4243,83
<i>Pinus taeda</i>	CP7	45,24	9,31	0,0122	0,00383	4271,87
<i>Pinus taeda</i>	CP8	45,20	9,52	0,0181	0,00691	3202,06
Média						6685,81
Desvio Padrão						3373,20
Coef. de Variação						50,45%

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado para o módulo de elasticidade (E_{t0}) da madeira espécie *Pinus taeda* foi de 12762,26 MPa e o menor valor foi de 3138,02 MPa. O coeficiente de variação foi de 50,45%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão ultrapassou 10%. Durante a realização do ensaio verificou-se uma elevada variabilidade nos resultados obtidos.

Tabela 5.10 - Módulo de elasticidade da madeira *Eucalyptus saligna*

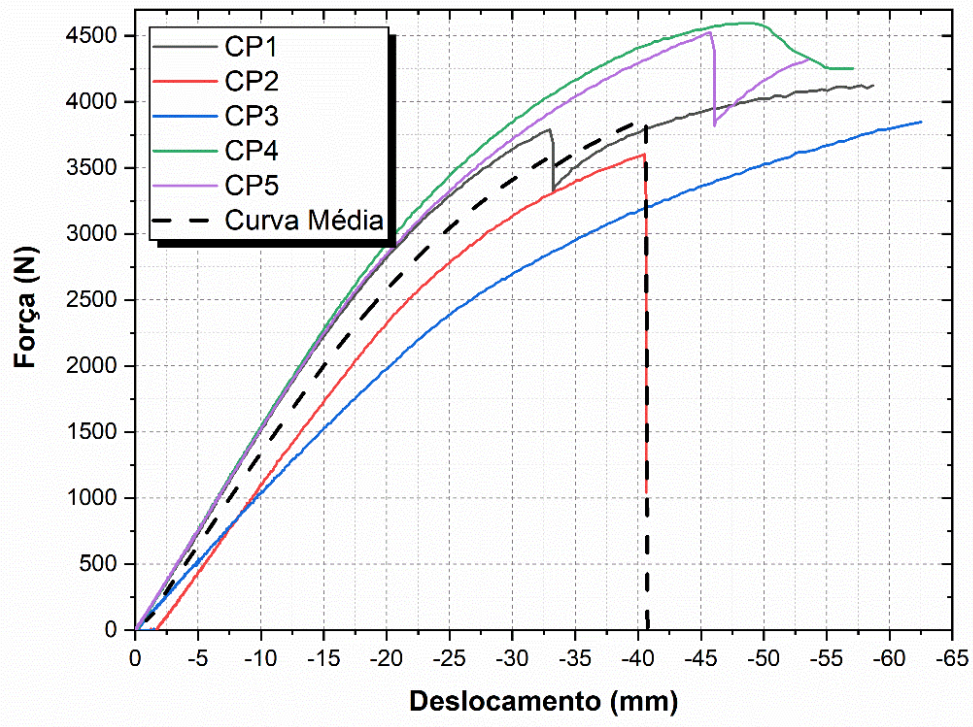
Módulo de Elasticidade Madeira <i>E. saligna</i>						
Espécie de madeira	Corpo de Prova	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\epsilon_{50\%}$	$\epsilon_{10\%}$	(E_{t0}) (MPa)
<i>E. saligna</i>	CP1	8,73	1,76	0,0004	0,00009	24607,78
<i>E. saligna</i>	CP2	73,75	14,79	0,0031	0,00084	25968,34
<i>E. saligna</i>	CP3	70,41	14,16	0,0026	0,00056	27188,82
<i>E. saligna</i>	CP4	68,42	13,75	0,0029	0,00057	23035,18
<i>E. saligna</i>	CP5	68,03	13,67	0,0029	0,00057	22892,78
<i>E. saligna</i>	CP6	66,22	13,35	0,0030	0,00069	22730,00
<i>E. saligna</i>	CP7	67,06	13,72	0,0029	0,00062	22964,42
<i>E. saligna</i>	CP8	68,63	13,79	0,0026	0,00056	27302,89
Média						24586,28
Desvio						
Padrão						1851,14
Coef. de Variação						7,53%

O maior valor encontrado para o módulo de elasticidade (E_{t0}) da madeira espécie *Eucalyptus saligna* foi de 27302,89 MPa e o menor valor foi de 22730,00 MPa. O coeficiente de variação foi de 7,53%, o que denota que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%. Logo os valores encontrados após a realização do ensaio apresentam boa representatividade quanto ao módulo de elasticidade da madeira *Eucalyptus saligna*.

5.3.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO (f_M) E MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{M0})

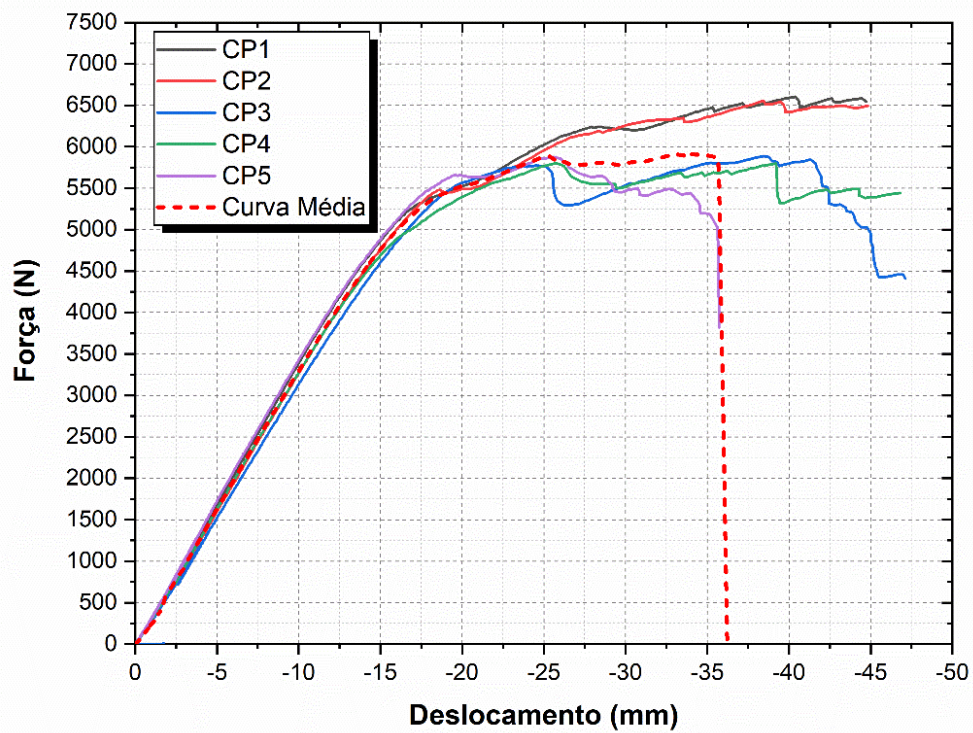
Nas Figuras 5.3 e 5.4 são apresentadas as curvas força versus deslocamento dos CPs de cada espécie de madeira. Verifica-se para as duas espécies aqui estudadas um comportamento semelhante para os cinco corpos de prova ensaiados para cada espécie.

Figura 5.3 – Curva força versus deslocamento da espécie *Pinus taeda*



Fonte: o Autor (2023)

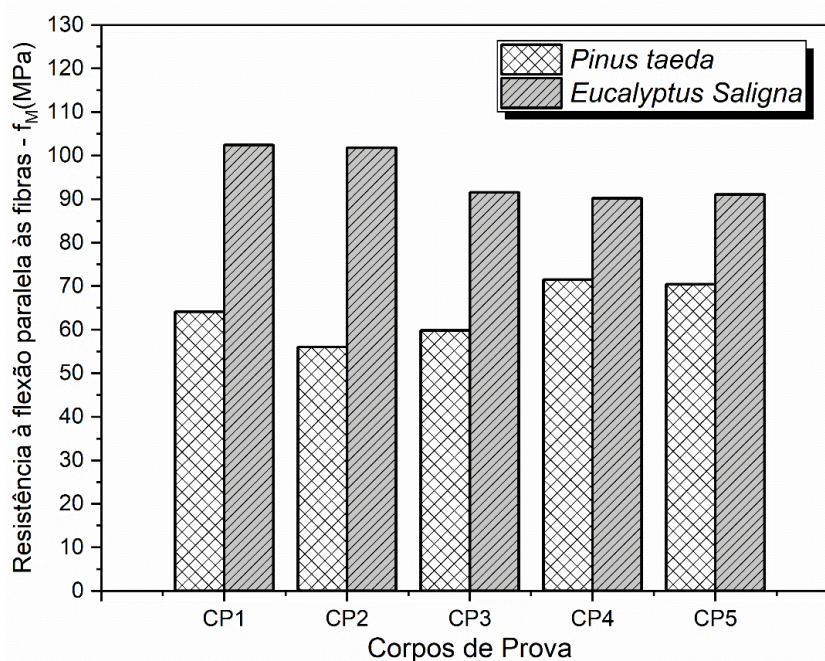
Figura 5.4 - Curva força versus deslocamento da espécie *Eucalyptus saligna*



Fonte: o Autor (2023)

A Figura 5.5 apresenta o gráfico com os resultados característicos da resistência à flexão de cada espécie de madeira.

Figura 5.5 - Resistência à flexão



Fonte: o Autor (2023)

As Tabelas 5.11 e 5.12 apresentam os resultados médios da resistência à flexão, bem como desvio padrão e coeficiente de variação para cada espécie ensaiada.

Tabela 5.11 - Valores máximo de tensão de flexão *Pinus taeda*

Espécie	Corpo de prova	Flexão estática	
		f_M (MPa)	E_{M0} (MPa)
<i>Pinus taeda</i>	CP1	64,14	8142,13
<i>Pinus taeda</i>	CP2	56,02	7073,85
<i>Pinus taeda</i>	CP3	59,85	5363,76
<i>Pinus taeda</i>	CP4	71,49	8308,22
<i>Pinus taeda</i>	CP5	70,42	8111,78
	Média	64,38	7399,95
	Desvio Padrão	5,96	1107,69
	Coef. Variação (%)	9,25	14,97

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado f_M durante o ensaio de flexão da madeira espécie *Pinus taeda* foi 71,49 MPa e o menor valor foi de 56,02 MPa. Já o máximo valor de módulo de elasticidade E_{M0} foi de 8308,22 MPa e o menor valor foi de 5363, 76 MPa influenciando de maneira significativa no desvio padrão.

Tabela 5.12 - Valores máximo de tensão de flexão *Eucalyptus saligna*

Espécie	Corpo de prova	Flexão estática	
		f_M (MPa)	E_{M0} (MPa)
<i>E. saligna</i>	CP1	102,41	18280,53
<i>E. saligna</i>	CP2	101,80	18335,46
<i>E. saligna</i>	CP3	91,54	16526,83
<i>E. saligna</i>	CP4	90,17	17051,73
<i>E. saligna</i>	CP5	91,08	18656,70
	Média	95,40	17770,25
	Desvio Padrão	5,50	828,01
	Coef. Variação (%)	5,76	4,66

Fonte: o Autor (2023)

O maior valor encontrado f_M durante o ensaio de flexão da madeira espécie *Eucalyptus saligna* foi 102,41 MPa e o menor valor foi de 90,17 MPa. Já o máximo valor de módulo de elasticidade E_{M0} foi de 18656,70 MPa e o menor valor foi de 16526,83 MPa apresentando um valor de coeficiente de variação menor que 10%, denotando boa representação dos ensaios.

5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MADEIRAS IMPREGNADAS

Conforme pesquisa desenvolvida por Stolf (2005) o processo de impregnação se mostra mais eficaz em madeiras coníferas, devido à baixa densidade, e apresentarem maior quantidade de poros e suficiente permeabilidade.

Neste contexto para o processo de impregnação optou-se pela utilização da madeira da espécie *Pinus taeda*, visto a comparação entre os resultados de

resistência à compressão paralela às fibras (f_{co}) das espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*.

As Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam o gráfico com os resultados da madeira impregnada após a realização da leitura dos valores de massa e densidade da madeira *Pinus taeda* submetida ao processo de impregnação com o monômero de metacrilato de metila. É possível observar que houve ganho de massa e densidade em todos os corpos de prova submetidos ao processo de impregnação.

Tabela 5.13 - Massa da madeira sem impregnação

Espécie de madeira	Corpo de Prova	Dimensão (mm)			Massa (g)
		a	b	c	
<i>Pinus taeda</i>	CP1	24,84	24,99	78,57	29,2160
<i>Pinus taeda</i>	CP2	24,41	24,34	78,51	30,3934
<i>Pinus taeda</i>	CP3	24,33	24,87	77,81	32,4978
<i>Pinus taeda</i>	CP4	24,07	23,97	78,49	28,3454
<i>Pinus taeda</i>	CP5	25,09	24,42	77,66	27,9675
<i>Pinus taeda</i>	CP6	24,19	24,03	77,95	26,8082
<i>Pinus taeda</i>	CP7	24,97	25,49	78,29	29,8430
<i>Pinus taeda</i>	CP8	24,42	24,64	78,06	28,6871
<i>Pinus taeda</i>	CP9	24,42	24,76	77,18	27,2277
<i>Pinus taeda</i>	CP10	26,03	24,99	78,06	30,7073
<i>Pinus taeda</i>	CP11	24,76	24,33	77,62	26,1766
<i>Pinus taeda</i>	CP12	25,52	24,28	78,58	26,2601
<i>Pinus taeda</i>	CP13	24,64	24,19	77,86	25,3225

Fonte: o Autor (2023)

Tabela 5.14 - Massa da madeira impregnada

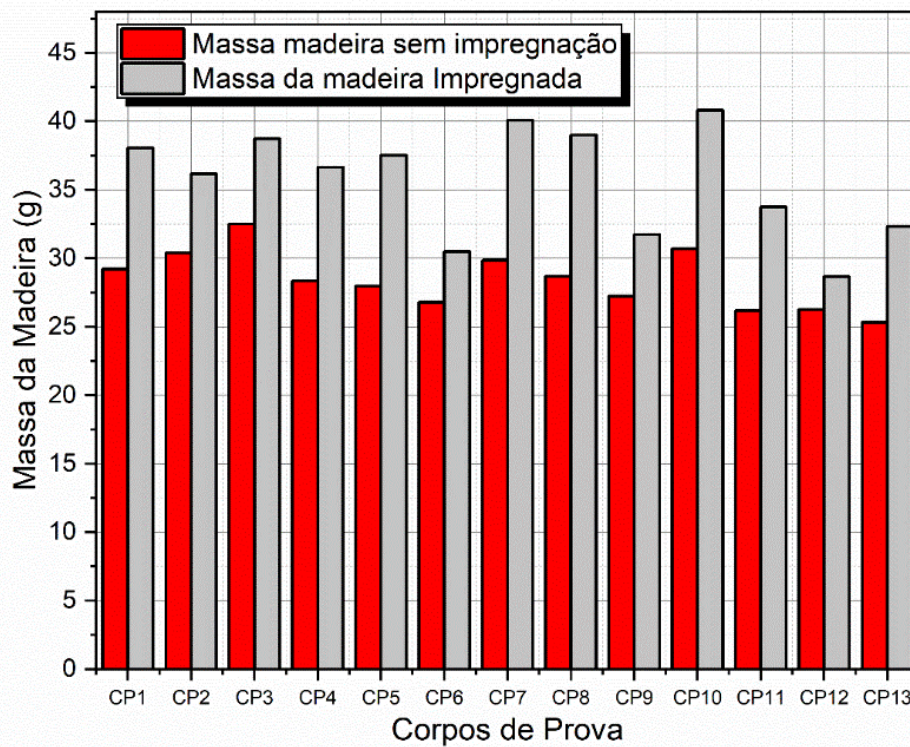
<i>Espécie de madeira</i>	<i>Corpo de Prova</i>	<i>Dimensão (mm)</i>			<i>Massa (g)</i>	<i>Dif. (%)</i>
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
<i>Pinus taeda</i>	CP1	24,16	23,92	78,54	38,06	30,27
<i>Pinus taeda</i>	CP2	25,62	24,37	79,20	36,18	19,04
<i>Pinus taeda</i>	CP3	24,86	24,33	78,35	38,72	19,15
<i>Pinus taeda</i>	CP4	24,14	23,87	79,34	36,65	29,30
<i>Pinus taeda</i>	CP5	24,99	24,41	77,79	37,52	34,16
<i>Pinus taeda</i>	CP6	24,39	24,22	77,88	30,51	13,81
<i>Pinus taeda</i>	CP7	25,14	24,54	78,42	40,07	34,27
<i>Pinus taeda</i>	CP8	24,50	24,51	79,28	39,01	35,98
<i>Pinus taeda</i>	CP9	24,14	24,62	77,67	31,74	16,57
<i>Pinus taeda</i>	CP10	24,55	26,02	78,74	40,82	32,93
<i>Pinus taeda</i>	CP11	24,30	24,41	77,92	33,76	28,97
<i>Pinus taeda</i>	CP12	24,99	24,20	78,43	28,66	9,14
<i>Pinus taeda</i>	CP13	24,08	24,25	78,09	32,31	27,59

Fonte: o Autor (2023)

Observa-se um aumento na massa dos corpos de prova impregnados com valor médio de 25,48%. Já a densidade dos corpos de prova aumentou em média 24,95%, valores estes significativos aos valores iniciais.

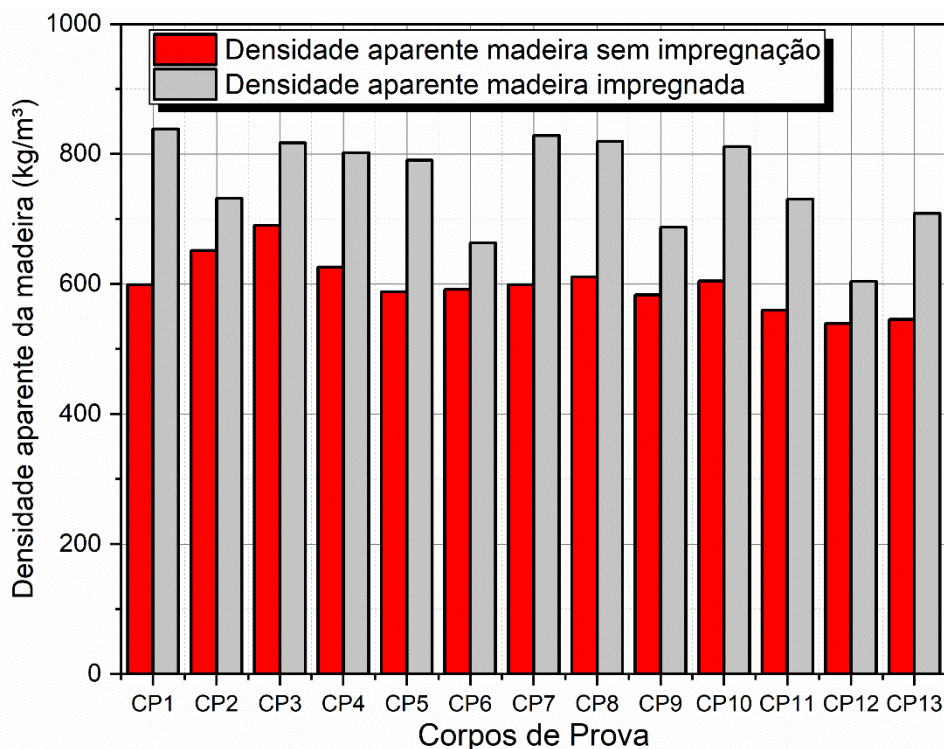
A Figura 5.6 apresenta o gráfico com os resultados da madeira impregnada após a realização da leitura dos valores de massa, densidade e resistência à compressão paralela às fibras (f_{co}).

Figura 5.6 - Massa da madeira após o processo de impregnação



Fonte: o Autor (2023)

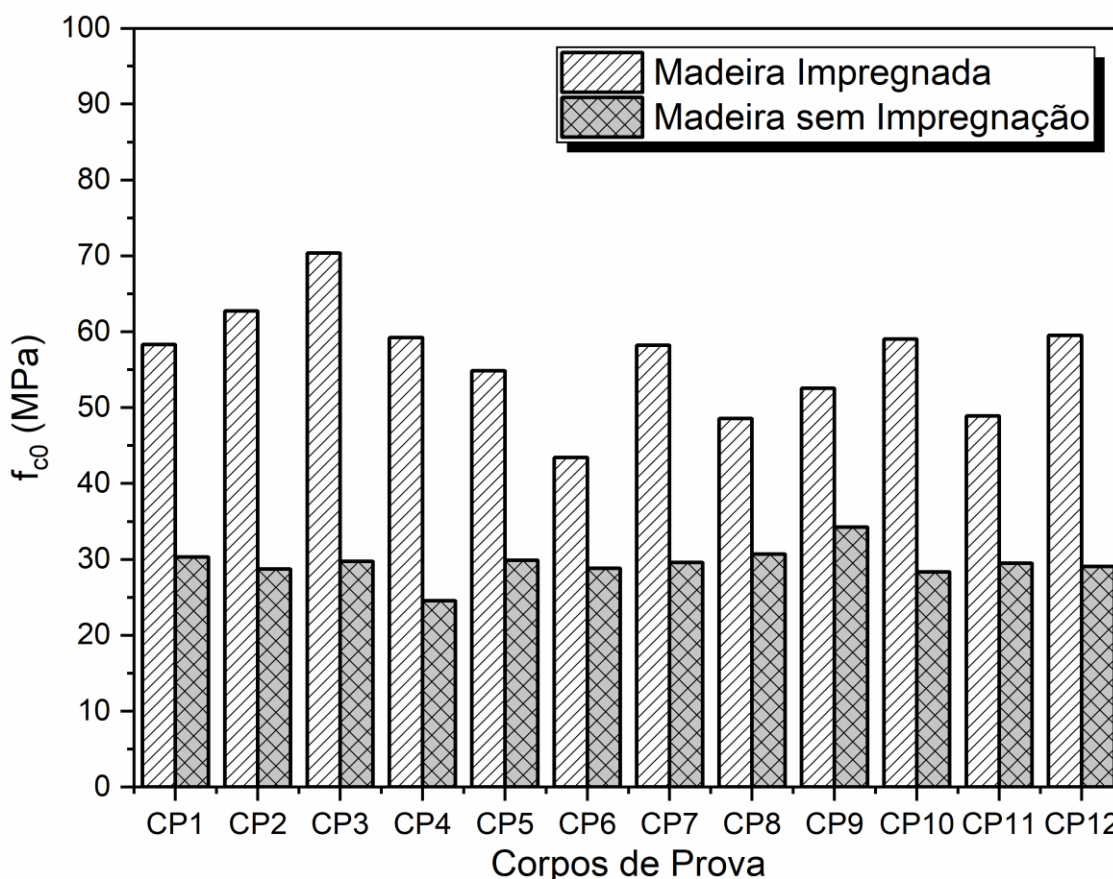
Figura 5.7 - Densidade aparente da madeira



Fonte: o Autor (2023)

A Figura 5.8 apresenta o gráfico com os resultados característicos da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) da madeira *Pinus taeda* impregnada.

Figura 5.8 - Resistência à compressão da madeira impregnada



Fonte: o Autor (2023)

Em análise dos resultados verifica-se um aumento na resistência de aproximadamente 92%, quando comparado com a madeira sem impregnação.

A Tabela 5.15 apresenta os resultados médios da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) da madeira impregnada, bem como desvio padrão e coeficiente de variação para cada espécie ensaiada.

Tabela 5.15 - Resistência à compressão paralela às fibras da madeira impregnada

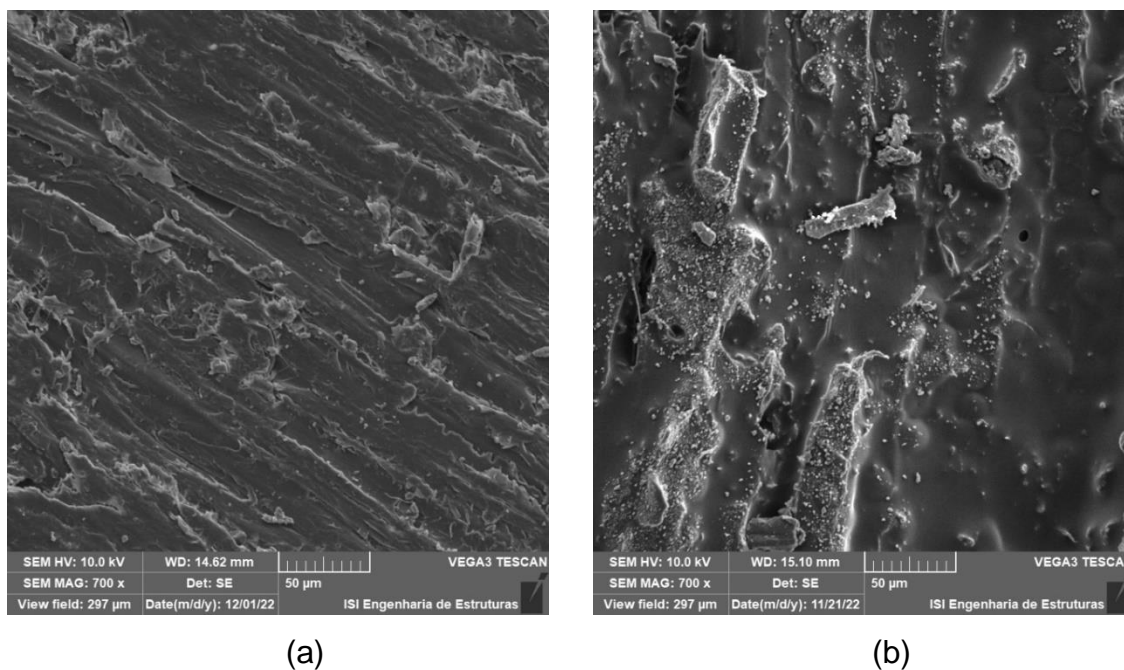
Resistência à compressão paralela às fibras da madeira impregnada			
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Força	Tensão máxima
		(N)	f_{co} (MPa)
<i>Pinus taeda</i>	CP1	33697,8	58,31
<i>Pinus taeda</i>	CP2	39187,0	62,76
<i>Pinus taeda</i>	CP3	42578,8	70,40
<i>Pinus taeda</i>	CP4	34139,3	59,25
<i>Pinus taeda</i>	CP5	33456,9	54,85
<i>Pinus taeda</i>	CP6	25669,7	43,45
<i>Pinus taeda</i>	CP7	35915,5	58,22
<i>Pinus taeda</i>	CP8	29151,9	48,55
<i>Pinus taeda</i>	CP9	31229,1	52,55
<i>Pinus taeda</i>	CP10	37711,8	59,04
<i>Pinus taeda</i>	CP11	29011,4	48,91
<i>Pinus taeda</i>	CP12	36000,0	59,53
<i>Pinus taeda</i>	CP13	26101,2	43,16
		Média (MPa)	56,32
		Desvio Padrão (MPa)	6,90
		Coef. Var.	12,2%

Fonte: o Autor (2023)

A Tabela 5.15 apresenta o ganho de resistência da madeira engenheirada. Onde os resultados podem ser relacionados ao ganho de massa da madeira com resistência e rigidez da madeira. Comprovando assim a efetividade da impregnação

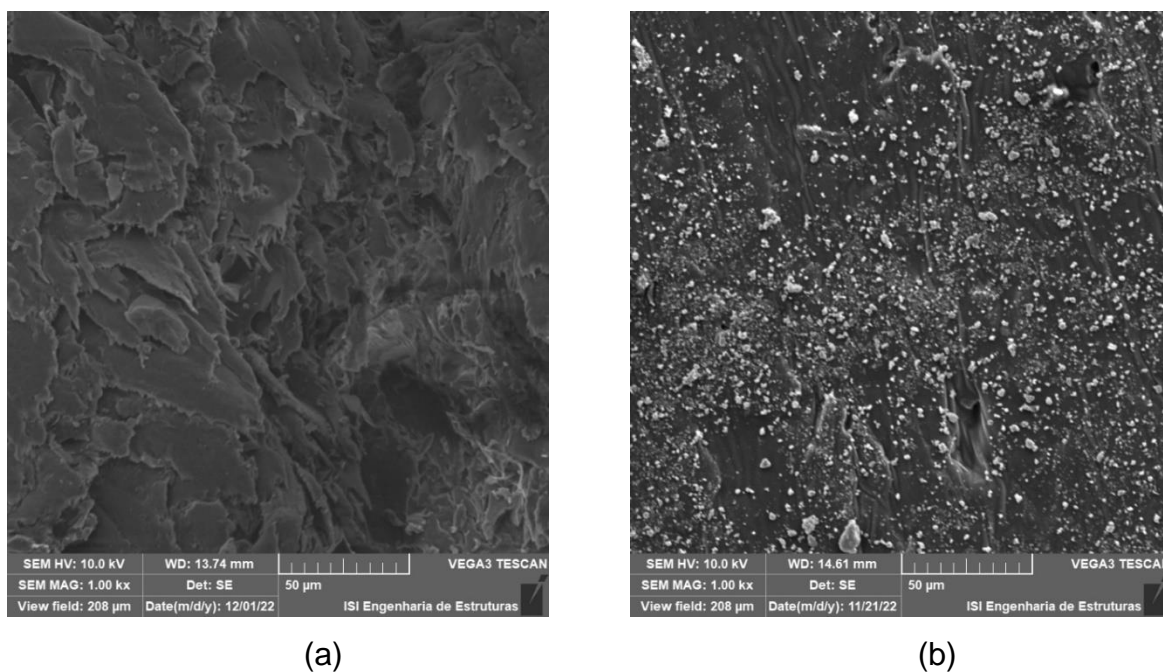
Por meio de análise microscópica do *Pinus taeda*, apresentadas nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, mostra-se que ocorreu a impregnação do monômero e posterior polimerização no interior na madeira. Isso ocorre devido a estrutura porosa e permeável do *Pinus taeda*, permitindo assim a impregnação e retenção do metacrilato de metila (MMA).

Figura 5.9 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.



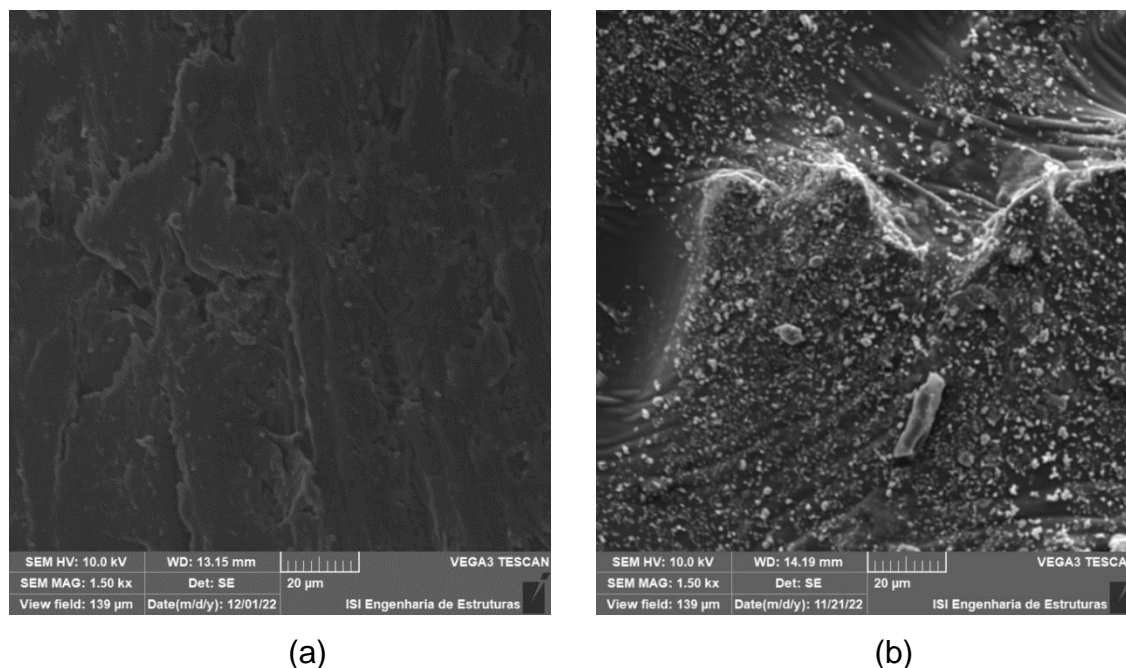
Fonte: o Autor (2023)

Figura 5.10 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.



Fonte: o Autor (2023)

Figura 5.11 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial: (a) Madeira sem impregnação; (b) Madeira impregnada.



Fonte: o Autor (2023)

5.5 CAVILHAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA

As Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os resultados das cavilhas de madeira impregnada após a realização da leitura dos valores de massa e densidade aparente. É possível observar que houve ganho de massa e densidade em todos os corpos de prova submetidos ao processo de impregnação utilizando o monômero de metacrilato de metila. As cavilhas foram elaboradas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina, foram confeccionadas 24 cavilhas com dimensões apresentadas na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Massa e densidade das cavilhas sem impregnação

Madeira sem impregnação					
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Dimensão (mm)		Massa (g)	Densidade aparente
		Diâmetro	Comprimento		kg/m³
<i>Pinus Taeda</i>	CP1	16,00	72,00	8,18	564,78

Madeira sem impregnação					
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Dimensão (mm)		Massa (g)	Densidade aparente
		Diâmetro	Comprimento		kg/m³
<i>Pinus taeda</i>	CP2	16,00	71,00	9,63	674,73
<i>Pinus taeda</i>	CP3	17,00	72,00	8,68	531,13
<i>Pinus taeda</i>	CP4	17,00	72,00	7,01	428,82
<i>Pinus taeda</i>	CP5	17,00	72,00	7,86	480,71
<i>Pinus taeda</i>	CP6	17,00	72,00	9,86	603,58
<i>Pinus taeda</i>	CP7	17,00	72,00	8,32	509,10
<i>Pinus taeda</i>	CP8	16,00	72,00	8,59	593,52
<i>Pinus taeda</i>	CP9	17,00	72,00	9,56	584,98
<i>Pinus taeda</i>	CP10	17,00	72,00	9,82	601,13
<i>Pinus taeda</i>	CP11	17,00	72,00	9,85	602,60
<i>Pinus taeda</i>	CP12	17,00	72,00	9,69	592,81
<i>Pinus taeda</i>	CP13	17,00	72,00	8,20	501,76
<i>Pinus taeda</i>	CP14	17,00	72,00	8,30	508,12
<i>Pinus taeda</i>	CP15	17,00	72,00	9,68	592,32
<i>Pinus taeda</i>	CP16	17,00	72,00	9,19	562,46
<i>Pinus taeda</i>	CP17	17,00	72,00	7,20	440,57
<i>Pinus taeda</i>	CP18	17,00	72,00	9,64	589,87
<i>Pinus taeda</i>	CP19	17,00	72,00	8,90	544,83
<i>Pinus taeda</i>	CP20	17,00	72,00	7,67	469,45
<i>Pinus taeda</i>	CP21	17,00	72,00	9,06	554,63
<i>Pinus taeda</i>	CP22	17,00	72,00	8,02	490,99
<i>Pinus taeda</i>	CP23	17,00	72,00	9,98	610,43
<i>Pinus taeda</i>	CP24	17,00	72,00	8,57	524,28

Fonte: o Autor (2023)

Tabela 5.17 - Massa e densidade das cavilhas impregnadas

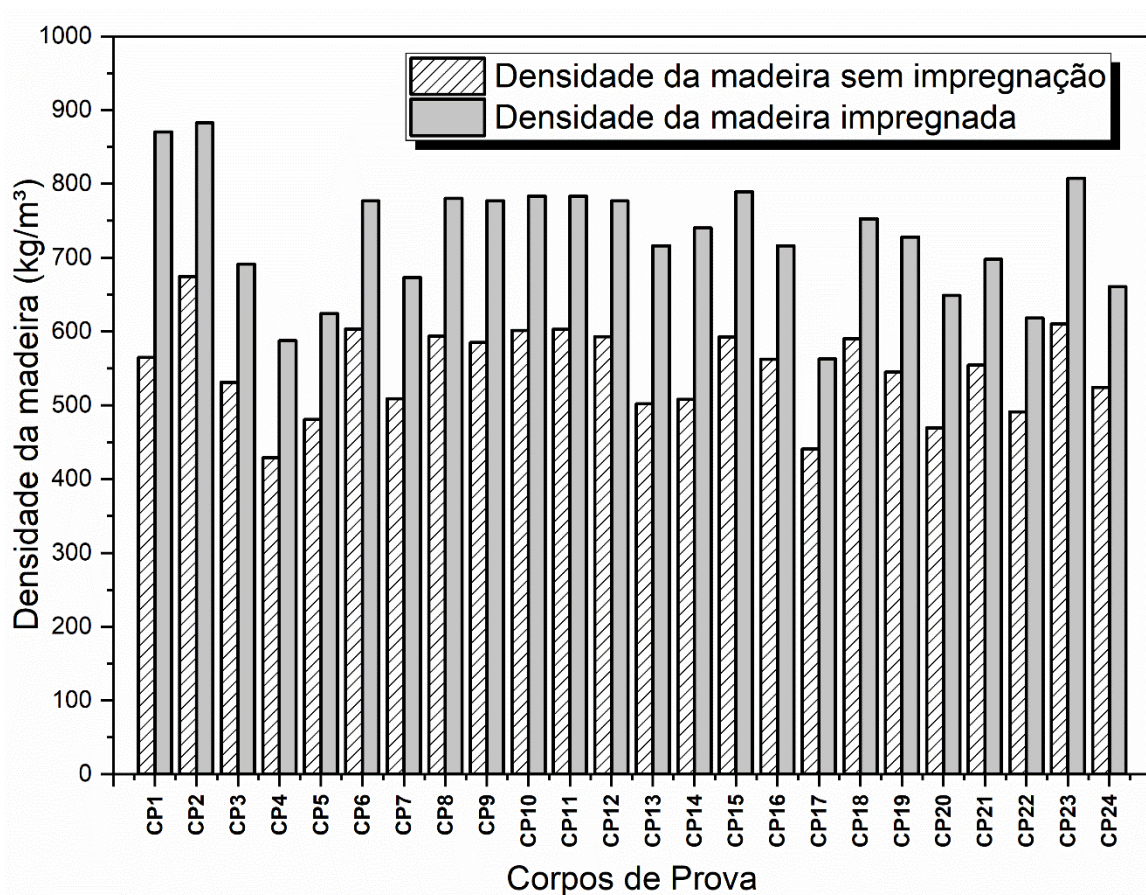
Espécie de madeira	Corpo de Prova	Massa (g)	Dif.	Densidade aparente
			(%)	kg/m³
<i>Pinus taeda</i>	CP1	12,60	54,11	870,38
<i>Pinus taeda</i>	CP2	12,60	30,81	882,64
<i>Pinus taeda</i>	CP3	11,30	30,18	691,45
<i>Pinus taeda</i>	CP4	9,60	36,99	587,42
<i>Pinus taeda</i>	CP5	10,20	29,84	624,14
<i>Pinus taeda</i>	CP6	12,70	28,75	777,11
<i>Pinus taeda</i>	CP7	11,00	32,21	673,09
<i>Pinus taeda</i>	CP8	11,30	31,52	780,58
<i>Pinus taeda</i>	CP9	12,70	32,85	777,11
<i>Pinus taeda</i>	CP10	12,80	30,29	783,23
<i>Pinus taeda</i>	CP11	12,80	29,98	783,23
<i>Pinus taeda</i>	CP12	12,70	31,09	777,11
<i>Pinus taeda</i>	CP13	11,70	42,68	715,92
<i>Pinus taeda</i>	CP14	12,10	45,71	740,40
<i>Pinus taeda</i>	CP15	12,90	33,26	789,35
<i>Pinus taeda</i>	CP16	11,70	27,28	715,92
<i>Pinus taeda</i>	CP17	9,20	27,78	562,95
<i>Pinus taeda</i>	CP18	12,30	27,59	752,64
<i>Pinus taeda</i>	CP19	11,90	33,65	728,16
<i>Pinus taeda</i>	CP20	10,60	38,16	648,61
<i>Pinus taeda</i>	CP21	11,40	25,77	697,56
<i>Pinus taeda</i>	CP22	10,10	25,87	618,02
<i>Pinus taeda</i>	CP23	13,20	32,32	807,71
<i>Pinus taeda</i>	CP24	10,80	26,05	660,85

Fonte: o Autor (2023)

Observa-se um aumento na massa e densidade dos corpos de prova impregnados com valor médio de 32,70%. Já a densidade dos corpos de prova

aumentou em média 32,99%, valores estes significativos aos valores iniciais, conforme Figura 5.12.

Figura 5.12 - Densidade das cavilhas de madeira *Pinus taeda* com e sem impregnação



Fonte: o Autor (2023)

5.6 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVILHAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA

A metodologia foi utilizada em cavilhas de madeira do gênero *Pinus taeda* impregnadas com monômero de metacrilato de metila. Adotou-se uma cavilha, com diâmetro de 16 mm e 300 mm de comprimento. O comprimento útil utilizado nos ensaios de flexão foi $L_1 = 28\text{cm}$ e $L_2 = 11\text{cm}$, sendo obtidos o deslocamento de $\delta_1 = 1,4\text{mm}$ ($L_1/200$) e $\delta_2 = 0,55\text{mm}$ ($L_2/200$). Para o fator de forma (f_s) presente no módulo de elasticidade ao cisalhamento é uma constante que depende da geometria da seção transversal da peça. Na literatura, para a seção transversal

circular, alguns autores apresentam diferentes valores de fatores de forma. Para avaliar a influência do emprego do fator de forma para seções circulares no módulo de elasticidade de cisalhamento, estes foram variados, assumindo os valores: 0,750, 0,847 e 0,900 conforme trabalho de (CHRISTOFORO *et al.* 2013).

As Tabelas 5.18 e 5.19 apresentam os parâmetros de E e G das cavilhas com e sem impregnação do monômero de metacrilato de metila.

Tabela 5.18 - Parâmetros de módulo de elasticidade longitudinal e transversal da cavilha engenheirada

Parâmetros da cavilha de madeira			
E (MPa)	G (MPa)		
	$f_s = 0,75$	$f_s = 0,847$	$f_s = 0,900$
16530,4	22,90	25,87	27,49

Fonte: o Autor (2023)

Tabela 5.19 - Parâmetros de módulo de elasticidade longitudinal e transversal da cavilha engenheirada

Parâmetros da cavilha de madeira engenheirada			
E (MPa)	G (MPa)		
	$f_s = 0,75$	$f_s = 0,847$	$f_s = 0,900$
19321,2	31,85	35,97	38,22

Fonte: o Autor (2023)

As Tabelas 5.18 e 5.19 apresentam os parâmetros encontrados nas cavilhas com diâmetro de 16 mm com e sem impregnação.

Observa-se que a impregnação do monômero de metacrilato de metila aumentou a rigidez das cavilhas.

Outro fator interessante é ressaltar que os valores aqui encontrados não convergem com estimativas presentes na ABNT NBR 7190 (2022) e ABNT NBR 7190 (1997), apresentando necessidade de pesquisas sobre o tema.

6. CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresentou o estudo de caracterização de madeiras da espécie *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* bem como a utilização do processo de impregnação do monômero de metacrilato de metila (MMA) em madeiras da espécie *pinus taeda*, para avaliar o aumento do parâmetro de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), e partir destas considerações analisar os resultados da impregnação para confecção de cavilhas de madeira engenheirada da espécie *Pinus taeda*.

A partir do amplo programa experimental realizado e dos resultados obtidos foi possível extrair as seguintes conclusões.

- A tentativa de impregnação de reinas naturais a base de óleo de mamona e resina a base de breu não se mostraram efetivas para o ganho de resistência à compressão paralela às fibras;
- A metodologia utilizada para impregnação do MMA se mostrou efetiva, utilizando pressão de 0,8 MPa bem com o tempo de impregnação e o processo de polimerização;
- A realização do processo de impregnação aumentou a resistência à compressão paralela as fibras em 92%. Permitindo assim sua utilização em elementos de ligação utilizando uma madeira de reflorestamento da espécie *Pinus taeda*;
- O ensaio realizado para caracterização das cavilhas por meio do ensaio de flexão apresentou uma cavilha com maior rigidez.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a continuidade dos estudos, submetendo a cavilha aqui desenvolvida em ensaios de ligações em situações de cisalhamento simples ou duplo, bem como, estudos numéricos para avaliação da resistência última de ligações com cavilhas de madeira engenheirada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ L., C.; FELIPE H., I.; CAIO VICTOR, F.; JULIANO, F.; JOÃO, N.; FRANCISCO A. ROCCO, L. Shear and Longitudinal Modulus of Elasticity in Structural Profiled Round Timber Beams. **International Journal of Materials Engineering**, vol. 3, no. 4, p. 87–91, 2013. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20130304.04>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1: Projetos de estruturas em madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: projetos de estruturas em madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BALASBANEH, A. T.; SHER, W. Comparative sustainability evaluation of two engineered wood-based construction materials: Life cycle analysis of CLT versus GLT. **Building and Environment**, vol. 204, no. July, p. 108112, 2021. DOI 10.1016/j.buildenv.2021.108112. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108112>.

BALLARIN, A. S.; RODRIGUES, S. A.; BALLARIN, A. W.; JÚNIOR, C. C. Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de Pinus spp - avaliação com estatística multivariada. 2018. **XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira [...]**. São Carlos: [s. n.], 2018. p. 1–12.

BARCAROLO, L. R. do V. **Estudo de Eficiência de Ligações por Cavilha de Compósito Estrutural em Vigas de Madeira Laminada**. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, 2019.

CERALDI, C.; D'AMBRA, C.; LIPPIELLO, M.; PROTA, A. Restoring of timber structures: connections with timber pegs. **European Journal of Wood and Wood Products**, vol. 75, no. 6, p. 957–971, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1179-6>.

CERALDI, Carla; LIPPIELLO, M.; CLAUDIO, D.; PROTA, A.; CERALDI, C.; LIPPIELLO, M.; CLAUDIO, D.; THE, A. P. The Influence of Dowel-Bearing Strength in Designing Timber Pegged Timber The Influence of Dowel-Bearing Strength in Designing Timber Pegged Timber Joints. **International Journal of Architectural Heritage**, vol. 12, no. 3, p. 362–375, 2017. DOI 10.1080/15583058.2017.1323249. Available at: <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323249>.

CHEN, C. J.; LEE, T. L.; JENG, D. S. Finite element modeling for the mechanical behavior of dowel-type timber joints. **Computers and Structures**, vol. 81, no. 30–31, p. 2731–2738, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00338-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00338-9).

DE ALMEIDA, A. C.; DE MELO MOURA, J. D. Mechanical Behavior of GFRP Dowel Connections to Cross Laminated Timber-CLT Panels. **Forests**, vol. 13, no. 2, p. 1–13, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13020320>.

DE ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, vol. 37, no. 90, p. 189, 2017. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.824>.

DESIGN OF TIMBER STRUCTURES - PART 1-1: GENERAL COMMON RULES FOR BUILDINGS. **Eurocode 5**. [S. l.: s. n.], 2004. vol. 1, .

DIAS, A. G.; VAN DE KUILEN, J. W.; CRUZ, H. M. P.; LOPES, S. M. R. NUMERICAL MODELING OF THE LOAD-DEFORMATION BEHAVIOR OF DOWELED SOFTWOOD AND HARDWOOD JOINTS Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias * Jan Willem Van de Kuilen Helena Maria Pires Cruz Sergio Manuel Rodrigues Lopes. 2010. .

DORN, M.; BORST, K. De; EBERHARDSTEINER, J. Experiments on dowel-type timber connections. **Engineering Structures**, vol. 47, p. 67–80, 2013. DOI 10.1016/j.engstruct.2012.09.010. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>.

EL HOUJEYRI, I.; THI, V. D.; OUDJENE, M.; OTTENHAUS, L. M.; KHELIFA, M.; ROGAUME, Y. Coupled nonlinear-damage finite element analysis and design of novel engineered wood products made of oak hardwood. **European Journal of Wood and Wood Products**, vol. 79, no. 1, p. 29–47, 2021. DOI 10.1007/s00107-020-01617-7. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01617-7>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Cultivo de Pinus. 2011. .

GOLDHAHN, C.; CABANE, E.; CHANANA, M. Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, vol. 379, no. 2206, 2021. DOI 10.1098/rsta.2020.0339. Available

at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0339>.

GOMES, O. F. Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeira. , p. 281, 1997. .

IZZI, M.; RINALDIN, G.; POLASTRI, A.; FRAGIACOMO, M. A hysteresis model for timber joints with dowel-type fasteners. **Engineering Structures**, vol. 157, no. July 2017, p. 170–178, 2018. DOI 10.1016/j.engstruct.2017.12.011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.011>.

JOHANSEN, K. . Theory of timber connections. 1949. .

JUDD, J. P.; FONSECA, F. S.; WALKER, C. R.; THORLEY, P. R. Tensile Strength of Varied-Angle Mortise and Tenon Connections in Timber Frames. **Journal of Structural Engineering**, vol. 138, no. 5, p. 636–644, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000468](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000468).

KHELIFA, M.; KHENNANE, A.; EL GANAOU, M.; CELZARD, A. Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, vol. 49, no. 5, p. 1829–1840, 2016. DOI 10.1617/s11527-015-0615-5. Available at: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0615-5>.

LACOURT, P. A.; CRISAFULLI, F. J.; MIRASSO, A. E. Finite element modelling of hysteresis, degradation and failure of dowel type timber joints. **Engineering Structures**, vol. 123, p. 89–96, 2016. DOI 10.1016/j.engstruct.2016.05.034. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.034>.

LI, Y. F.; LIU, Y. X.; LI, X. R.; LI, J.; WANG, X. M. Structural characterization of wood-polymer composite prepared by In Situ polymerization of styrene. **Materials Science Forum**, vol. 675 677, p. 491–494, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.675-677.491>.

LI, Y.; MENG, X.; LI, J.; LIU, Y. Performance of wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of styrene. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 26–28, p. 181–185, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.26-28.181>.

O'CEALLAIGH, C.; CONWAY, M.; MEHRA, S.; HARTE, A. M. Numerical Investigation of Reinforcement of Timber Elements in Compression Perpendicular to the Grain using Densified Wood Dowels. **Construction and Building Materials**, vol. 288, p. 122990, 2021. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122990. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122990>.

OLIVEIRA, F. L. de; LIMA, I. L. de; GARCIA, J. N.; FLORSHEIM, S. M. B. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, vol. 18, no. 3, p. 59–70, 2006. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.049>.

PÉREZ ZERPA, J. M.; CASTRILLO, P.; BAÑO, V. Development of a method for the identification of elastoplastic properties of timber and its application to the mechanical characterisation of *Pinus taeda*. **Construction and Building Materials**, vol. 139, p. 308–319, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.058>.

PONOMAREV, A. N.; RASSOKHIN, A. S. Hybrid wood-polymer composites in civil engineering. **Magazine of Civil Engineering**, vol. 68, no. 8, p. 45–57, 2016. <https://doi.org/10.5862/MCE.68.5>.

RACHER, P.; BOCQUET, J. F. Non-linear Analysis of Dowelled Timber Connection: a new approach for embedding modelling. **Electronic Journal of Structural Engineering**, vol. 5, p. 1–9, 2005. .

ROCCO LAHR, F. A.; CHRISTOFORO, A. L.; FIORELLI, J. Influence of nails size and layout to obtain the reduction coefficient of moment of inertia for timber beams with composite cross section. **Engenharia Agrícola**, vol. 36, no. 4, p. 715–723, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n4p715-723/2016>.

SANTOS, C. L.; DE JESUS, A. M. P.; MORAIS, J. J. L.; LOUSADA, J. L. P. C. Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection. **Construction and Building Materials**, vol. 23, no. 1, p. 171–182, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.005>.

SCHNEIDER, J.; SHEN, Y.; STIEMER, S. F.; TESFAMARIAM, S. Assessment and comparison of experimental and numerical model studies of cross-laminated timber mechanical connections under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, vol. 77, p. 197–212, 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.029. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.029>.

SCHNEIDER, M. H.; WITT, A. E. History of wood polymer. , p. 6, 2004. .

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na Silvicultura Brasileira**. [S. l.: s. n.], 2008. Available at: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/179582/1/Pinus-na-silvicultura-brasileira.pdf>.

SOARES, A. K.; CADEMARTORI, P. H. G. de; EVTYUGIN, D. V.; ZANATTA, P.; GATTO, D. A. Eficiência do tratamento combinado de impregnação e termorretificação nas propriedades da madeira de pinus. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 23, no. 4, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0576>.

STOLF, D. O. Impregnação com estireno e com metacrilato de metila em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. , p. 125, 2005. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-30102005-180057/en.php>.

STOLF, D. O.; BERTOLINI, M. da S.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Wood Impregnated with Methyl Methacrylate . **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 29, no. 6, p. 05016004, 2017a. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001830](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001830).

STOLF, D. O.; BERTOLINI, M. da S.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Wood Impregnated with Methyl Methacrylate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 29, no. 6, p. 05016004, 2017b. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001830](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001830).

STRUCTURES, T. **Abnt nbr 7190-3**. [S. l.: s. n.], 2022.

TEODORESCU, I.; PEREIRA, B.; AQUINO, C. D.; BRANCO, J. M. Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, vol. 173, no. 12, p. 927–938, 2020. <https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00021>.

WANG, M.; SONG, X.; GU, X. Three-Dimensional Combined Elastic-Plastic and Damage Model for Nonlinear Analysis of Wood. **Journal of Structural Engineering**, vol. 144, no. 8, p. 04018103, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002098](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002098).

XU, B. H.; BOUCHAÏR, A.; TAAZOUNT, M.; VEGA, E. J. Numerical and experimental analyses of multiple-dowel steel-to-timber joints in tension perpendicular to grain. **Engineering Structures**, vol. 31, no. 10, p. 2357–2367, 2009. DOI 10.1016/j.engstruct.2009.05.013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.05.013>.

XU, B. H.; TAAZOUNT, M.; BOUCHAÏR, A.; RACHER, P. Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints. **Construction and Building Materials**, vol. 23, no. 9, p. 3043–3052, 2009. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.04.006.

Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.006>.

ZENG, Q.; YU, X.; WEI, N.; WU, Z.; LIU, Q.; CHEN, N.; ZHAO, W. Effect of Impregnation with Natural Shellac Polymer on the Mechanical Properties of Fast-Growing Chinese Fir. **Polymers**, vol. 14, no. 18, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14183871>.

APÊNDICE A

ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Figura A. 1- Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 20x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

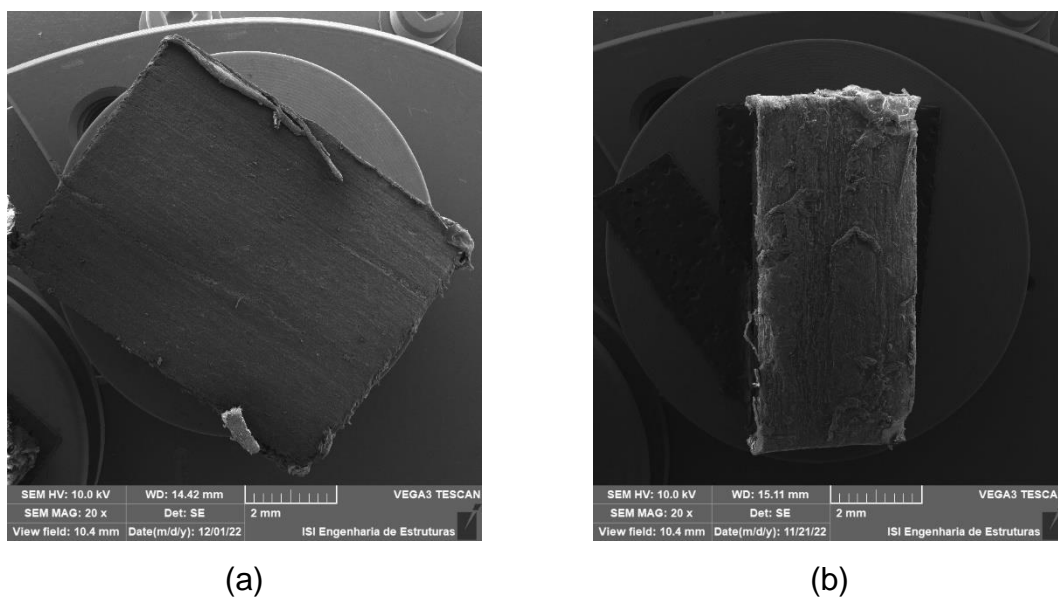


Figura A. 2 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 60x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

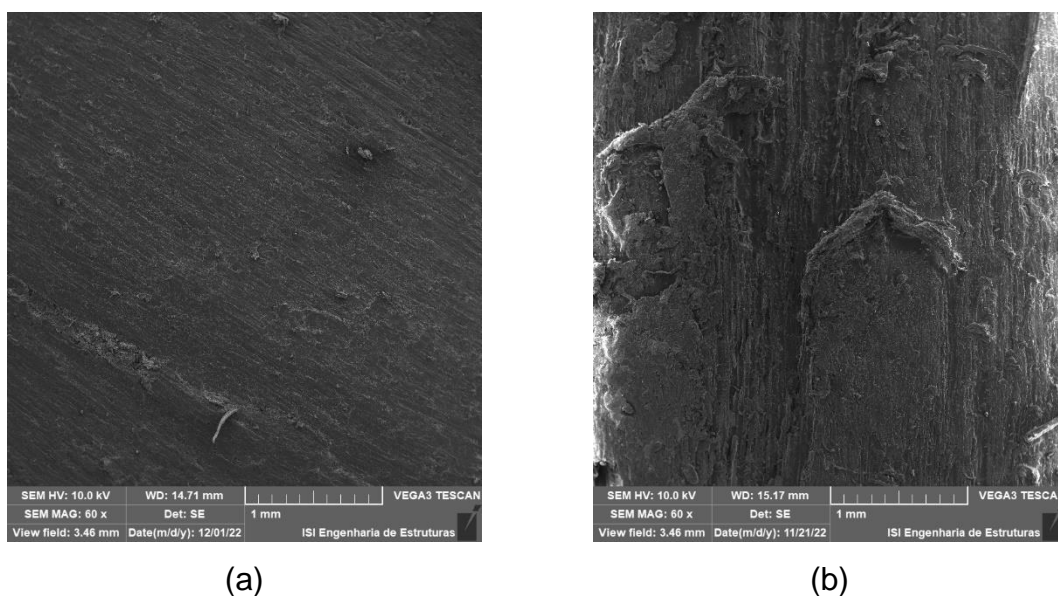
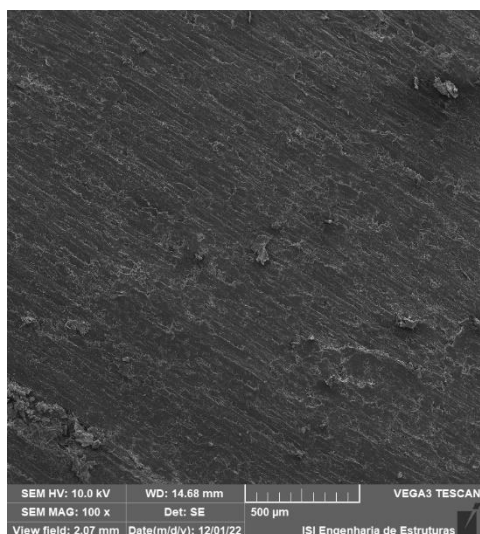


Figura A. 3 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 100x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

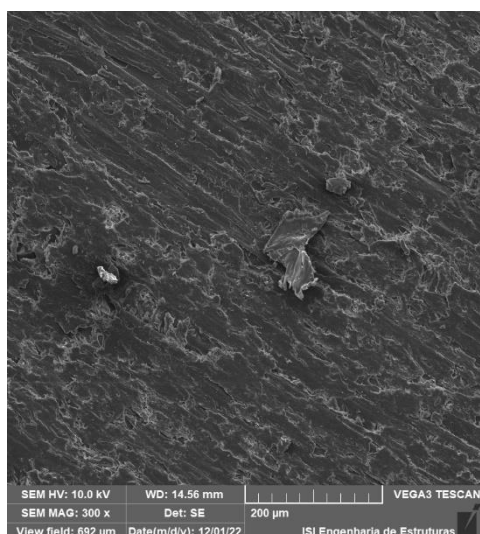


(a)

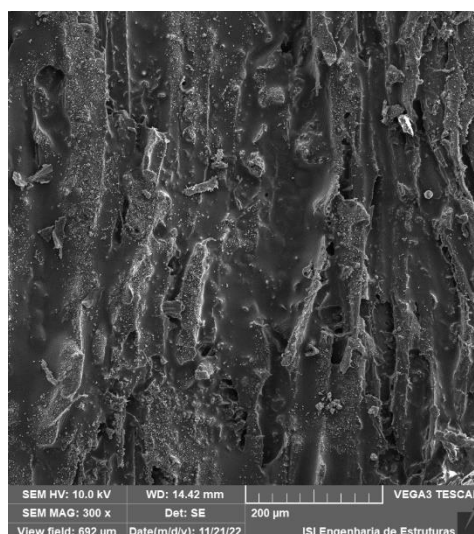


(b)

Figura A. 4 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 300x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

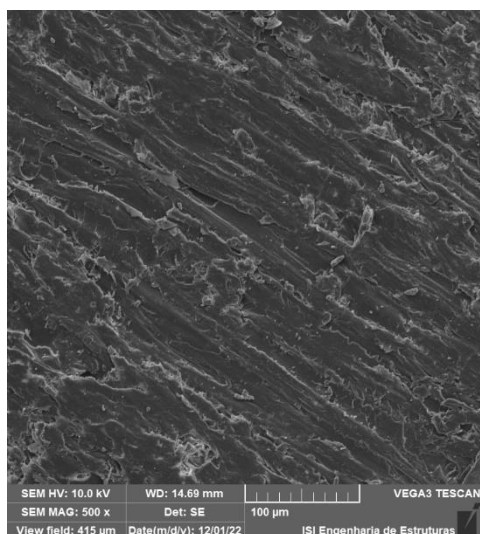


(a)

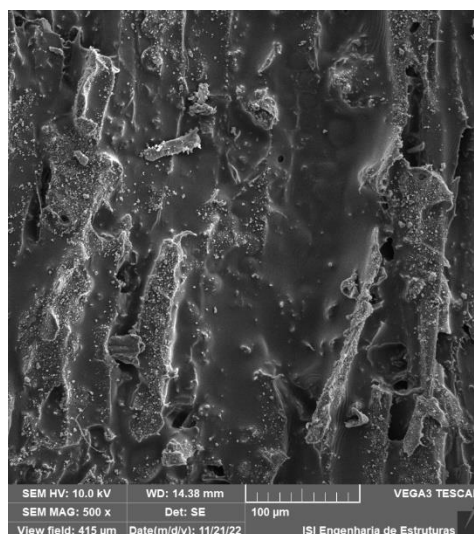


(b)

Figura A. 5 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

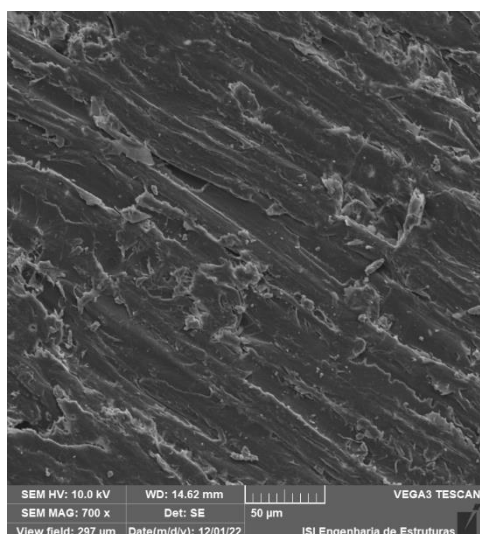


(a)

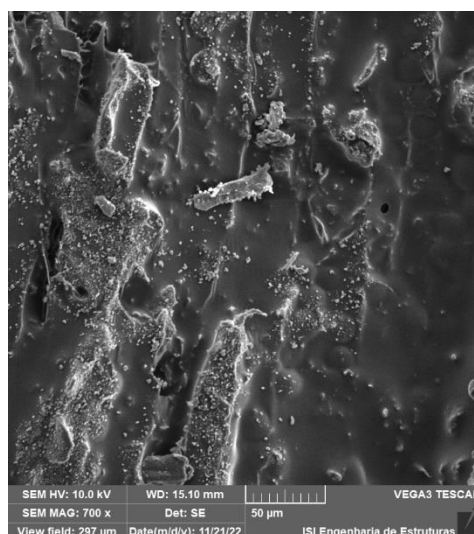


(b)

Figura A. 6 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 700x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

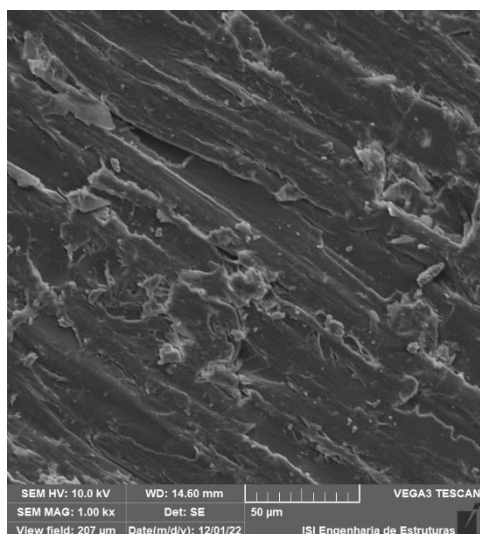


(a)

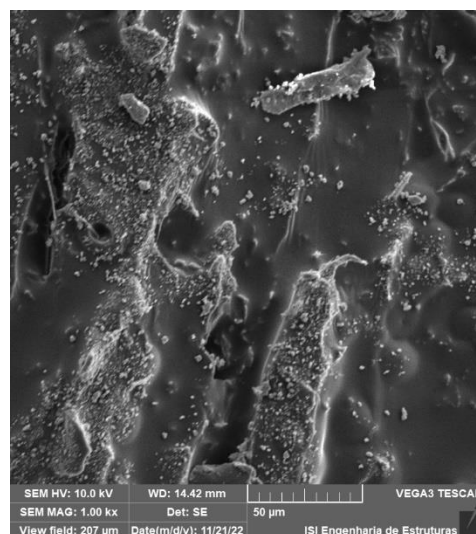


(b)

Figura A. 7 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 1000x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

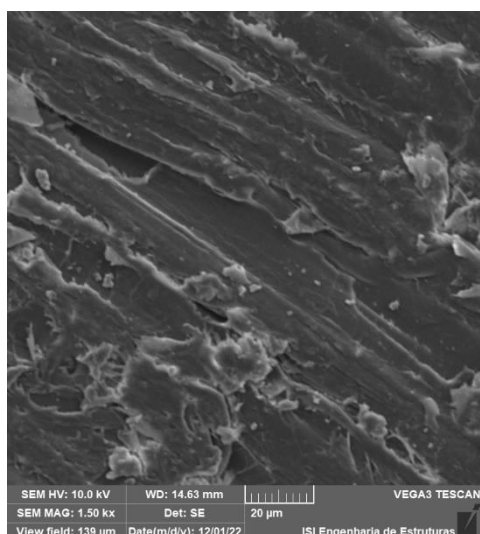


(a)

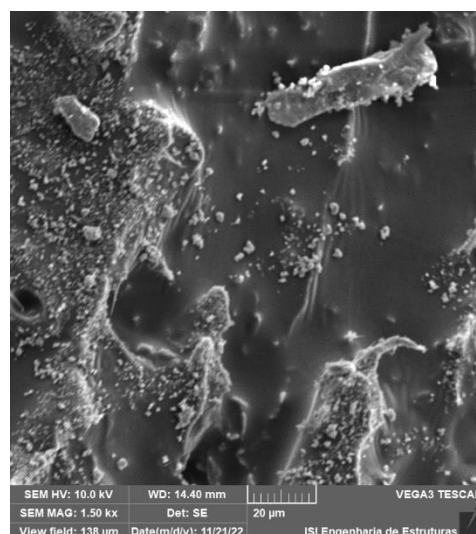


(b)

Figura A. 8 - Análise microscópica da madeira impregnada direção longitudinal, resolução da imagem 1500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

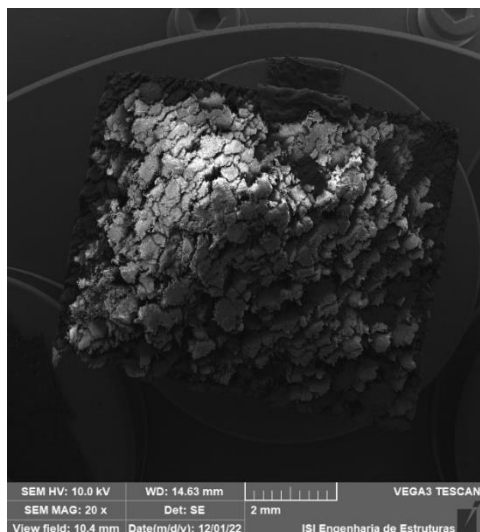


(a)

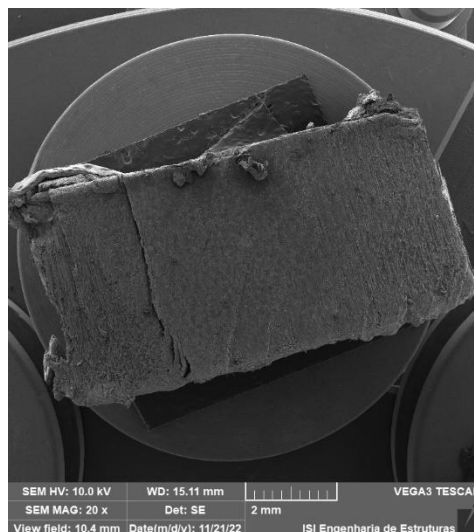


(b)

Figura A. 9 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 20x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

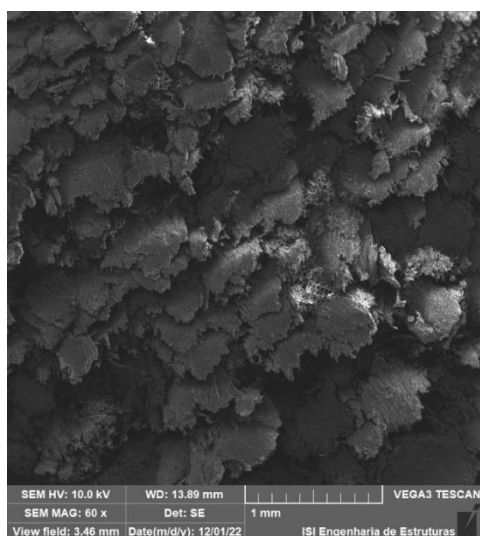


(a)

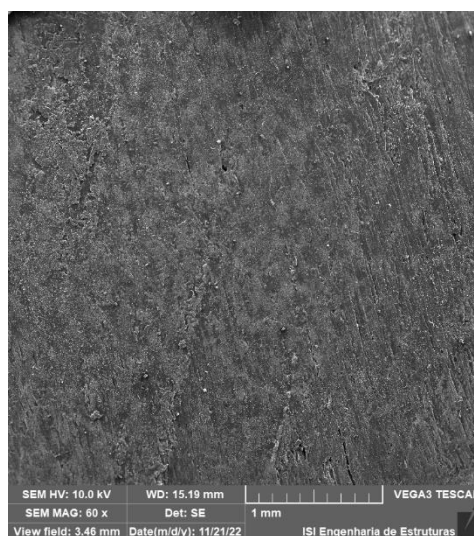


(b)

Figura A. 10 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 60x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

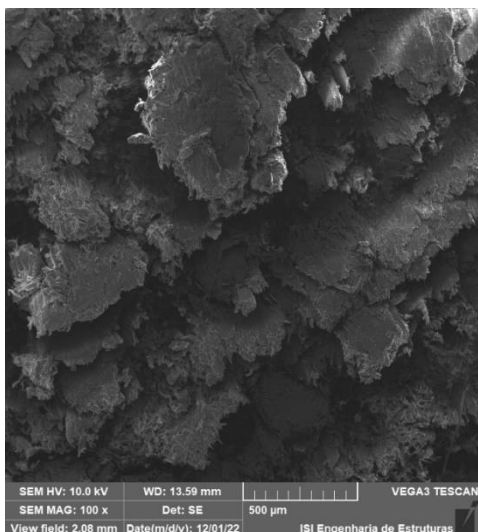


(a)

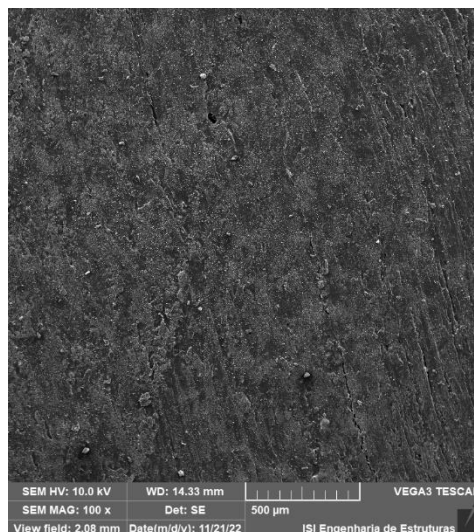


(b)

Figura A. 11 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 100x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

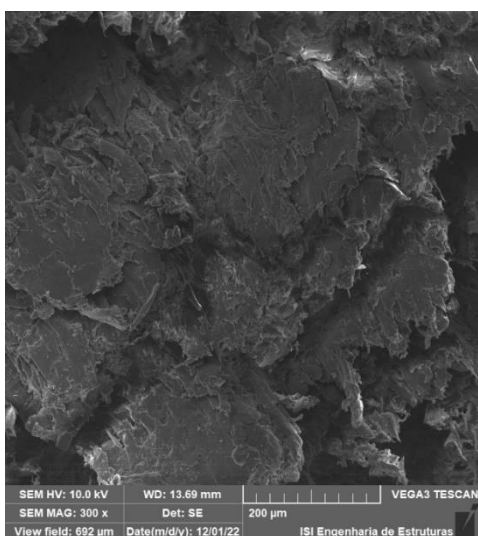


(a)

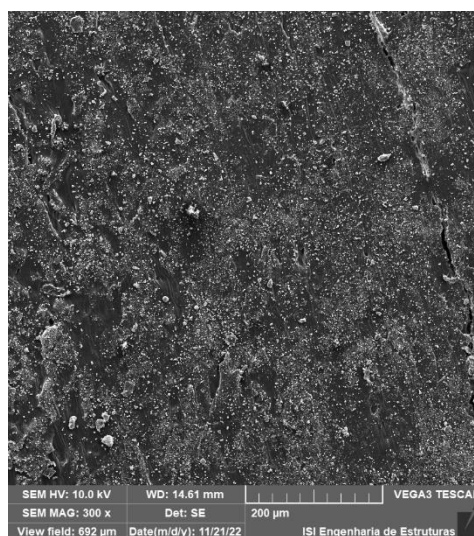


(b)

Figura A. 12 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 300x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

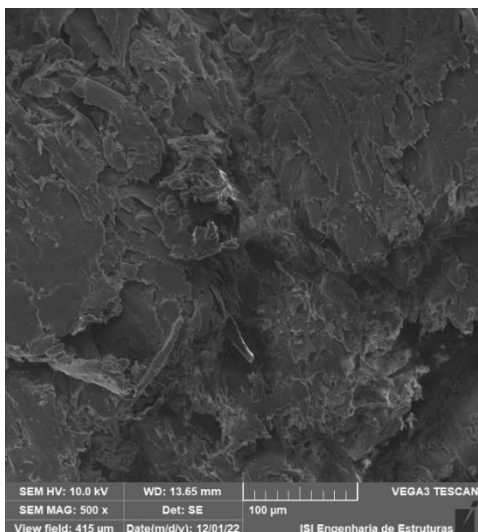


(a)

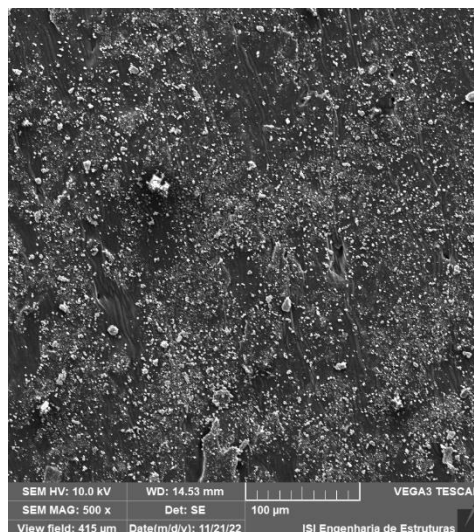


(b)

Figura A. 13 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

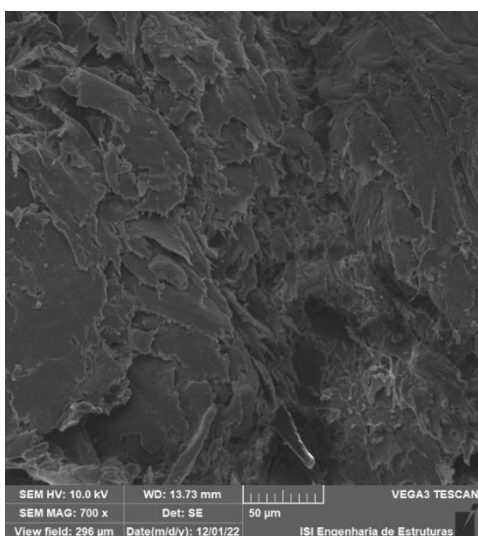


(a)

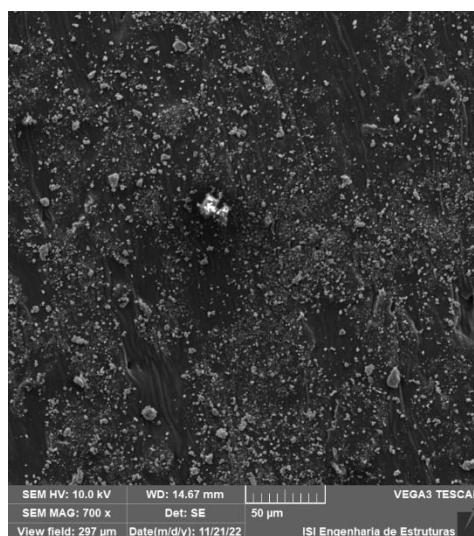


(b)

Figura A. 14 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 700x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

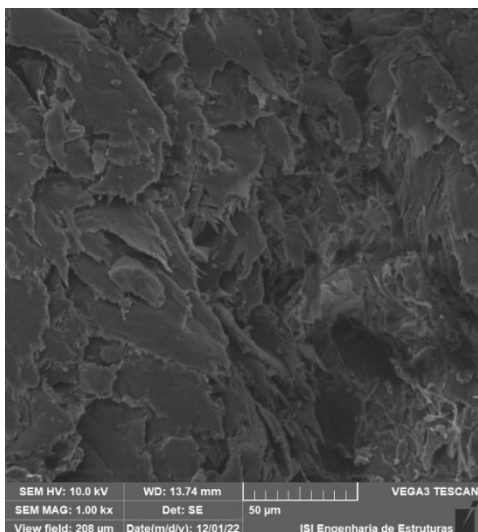


(a)

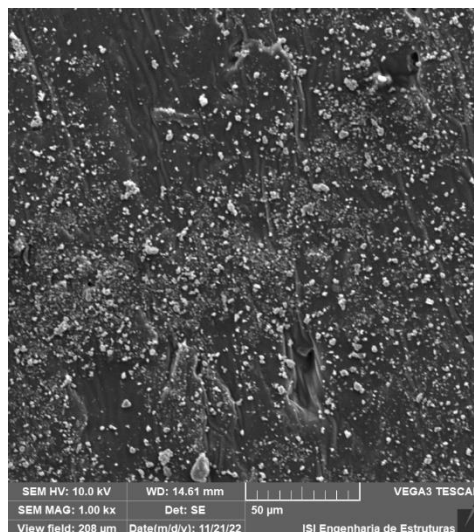


(b)

Figura A. 15 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 1000x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

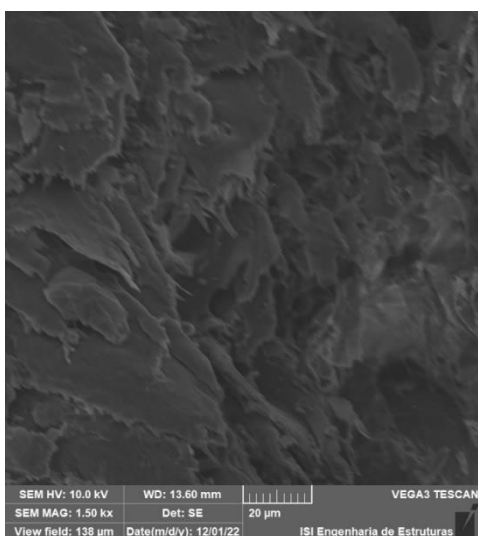


(a)

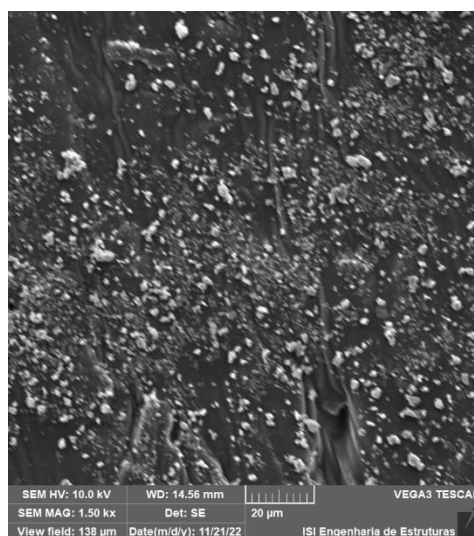


(b)

Figura A. 16 - Análise microscópica da madeira impregnada direção transversal, resolução da imagem 1500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

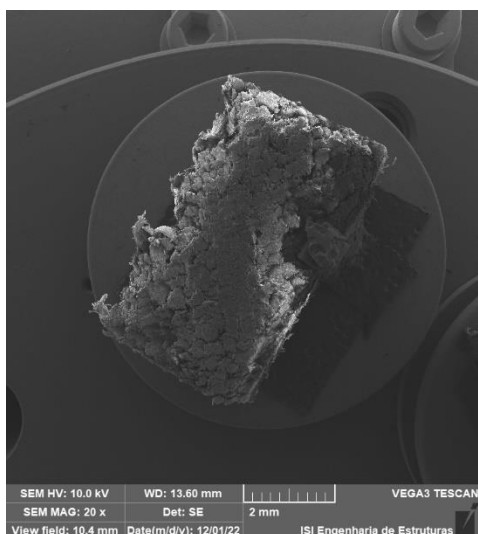


(a)

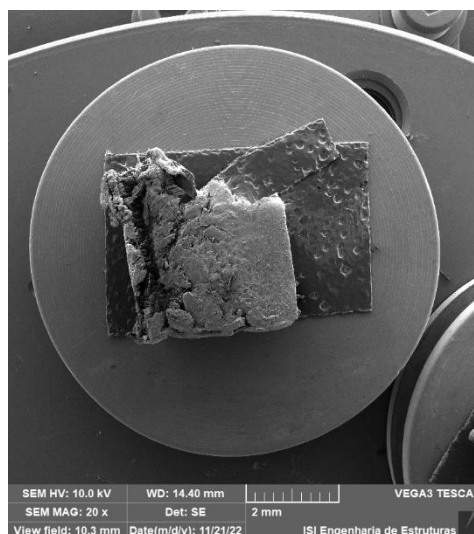


(b)

Figura A. 17 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 20x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

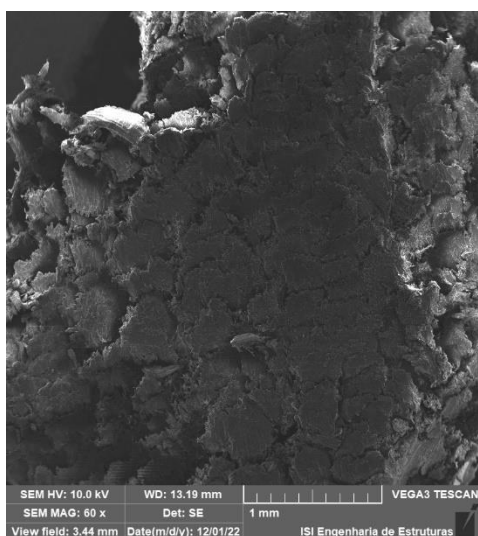


(a)

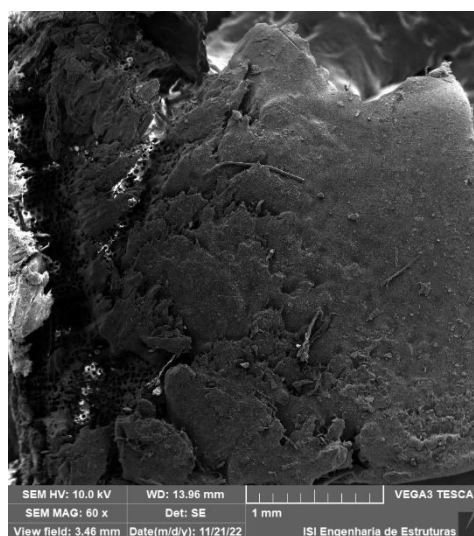


(b)

Figura A. 18 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 60x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

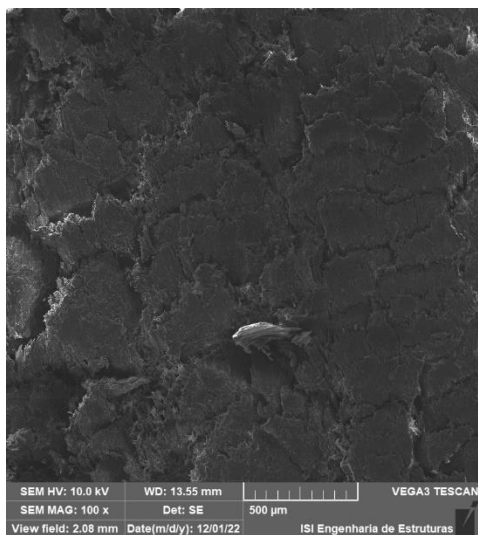


(a)

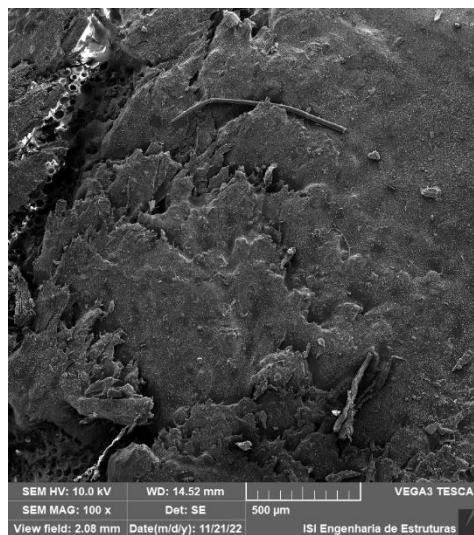


(b)

Figura A. 19 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 100x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

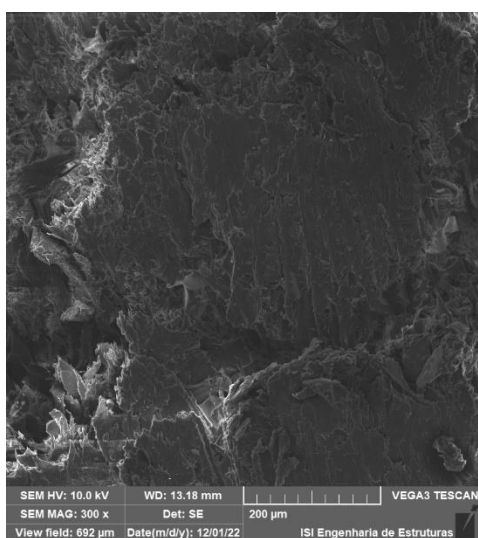


(a)

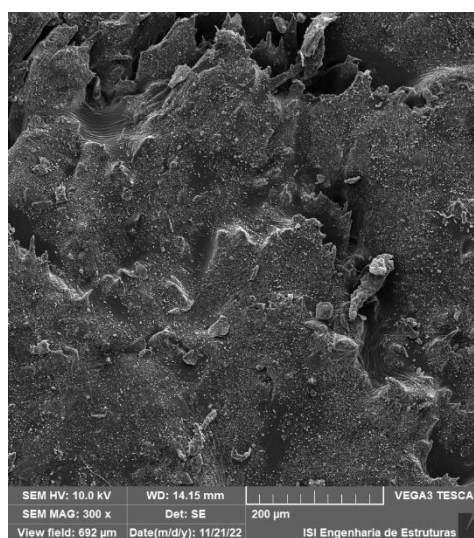


(b)

Figura A. 20 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 300x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

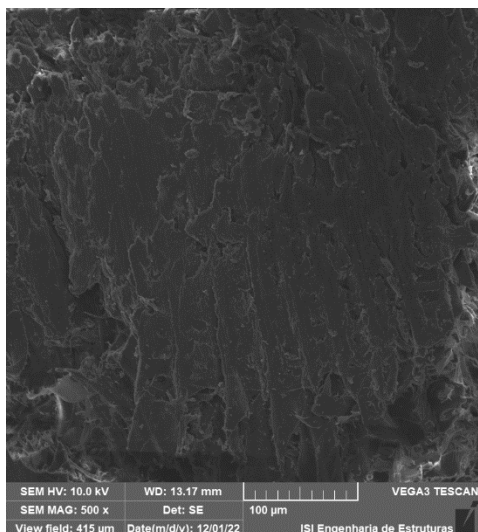


(a)

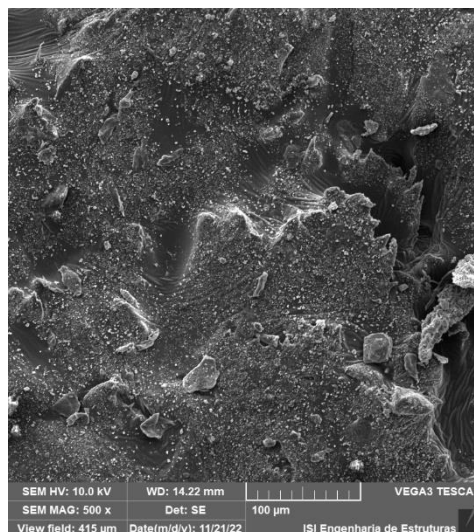


(b)

Figura A. 21 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

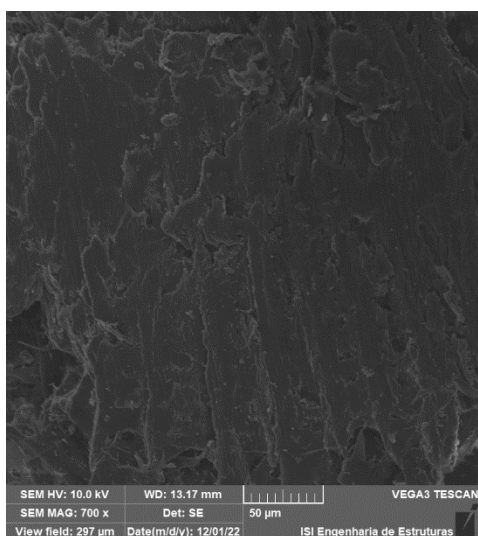


(a)

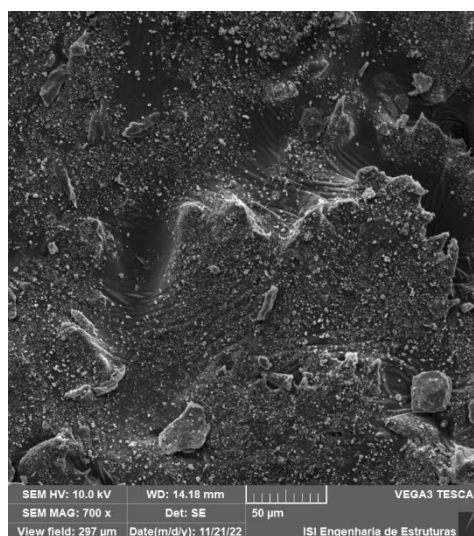


(b)

Figura A. 22 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 700x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

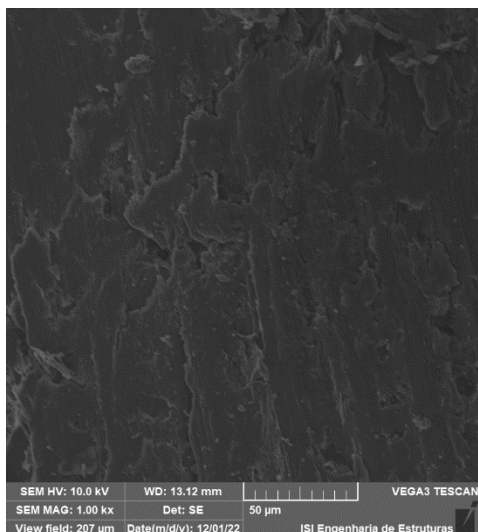


(a)

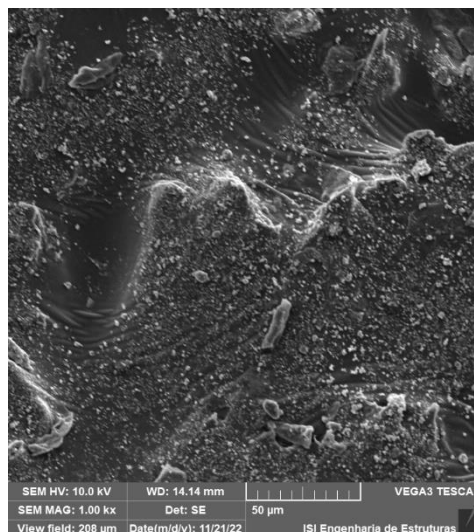


(b)

Figura A. 23 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 1000x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.

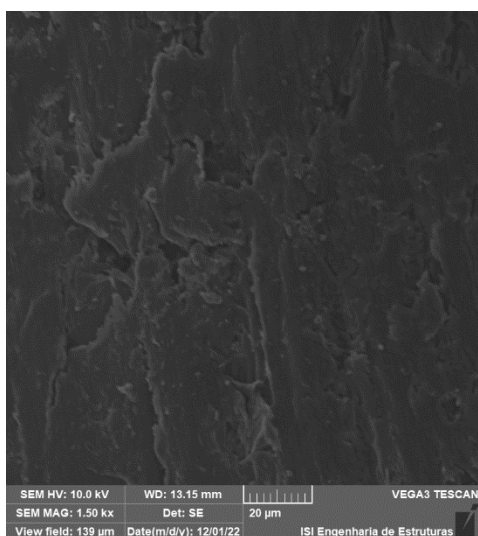


(a)

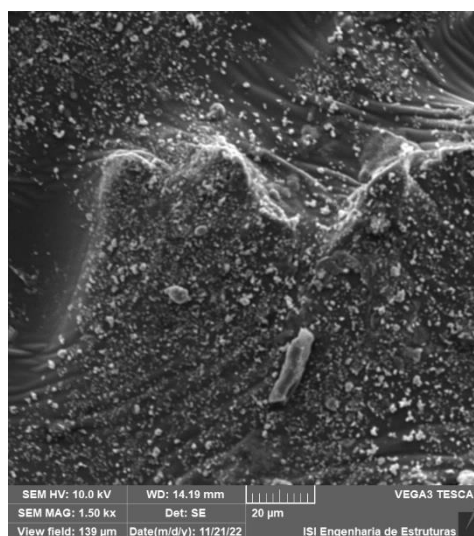


(b)

Figura A. 24 - Análise microscópica da madeira impregnada direção radial, resolução da imagem 1500x: (a) madeira sem impregnação; (b) madeira impregnada.



(a)



(b)