

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

MATHEUS BARBOSA FIORI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE LIGAÇÃO COM PINO METÁLICO
EM PERFIL DE
COMPOSTO PLÁSTICO RECICLADO**

GUARAPUAVA

2023

MATHEUS BARBOSA FIORI

**ANALYSIS OF MECHANICAL STRENGTH OF METAL PIN CONNECTION IN
RECYCLED PLASTIC COMPOSITE PROFILE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. MSc. Dyorgge Alves Silva

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS BARBOSA FIORI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE LIGAÇÃO COM PINO METÁLICO
EM PERFIL DE
COMPOSTO PLÁSTICO RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 05/Julho/2023

Dyorgge Alves Silva

Mestrado em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília, UnB
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Henrique Ajuz Holzmann

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Paulo Henrique Carvalho Mello

Especialização em Engenharia de Estruturas de Concreto Armado pela Faculdade Única
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

GUARAPUAVA

2023

Dedico a minha mãe Elza, pai Alberto e irmão Marcelo,
por todo apoio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer a minha família que sempre me apoio em todos os momentos durante esses anos de faculdade, em especial ao meu pai Alberto e minha mãe Elza que nunca mediram esforços para eu pudesse chegar até aqui, por nunca terem deixado de acreditar na minha capacidade até mesmo quando eu não acreditava que seria possível. Deixar meu agradecimento ao meu irmão Marcelo que mesmo das minhas dificuldades nunca me deixou baixar a cabeça, nunca me deixou desacreditar que seria possível. Aos demais familiares que me apoiaram.

Ao meu Orientador, Prof.MSc. Dyorgge Alves Silva, que nunca deixou de tirar minhas dúvidas, me dando ideias, e sempre se mostrou disposto a ajudar. E por ter aceitado me orientar.

Meus amigos que fiz durante a faculdade, em especial aos que morei durante tantos anos e se tornaram mais do que amigos mais sim uma família, Danilo, Fernando, Leonardo, Felipe “Japa” e aos que morei menos tempo Larissa, Luiz e Arthur, mesmo não tendo dividido o apartamento por tanto tempo como os outros foram importantes da minha trajetória. Um agradecimento a cada um da minha turma, mesmo não sendo mais próximo de muitos, levo todos com muito carinho.

Não poderia deixar de agradecer ao Adam, que me ajudou em alguns finais de semana, na confecção dos corpos de prova, ao Lucas técnico do laboratório, pela ajuda nos ensaios e Sidney pela ajuda quando foi necessário.

Você pode ter mais do que você tem, porque você pode se tornar mais do que você é.

Jim Rohn

RESUMO

Fiori, M. B. (2023). **Análise da resistência mecânica de ligação com pino metálico em perfil de composto plástico reciclado**. 2023. 61. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava 2023

Este trabalho tem como objetivo investigar as ligações por pino metálico em Wood-Plastic Composite (WPC) ou Compósito de Madeira-Plástico, destacando sua importância no projeto e dimensionamento de estruturas. Considerando que o Brasil ainda tem uma reciclagem pouco eficiente, muitas vezes descartando o material como lixo, a utilização de WPCs em vez de madeira convencional é importante, considerando fatores como possível redução de preço e impacto ambiental. Utilizando as diretrizes estabelecidas pela NBR 7190/2022 e pela EUROCODE 5, essas normas estabelecem critérios e requisitos para o projeto de estruturas de madeira, incluindo especificações para ligações. Foram realizados ensaios experimentais de compressão e por meio de gráficos e dados, foi possível avaliar a capacidade de carga e o desempenho dessas ligações, visando contribuir para o conhecimento e a aplicação segura desse material. Os resultados obtidos demonstraram uma resistência satisfatória das ligações por pino metálico em WPC. No entanto, são necessários estudos adicionais para explorar outros tipos de ligações.

Palavras-chave: Compósito de madeira-plástica, compressão, ligações, pino metálico e reciclagem.

ABSTRACT

Fiori, M. B. (2023). **Analysis of mechanical strength of metal pin connection in recycled plastic composite profile**. 2023. 61. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava 2023

This study aims to investigate the connections using metal pins in Wood-Plastic Composite (WPC), highlighting their importance in the design and dimensioning of structures. Considering the inefficient recycling practices in Brazil, often leading to the material being discarded as waste, the use of WPCs instead of conventional wood is significant, considering factors such as potential cost reduction and environmental impact. By following the guidelines established by NBR 7190/2022 and EUROCODE 5, which provide criteria and requirements for timber structure design, including specifications for connections, experimental tests were conducted. Through graphs and data analysis, the load-carrying capacity and performance of these connections were evaluated, aiming to contribute to the knowledge and safe application of this material. The obtained results demonstrated satisfactory strength of the connections using metal pins in WPC. However, further studies are needed to explore other types of connections.

Keywords: Wood-Plastic Composite, compression, connections, metal pin, recycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Formas de ruptura das ligações com pinos de metal: plastificação do pino (a), embutimento (b), cisalhamento (c), fendilhamento (d).	18
Figura 2: Modos de ruptura no membro lateral do painel de WPC feito com parafuso: (a) lateral (tração líquida), (b) embutimento, (c) arrancamento e (d) clivagem/rachadura.	19
Figura 3: Ligação por corte simples e duplo	20
Figura 4: Geometria de ligação com duas sessões de corte.....	20
Figura 5: NBR 7190/22 Espaçamento e distancias mínimas para ligações com conectores metálicos.	22
Figura 6: Equações e modos de falha para uma seção de corte simples.....	26
Figura 7: Equações e modos de falha para duas seções de corte.....	27
Figura 8: Modelo padrão dos Corpos de Prova.....	30
Figura 9: Perfis Fabricados pela Replastik	32
Figura 10: Exemplo de barra roscada utilizada	33
Figura 11: Características da barra roscada	33
Figura 12: Serra Circular de Bancada	34
Figura 13: Furadeira de Bancada.....	34
Figura 14: Corpo de prova 1	35
Figura 15: Corpo e prova 2.....	36
Figura 16: Corpo de prova 3	36
Figura 17: Corpo de prova 4	37
Figura 18: Corpo e prova 5.....	37
Figura 19: Modelo da máquina universal de ensaios (EMIC DL30000)	38
Figura 21: Corpo de prova1 antes e depois do ensaio.....	46
Figura 22: CP1, após abertura	46
Figura 23: Corpo de prova 2 antes e depois do ensaio.....	47
Figura 24: CP2 após a abertura	47
Figura 25: Corpo de prova 3 antes e depois do ensaio.....	47
Figura 26: CP 3 após a abertura	48
Figura 27: Corpo de prova 4 antes e depois do ensaio.....	48
Figura 28: CP4 após a abertura	48

Figura 29: Corpo de prova 5 antes e depois do ensaio.....	49
Figura 30: CP5 após a abertura	49
Figura 31: Barra roscada CP1 após ensaio.....	50
Figura 32: Barra roscada CP2 após ensaio.....	50
Figura 33: Barra roscada CP3 após ensaio.....	51
Figura 34: Barra roscada CP4 após ensaio.....	51
Figura 35: Barra roscada CP5 após ensaio.....	51
Figura 36: Falha apresentada no CP1.	52
Figura 37: Vista superior de comparação CP1 e CP3	53
Figura 38: Comparação do CP3 com CP1 após corte.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Materiais usados em pinos metálicos	23
Tabela 2: Detalhamento dos corpos de prova	40
Tabela 3: Resultados de Rigidez das ligações dos corpos de prova de madeira plástica	41
Tabela 4: Resumo do Ensaio das ligações em Eucalipto	42

GRAFICOS

Gráfico 1: Força x Deformação CP1	43
Gráfico 2: Força x Deformação CP2	43
Gráfico 3: Força x Deformação CP3	44
Gráfico 4: Força x Deformação CP4	44
Gráfico 5: Força x Deformação CP5	45
Gráfico 6: Comparativo entre CP1 e CP3	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WPC	Wood-Polymer Composite
ASTM.	Sociedade Americana de Ensaios e Materiais;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	Organização Internacional de Normalização
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
EUROCODE	Conjunto de normas europeias
DIN	Instituto Alemão de Normalização

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Parâmetro que representa a relação t/d .
β_{lim}	Parâmetro limite para β .
Rvd	Resistência do pino em uma seção de corte.
t	Espessura das peças.
n0	Número convencional de pinos.
CP	Corpo de prova
d	Diâmetro do pino

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA	17
3.2 LIGAÇÕES PARAFUSADAS	17
3.3 LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS	17
3.4 SEGUNDO A NBR 7190/2022	21
3.4 CRITÉRIO DE RUPTURA DAS LIGAÇÕES	23
3.5 SEGUNDO A EUROCODE 5/2004	26
3.6 DIAMETRO DOS FUROS	28
3.7 NÚMERO DE PARAFUSOS	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 MATERIAIS	30
4.1.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	30
4.2 LIGAÇÕES POR BARRA ROSCADA	32
4.3 MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA	35
4.4 MÉTODOS	38
4.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO	38
4.5 PRODECIMENTO PARA COLETA DE DADOS	39
4.6 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES	39
5 RESULTADOS	40
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS	40
5.3 CORPOS DE PROVA APÓS OS ENSAIOS	45
5.4 BARRA ROSCADA APÓS O ENSAIO	50
5.1 DISCUSÃO DO ENSAIO NO CP1	52
6 CONCLUÇÕES	55
6.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	56
7 REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O Brasil sendo um dos maiores produtores de lixo plástico do mundo e sendo o plástico um dos maiores poluentes de acordo com Fundo Mundial para Natureza (WWF , 2019) mesmo existindo tecnologia de reciclagem desse material uma grande parte ainda é descartada como lixo, devido a sua baixa atratividade financeira sendo que a coleta retira uma grande parte do lucro.

Na atualidade a demanda pelo reaproveitamento de materiais mostra-se necessário já que a procura por empresas que utilizam materiais reciclados tem aumentado por ser uma forma ecologicamente bem-vista.

Os compósitos de madeira e plástico (WPCs) são uma combinação de materiais que envolve madeira, em várias formas, e polímeros termofixos ou termoplásticos (Clemons , 2002). Os termofixos, como epóxi e fenólicos, são plásticos que, uma vez curados, não podem ser derretidos através do aquecimento. Por outro lado, os termoplásticos, como polietileno de alta densidade e polietileno de baixa densidade, são plásticos que podem ser derretidos repetidamente. Nos últimos anos, os compósitos termoplásticos de madeira têm experimentado um crescimento significativo no mercado de materiais para uso externo, como decks, cercas, elementos paisagísticos e, especialmente, em aplicações de móveis. (UTRI, Adam. 2015) Isso se deve às suas características únicas, incluindo poucas fissuras e rachaduras, resistência às intempéries, durabilidade, resistência a insetos e infecções fúngicas, além de boa usinabilidade (Klyosov, 2007).

Ligações em madeira podem ser separadas em dois grupos; por encaixe, nas quais conexão é realizada pelo contato entre as peças e as que utilizam elementos externos que transmitem os esforços entre as peças, como, por exemplo, os pinos metálicos, que são os elementos de ligação em estruturas de madeira mais utilizados no Brasil (CALIL JUNIOR et al., 2003).

Ao tomar a decisão de utilizar um produto compósito de madeira e plástico (WPC) em vez de madeira, é importante considerar diversos fatores, tais como o desempenho aprimorado, redução de preço ou impacto ambiental. Tomemos como exemplo o uso de áreas externas. Optando por utilizar WPC em vez de madeira, devido à facilidade de manutenção e maior durabilidade. Com WPC, não é necessário aplicar revestimentos adicionais, o que proporciona uma vantagem em termos de

manutenção. Além disso, a madeira plástica pode apresentar uma aparência mais estética, sem a presença de nós e rachaduras comuns em madeira maciça. Portanto, a escolha de um produto de madeira plástica pode ser motivada tanto por considerações práticas quanto estéticas, levando em conta a necessidade de maior durabilidade e a redução de exigências de manutenção. (SCHWARZKOPF, Matthew John; BURNARD, Michael David, 2016)

Existem diversos tipos de ligações para estruturas de madeira, porém as mais utilizadas no Brasil são as ligações por pinos metálicos, que podem ser pregos ou parafusos, devido ao baixo custo e facilidade de aplicação. (MAIA, Bruna Bernardi, 2016).

A ligação é um ponto fundamental na estrutura de madeira, sendo que uma falha nessa região pode levar a estrutura ao colapso. (LEUTNER, Aline Marques, 2013). O dimensionamento correto dessas ligações serve para garantir a durabilidade e segurança das estruturas. Sendo que em madeira plástica a pouco estudo de ligações, podendo o estudo dar um maior entendimento de como ela se comporta, para uma área que vem crescendo na parte de reaproveitamento de materiais.

A associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que apresenta a norma que regula os critérios para o dimensionamento das ligações em madeira o “Projeto de Estruturas de Madeira” (ABNT NBR 7190:2022). Além da norma brasileira existe tanto a americana ASTM D5652/2000 e a europeia EUROCODE 5/2004 de grande relevância.

O que limita a melhor aplicação do material é a falta de conhecimento técnico, com isto o presente trabalho busca verificar o melhor entendimento do comportamento das ligações parafusadas em material de composto reciclado assim com a realização de ensaio tanto de compressão como de tração poderão dar um maior conhecimento de como o material se comporta.

Portanto, este estudo investiga o efeito do diâmetro de inserção do parafuso e do furo, taxa de carga, tipo de parafuso e espessura na resistência lateral de juntas parafusadas de madeira plástica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar e analisar o desempenho das ligações por barra roscada em materiais plásticos reciclados conhecidos como "madeira plástica", avaliando sua resistência mecânica, visando um entendimento adequado desse material em aplicações de construção e design. E avaliação da resistência das ligações por barra roscada em madeira plástica, que é um material fabricado a partir da reciclagem de plásticos e é utilizado como alternativa sustentável à madeira convencional.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

O trabalho tem como foco os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o comportamento das ligações no material composto e os tipos de falhas;
- Avaliar a resistência à compressão das ligações em madeira plástica por meio de ensaios laboratoriais, analisando a influência da barra.
- Analisar as possíveis formas de ruptura nas amostras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira plástica, também conhecida como plástico madeira ou WPC (Wood Plastic Composite), a madeira plástica é um produto novo que vem substituindo com vantagens a madeira natural, sendo ecologicamente correta e fabricada a partir da transformação de matérias-primas reaproveitáveis (naturais ou não) e de materiais recicláveis, como resíduos de diversos tipos de plástico e fibras vegetais (KIELING, A 2019).

Esses resíduos sólidos são lançados em sua maioria ao meio ambiente. A dificuldade que a exposição desses resíduos tem causado e os custos envolvidos no seu armazenamento têm levado a sociedade, em geral, a buscar alternativas para esse problema, visando à redução do volume de resíduos a serem estocados. Uma das alternativas consiste basicamente na reciclagem de quantidades cada vez maiores de materiais. (TEIXEIRA, 2012)

Nos últimos anos, os compósitos podem ser encontrados em diversas áreas, tais como engenharia civil, industrial, estruturas residenciais e monumentos históricos, entre outros (BRIGANTE, 2014). No entanto, a compreensão do desempenho das ligações parafusadas nesse material é crucial para garantir sua adequada utilização em projetos estruturais e de design. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo explorar os principais estudos e pesquisas relacionados às ligações parafusadas em material plástico reciclado "madeira plástica".

Segundo JOHANSEN (1949), a união por parafusos depende do atrito entre as superfícies devido ao efeito do pino e da força de tração do parafuso. Mas os resultados dos testes mostraram que apenas o efeito do pino deve ser considerado, porque a tracionamento é insignificante. A resistência das juntas de cavilha depende da resistência da madeira quando aparafusada e da maleabilidade do aço na cavilha, e sendo de natureza plástica, a capacidade de resistência de um pino de metal pode ser moldada com este comportamento NBR 7190/2022 os critérios dimensionais para ligações de pinos são baseados neste conceito.

A relação entre a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência da fixação e o escoamento do pino metálico determinam o comportamento da junta, que pode se deformar ao embutimento na madeira. Por isso, diversas normas vigentes como EUROCODE 5, DIN 1052 e NBR 7190/2022 utilizam esse conceito.

Sobre as recomendações do EUROCODE 5, HILSON (1995) observa que as equações de Johansen são geralmente aplicáveis a qualquer combinação de materiais derivadas da madeira, desde que as propriedades do material sejam conhecidas.

As conexões em estruturas de madeira são necessárias devido às limitações de tamanho das peças de madeira. As peças de madeira em sua forma bruta têm seu comprimento limitado pelo tamanho das árvores e pelas restrições de transporte. Já as peças de madeira serrada possuem tamanhos ainda mais limitados, geralmente variando entre 4 e 5 metros (PFEIL; PFEIL, 2003).

Já os materiais plásticos reciclados podem ser moldados em diferentes formas e tamanhos, o que proporciona uma maior flexibilidade para as estruturas de WPC (GARDNER, Douglas). Isso permite a criação de soluções arquitetônicas personalizadas, atendendo às necessidades específicas de cada projeto.

3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA

A norma brasileira atual para projetos de estruturas de madeira, NBR 7190/2022, aborda as ligações em madeira classificando-as em diferentes tipos: ligações por pinos metálicos (pregos e parafusos), cavilhas de madeira, anéis metálicos e conectores com dentes estampados. Esses tipos de ligações são utilizados para garantir a estabilidade e resistência das estruturas de madeira.

3.2 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

Os parafusos são elementos de fixação empregados na união de peças, por sua facilidade de aplicação, e se diferenciam pela forma da rosca, da cabeça, da haste e do tipo de acionamento. Os parafusos passantes atravessam as peças a serem unidas passando livremente nos furos. Possuem cabeça hexagonal ou semiesféricas e diâmetros variados de até 30 mm. De acordo com a necessidade do projeto, além das porcas, podem utilizar arruelas e contra porcas como acessórios. (SILVA JUNIOR 2017)

3.3 LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS

As conexões que utilizam pinos metálicos são divididas em dois grupos: as que utilizam pregos e as que utilizam parafusos. Neste trabalho, testes são realizados em amostras conectadas por parafusos (barra roscada). O maior esforço na construção em madeira está concentrado nas ligações, por isso são os pontos chave. Se uma conexão falhar, toda a estrutura pode entrar em colapso. (CALIL JUNIOR, 2003).

Na maioria das conexões que utilizam pinos metálicos, os componentes são dimensionados como dependendo do número e espaçamento entre pinos devido às respectivas limitações.

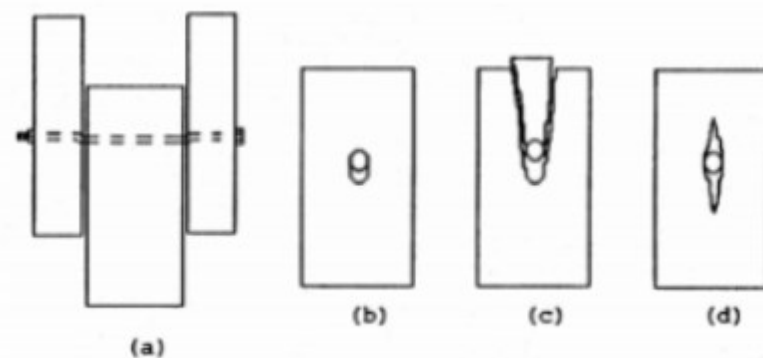
Observou-se que nos casos em que a estrutura fica exposta, o fator estético também é levado em consideração, resultando em restrições (MOREIRA, 2004).

Conexões parafusadas podem exibir quatro modos de falha: Plastificação de pinos dobrando metal, encaixando cavilhas em madeira, cortando e rachando madeira.

Segundo ALMEIDA (1990) em estudo de ligações com pregos e parafusos em estruturas de madeira conclui que os pontos críticos das peças são geralmente as áreas de suas ligações onde a concentração de força deve ser controlada. O aumento da eficiência das juntas possibilitou o uso racional da madeira em grandes estruturas. Este desenvolvimento está relacionado principalmente com o desenvolvimento de conexões de pregos e parafusos.

O uso adequado de ligações requer conhecimento de possíveis falhas dessa conexão e avaliação de sua rigidez. Vale a pena mencionar que a adequação de tal conexão para uma determinada situação depende de vários fatores, como por exemplo: facilidade de execução, comportamento de resistência, durabilidade, custo e aspecto estético como mostra a figura 1, (ALMEIDA 1987).

Figura 1: Formas de ruptura das ligações com pinos de metal: plastificação do pino (a), embutimento (b), cisalhamento (c), fendilhamento (d).



Fonte: (ALMEIDA, 1987).

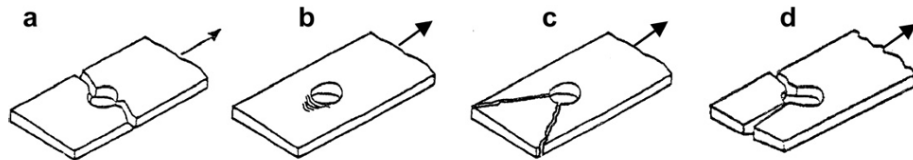
- (a) – durante a plastificação, o pino dobra e a parede do furo pode plastificar parcialmente (ALMEIDA, 1987).
- (b) – neste caso, o parafuso penetra na madeira, rompendo a parede do furo. Isso pode acontecer em situações em que a relação entre a espessura da madeira (t) e o

diâmetro do parafuso (d) é muito pequena ou quando a madeira em questão é de baixa resistência (ALMEIDA,1987).

- (c) e (d) – Em ambos os casos (cisalhamento e fendilhamento), Almeida (1) conclui que é necessário haver regras que limitem o diâmetro do furo pré-perfurado, o espaçamento mínimo e a folga para cada utilização de parafusos metálicos.

Já para material plástico os modos de falha, estão na figura a seguir:

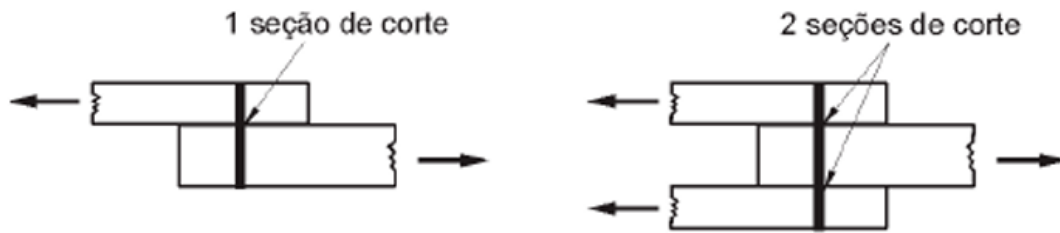
Figura 2: Modos de ruptura no membro lateral do painel de WPC feito com parafuso:
(a) lateral (tração líquida), (b) embutimento, (c) arrancamento e (d) clivagem/rachadura.



. Fonte: Materials na Desgin adaptado (2011)

Quando a força que precisa ser transmitida por uma conexão está perpendicular ao eixo do elemento de ligação, ela é conhecida como conexão por corte. Nesse tipo de conexão, podem existir uma, duas ou até várias seções de corte. Essa é a situação em que pinos, pregos e parafusos são submetidos quando utilizados como elementos de conexão axial, sendo solicitados por esforços normais e se comportando de maneira semelhante (PFEIL, 2017).

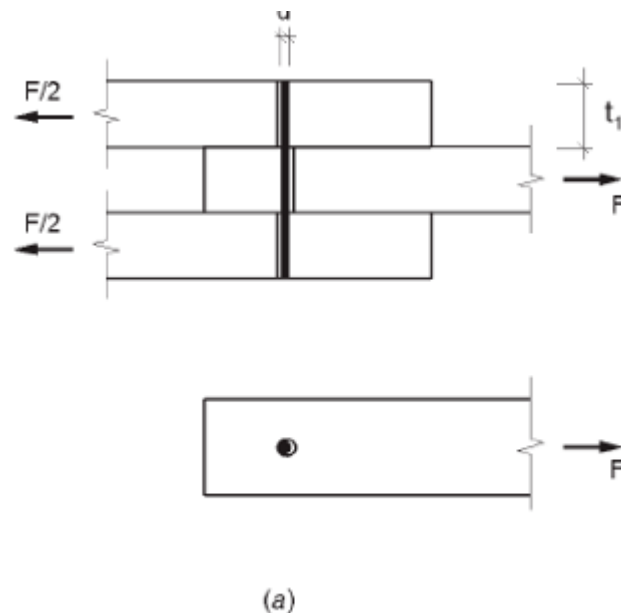
Figura 3: Ligação por corte simples e duplo



Fonte: PFEIL (2017).

No caso de uma conexão de corte duplo, a força aplicada é transmitida pelo suporte do pino na madeira. O pino é submetido à flexão simples devido à carga transversal distribuída ao longo de seu eixo, enquanto a madeira é submetida à compressão localizada e paralela às fibras (PFEIL, 2017).

Figura 4: Geometria de ligação com duas sessões de corte.



Fonte: PFEIL (2017)

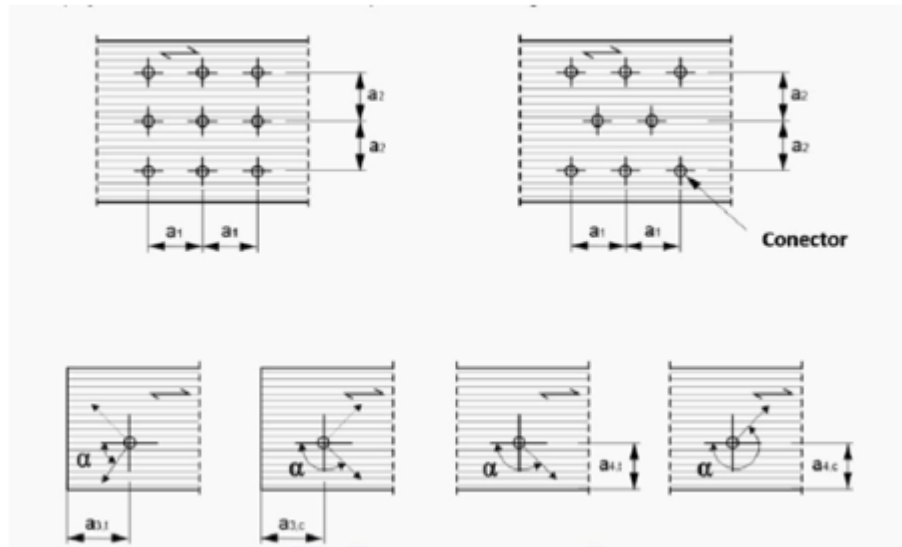
3.4 SEGUNDO A NBR 7190/2022

O critério de medição da NBR 7190/22 para juntas de pinos é baseado na relação entre a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência de imersão e o escoamento do pino **metálico. a forma** da junta pode ser alterada baixando a madeira ou dobrando o pino. A resistência do pino é obtida somando as resistências correspondentes a suas diferentes seções dez para unir madeira e aço.

Para melhor distribuir a os esforços, a NBR 7190:2022 proíbe a utilização de um único pino metálico na ligação. As ligações de pinos de metal são classificadas em deformáveis e rígidas devido à deformação. Uma ligação com quatro ou mais pinos é considerada rígida quando os limites pré-perfurados especificados pelo padrão são atendidos pela norma. Sendo que com 2 ou 3 pinos de ligação estão sujeitos a deformações e só podem ser usados em estruturas uniformemente comprimidas.

Conforme NBR 7190/22 em ligações por pinos metálicos requerem parafusos pré-furados com folga de 0,5 mm ao diâmetro do parafuso. O objetivo desta limitação é facilitar a colocação dos conectores tornando-os menos deformados. Nestas juntas, o principal objetivo da pré-furação é reduzir o risco de trincas. Os parafusos devem ser de aço estrutural conforme NBR 8800, preferencialmente diâmetros de 10mm, 12,5mm e 16mm. Além disso, conforme norma NBR 7190/22, os pregos devem ser de aço 1011-B e as dimensões devem ter diâmetro nominal d mínimo de 3,0mm atendendo as especificações norma NBR 6627. Sendo que os espaçamentos entre parafusos podem ser vistos:

Figura 5: NBR 7190/22 Espaçamento e distancias mínimas para ligações com conectores metálicos.



Fonte: Adaptada NBR 7190/2022

a_1 : é o espaçamento entre o centro de dois conectores situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras;

a_2 : é o espaçamento entre o centro de dois conectores situados em duas linhas perpendiculares à direção das fibras;

a_3, c : é a distância do centro do conector à extremidade não carregada da peça;

a_3, t : é a distância do centro do conector à extremidade carregada da peça;

a_4, t : é a distância do centro do conector à borda lateral carregada da peça;

α, t : é o ângulo entre a força e a direção das fibras.

Ainda segundo NBR 7190/22 os tipos de ligação mecânicas poder ser divididas em quatro grupos, sendo eles:

- a) Ligações por pinos metálicos;
- b) Ligações por anéis metálicos e chapas com dentes estampados;
- c) Ligações por sambladuras ou entalhes;
- d) Ligações coladas.

Sendo que as ligações por pinos possuem comportamento regido por um misto de flexão do pino e/ou embutimento do pino na madeira. Se enquadram no

primeiro grupo de ligações com parafusos passantes com porcas e arruelas (sextavado e francês), parafusos de rosca soberba, pregos e pinos metálicos ajustados.

No caso de ligações por pinos metálicos, devem ser respeitados os espaçamentos e pré-furações especificados em 7.1.10, para evitar o fendilhamento precoce da madeira em virtude da introdução dos elementos de união. Não são permitidas ligações com apenas um pino.

Esses elementos de ligações devem atender as seguintes dimensões e resistência mínimas. Como mostra a tabela a seguir:

Tabela 1 : Materiais usados em pinos metálicos

Especificações do pino metálico	Classificação	fy,k(Mpa)	fu,k(Mpa)	Diâmetro nominal mínimo
		-	635	3,00 ≥ mm d ≥ 3,54
Pregos liso cabeça padrão	ABNT NBR 5589	-	600	3,55 ≥ mm d ≥ 3,99
		-	490	5,00 ≥ mm d ≥ 10,00 mm
		A307	250	415
Parafuso passante padrão ASTM	A325	635	825	d ≥ 3/8 pol ou d ≥ 10 mm
	A490	895	1035	
	Classe 4.8	235	400	
Parafuso passante padrão ISO 898-1	Classe 8.8	640	800	d ≥ 10mm
	Classe 10.9	900	100	
Parafuso de rosca soberba	-	250	415	d ≥ 3/8 ou d ≥ 9,5mm

Fonte: Adaptado NBR 7190/2022

3.4 CRITÉRIO DE RUPTURA DAS LIGAÇÕES

Alguns estudos também são realizados em juntas de parafuso feitas de madeira plástica reciclada. Falk mostrou que a resistência lateral do prego diminuiu com o aumento do teor de serragem. Foi observada uma redução de 6% na resistência lateral para amostras contendo 20% de serragem. (FALK, Robert H. 2001).

Alguns estudos revelaram que a resistência ao arrancamento do parafuso depende do diâmetro do parafuso, do orifício correspondente e da profundidade de penetração do parafuso no corpo principal. Alguns estudos também são realizados em juntas de parafuso feitas de madeira plástica reciclada mostrou que a resistência lateral do prego diminuiu com o aumento do teor de serragem. Foi observada uma redução de 6% na resistência lateral para amostras contendo 20% de serragem. (FALK, Robert H. 2001).

A resistência lateral dos parafusos de madeira plástica em um plano de cisalhamento (duas partes) depende de vários fatores, como as propriedades do material e as dimensões de conexão das peças. Isso inclui a espessura e a resistência das duas partes conectadas e o diâmetro e rendimento do parafuso.

De acordo com a norma brasileira, as dimensões dos elementos de ligação devem atender à condição de segurança $S_d \leq R_d$, onde R_d é o valor calculado da resistência dos elementos de ligação e S_d é o valor calculado das cargas que atuam sobre ele. A relação entre a espessura da peça (t_1) e o diâmetro do parafuso (d) é representada pelo parâmetro β (Equação 1), que determina a resistência da junta em uma parte da seção.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (1)$$

O Valor limite de β é representado pelo parâmetro β_{lim} , mostrado na Equação 2.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{\gamma_s}} \sqrt{\frac{\gamma_s}{f_{ed}}} \quad (2)$$

Sendo:

- f_{yk} : valor da tensão de escoamento do parafuso;
- γ_s : coeficiente de segurança (usa-se 1,1);
- f_{ed} : valor de cálculo da resistência ao embutimento.

A norma apresenta uma relação β e β_{lim} :

• Para $\beta < \beta_{lim}$ ocorre embutimento na madeira com giro do pino metálico dado por $R_{vd,1}$

Onde:

$$R_{vd,1} = 0,40 * t * d * f_{ed} \quad (3)$$

Para $\beta > \beta_{lim}$ ocorre flexão do pino metálico, sendo $R_{vd,1}$, dado pela equação:

$$R_{vd,1} = 0,625 * \frac{d^2}{\beta_{lim}} * f_{yd} \quad (4)$$

Onde, f_{yd} : Resistência de cálculo da tensão de escoamento do aço do pino metálico.

3.5 SEGUNDO A EUROCODE 5/2004

Equacionamento para seção de corte

Figura 6: Equações e modos de falha para uma seção de corte simples

<p>(la) (lb) (lc) (IIa) (IIb) (III)</p>		
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.	
(la)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	(2)
(lb)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	(3)
(lc)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$	(4)
(IIa)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$	(5)
(IIb)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right]$	(6)
(III)	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$	(7)
<p>$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.</p>		

Fonte: (MAIA, Bruna Bernardi, 2016).

Figura 7: Equações e modos de falha para duas seções de corte.

<p>(Ia) (Ib) (II) (III)</p>		
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.	
(Ia)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	(8)
(Ib)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	(9)
(II)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$	(10)
(III)	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$	(11)
$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modelos de falha.		

Fonte: (MAIA, Bruna Bernardi, 2016).

Onde:

- F_v , k1 a k4: resistência característica de um pino, em MPa (será o menor valor dentre os resultados de cada modo);
- f_e , k1 e f_e , k2: resistência ao embutimento característica para t_1 e t_2 , em MPa;
- t_1 e t_2 : espessura das peças, em mm;
- β : razão entre $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$;

- Fax, Rk: resistência ao arrancamento característica do pino;
- My,k: Momento de Escoamento do pino.

3.6 DIAMETRO DOS FUROS

De acordo com a ABNT NBR 7190/2022, é recomendado que a pré-furação em ligações parafusadas seja feita com um diâmetro (d_0) que não seja maior do que o diâmetro (d) do parafuso, acrescido de 0,5 mm.

Por outro lado, o EUROCODE 5 (2004) recomenda que a pré-furação em peças de madeira tenha um diâmetro (d_0) que não seja superior a 1 mm maior do que o diâmetro do parafuso (d).

Portanto, para ligações parafusadas em madeira, é importante considerar as recomendações específicas da norma aplicável (como a ABNT NBR 7190) ou o código de projeto (como o EUROCODE 5) para determinar o diâmetro adequado da pré-furação, levando em conta o tamanho e o tipo do parafuso utilizado.

3.7 NÚMERO DE PARAFUSOS

Conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190/2022, a resistência total de um pino de ligação é determinada pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte. Para ligações com até oito pinos alinhados paralelamente à direção da força a ser transmitida, a resistência total é obtida somando-se as resistências individuais de cada pino. No entanto, para ligações com mais de oito pinos, os pinos suplementares devem ser considerados com apenas $2/3$ de sua resistência individual. Dessa forma, a determinação do número convencional de pinos (representado por "n") é calculada de acordo com a equação 5.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3}(n - 8) \quad (5)$$

De acordo com Porteous e Kermani (2007), o número efetivo de elementos de fixação em uma ligação depende tanto do tipo de conector utilizado quanto da direção da força aplicada. Essa abordagem é descrita de maneira mais detalhada no EUROCODE 5 (2004).

O EUROCODE 5 estabelece diretrizes para o projeto de estruturas de madeira e define critérios específicos para determinar o número efetivo de fixadores em uma ligação. Esses critérios levam em consideração fatores como a carga aplicada, a geometria da ligação e o tipo de conector utilizado.

Ao calcular o número efetivo de fixadores em uma ligação de acordo com o EUROCODE 5, é necessário levar em conta esses fatores para determinar o número adequado de fixadores que garantam a resistência e a estabilidade da ligação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento de ligações aparafusadas de materiais compósitos, como madeira plástica, é baseado principalmente em dados obtidos experimentalmente e modelos analíticos, que são em sua maioria empíricos. Devido à importância dos testes, esta seção visa fornecer uma visão geral dos métodos de teste relacionados.

No caso da madeira plástica, a resistência à ruptura por ligação de pino metálico em um plano de cisalhamento depende de vários fatores, como as propriedades do material e as dimensões das peças de conexão. Estes incluem a espessura e capacidade de carga das duas partes conectada e o diâmetro e rendimento do parafuso. Portanto, este estudo investigou os efeitos do diâmetro da barra, taxa de carregamento, tipo de parafuso e espessura resistências laterais previstas por modos de falha também serão comparadas com valores medidos.

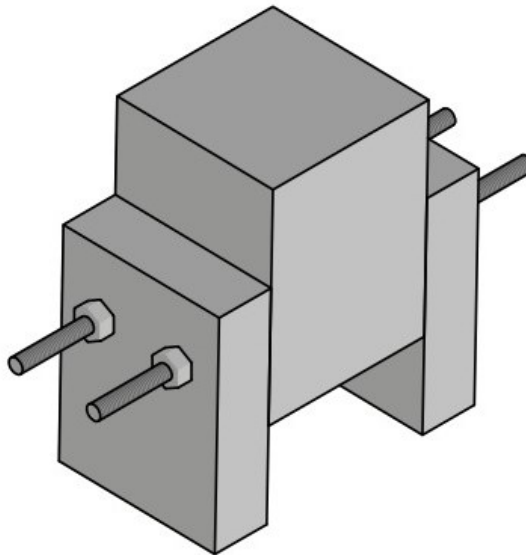
O uso de fixadores mecânicos geralmente requer furos na estrutura que são conectados entre si. Conseqüentemente, o Comitê ASTM D-30 desenvolveu métodos de teste padrão para determinar a resistência à tração e à compressão de laminados compósitos aparafusados e não aparafusados contendo furos. Métodos para testar a resistência estática dos parafusos também foram desenvolvidos.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A empresa Replastik forneceu os materiais de madeira plástica reciclada, que foram definidos em formato de corte duplo com peças laterais em tábuas de (6x3x12) cm e a peça central como palanque de (9x7x12) cm, para a produção dos corpos de prova. Esses corpos de prova foram fabricados utilizando duas barras roscadas, porcas e arruelas, de acordo com os tamanhos e definições especificados pela norma NBR 7190/2022, bem como as normas ISO 4016 e DIN 440R (2011) para as arruelas. Foram produzidos cinco corpos de prova para o presente estudo como modelo figura 8.

Figura 8: Modelo padrão dos Corpos de Prova



Fonte: Autoria própria (2023)

Como o material em sua essência é a base de PEAD/PEBD/PP/BOPP e outros, onde as quantias de cada material podem ser alteradas de acordo com as características buscadas podendo ser visto a composição de cada material a seguir:

Tabela 2: Características de polímeros quanto as propriedades físico-química.

Polietileno de alta densidade (PEAD)	Polímero de cadeia simples, com alto peso molecular, possui alta resistência e durabilidade, podendo ser aplicado em situações de maiores carregamentos, como tubulações, tanques de combustível e embalagens de produtos quimicamente agressivos.
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Flexível, atóxico, baixo peso molecular, baixa reatividade, impermeável e baixo custo, este é material muito indicado para itens de menor valor, ou embalagens alimentícias
Polipropileno (PP)	Apresenta propriedades excepcionais de resistência mecânica, dispõem de boa resistência química e ainda é um ótimo isolante elétrico.
Polipropileno Bi orientado (BOPP)	Seu uso é amplo em embalagens flexíveis, muito aplicável para embalagens de alimentos, além de invólucros para presentes, flores, rótulos de garrafas PET, fitas adesivas, entre tantas outras aplicações
Poli cloreto de vinila (PVC)	É um polímero atóxico, leve, solido, resistente, impermeável, estável e que não propaga chamas. Além disso, sua reutilização tem baixo custo energético
Poli tereftalato de etileno (PET)	Principal uso na fabricação de garrafas para refrigerantes. Características, como excelente resistência ao ataque de substituías, resistência a deformações, baixo nível de absorção de umidade e baixo custo tomaram o PET um dos plásticos mais consumidos no mundo.

Fonte: Piatti & Rodrigues (2005)

Foram dimensionados corpos de prova com duas barras roscadas, sendo o corpo de prova de seção dupla com definido pela NBR 7190/2022, como material não tem exatamente duas peças com tamanhos exatos que fossem o dobro para a seção dupla, foi adaptado sendo a peça do meio ligeiramente, maior que o dobro das peças laterais, isso sendo uma adaptação para o material em questão, mas seguindo tanto a NBR 7190/2022 como a EUROCODE 5 /2004.

A imagem a seguir demonstra os perfis disponibilizados pela empresa Replastik:

Figura 9: Perfis Fabricados pela Replastik



Fonte: Representante da empresa Replastik

4.2 LIGAÇÕES POR BARRA ROSCADA

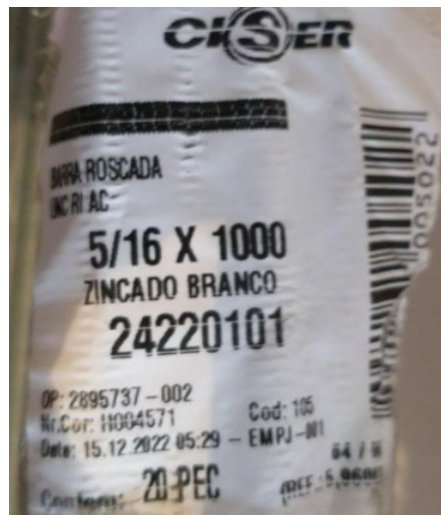
Foram utilizadas duas barras roscadas da marca CISER de 5/16" a com arruelas para que fosse possível transpor o tamanho do corpo prova. O Modelo e barra roscada pode ser visto nas figuras 9 e 10:

Figura 10: Exemplo de barra roscada utilizada



Fonte: Autoria própria. (2023)

Figura 11: Características da barra roscada



Fonte: Autoria própria (2023)

O corpo de prova foi pré-furado em uma furadeira de bancada e cortado com uma serra de bancada, de acordo com pedido pela NBR 7190/2022 que pode ser visto nas figuras 11 e 12:

Figura 12: Serra Circular de Bancada



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 13: Furadeira de Bancada



Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Cada corpo de prova utilizado no estudo consistiu em três peças de madeira plástica sendo perfis tipo tabuas para laterais e perfis tipo palanque para a peça central, resultando em duas seções de corte na ligação a ser ensaiada. As barras roscadas foram fixadas a uma distância de 3,5 cm das extremidades de cada uma das peças, e os furos necessários foram feitos utilizando uma furadeira de bancada.

As barras roscadas foram cortadas manualmente, utilizando um arco de serra, e o comprimento de cada uma delas foi definido de acordo com a necessidade de cada corpo de prova.

Essa abordagem de montagem dos corpos de prova proporcionou uma análise abrangente das ligações parafusadas em WPC. Os resultados obtidos contribuirão para uma compreensão mais completa do comportamento dessas ligações e fornecerão informações relevantes para aplicações futuras.

Os cinco corpos de prova (CP's) podem ser vistos das figuras a seguir:

Figura 14: Corpo de prova 1



Fonte: Autoria própria. (2023)

Figura 15: Corpo e prova 2



Fonte: Autoria própria. (2023)

Figura 16:Corpo de prova 3



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 17: Corpo de prova 4



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 18: Corpo e prova 5



Fonte: Autoria Própria (2023)

4.4 MÉTODOS

4.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi feito com a máquina universal de ensaios (EMIC) modelo DL30000 do laboratório de engenharia mecânica no bloco C da Universidade tecnológica Federal do Paraná – campus de Guarapuava, ela que possui capacidade de 300kN, aplica uma carga com uma velocidade constante de 5mm/minuto, como definidas pelo manual de ensaio da (EMIC), com a amostra, onde a carga pode ser relacionada com a área da secção transversal da amostra. Podendo ser obtido posteriormente os valores para a resistência à compressão do material foi ensaiado. Um exemplo da máquina em questão pode ser visto a seguir:

Figura 19: Modelo da máquina universal de ensaios (EMIC DL30000)



Fonte: Autoria própria (2023)

Os corpos de prova foram preparados de acordo com as dimensões e especificações necessárias para o ensaio de compressão, isso de acordo com as medidas possíveis.

As ligações por barra roscada foram instaladas nos corpos de prova de WPC, garantindo uma fixação segura.

Para fixação dos corpos de prova na EMIC foi utilizado um chapa de aço, para alinhar as peças laterais, já que o corpo de prova era maior que o prato original da EMIC.

É importante garantir que as ligações por barra roscada estejam alinhadas corretamente e firmemente conectadas ao WPC.

4.5 PRODECIMENTO PARA COLETA DE DADOS

A máquina de ensaio universal é ajustada para o modo de compressão.

Os dispositivos de fixação são configurados para segurar firmemente o corpo de prova e as ligações por barra roscada durante o ensaio.

Os parâmetros do ensaio, como a taxa de carregamento (velocidade de aplicação da carga) e a faixa de carga, são definidos de acordo com as normas técnicas aplicáveis ou os requisitos específicos do estudo, que foram em velocidade constante de 5mm/minuto até a deformação do corpo de prova atingir 30mm de deformação ou romper.

O controle da velocidade de aplicação da carga foi a uma taxa constante durante todo o ensaio. Durante o ensaio, a máquina de ensaio registra a força aplicada e o deslocamento correspondente. Os dados registrados foram utilizados para gerar um gráfico de carga versus deslocamento.

Os resultados do ensaio podem incluir a carga máxima suportada pelas ligações por barra roscada, a força de compressão, a deformação do corpo de prova.

4.6 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

Por meio da máquina universal de ensaios EMIC, foi utilizado uma força constante com deslocamento de 5mm por minuto até que se atingisse o deslocamento de 30mm. Isso se deu pelas dimensões dos corpos de prova e para uma maior precisão do equipamento, sendo possível tirar informações como força máxima, tensão máxima e deformação. Assim sendo possível avaliar a capacidade de resistir a deformação.

5 RESULTADOS

Após a execução dos ensaios de compressão em cada corpo de prova foi apresentado os resultados encontrados no material.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Alguns dados, foram disponibilizados na tabela 2, como dimensões de cada parte do corpo de prova:

Tabela 2: Detalhamento dos corpos de prova

Detalhamento dos corpos de prova					
nº CP	1	2	3	4	5
Peça Central(cm)	9	9	9	9	9
Peça Lateral 1(cm)	3	3	3	3	3
Peça Lateral 2(cm)	3	3	3	3	3
Largura(cm)	15	15	15	15	15
Pino(diâmetro/mm)	16	16	16	16	16
nº de barras	2	2	2	2	2
Altura de cada peça(cm)	12	12	12	12	12

Fonte: Autoria própria. (2023)

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão na tabela 3. Como força, tensão, deformação, desvio padrão, média e coeficiente de variação. Assim como os gráficos para cada corpo de prova de força por deformação.

Tabela 3: Resultados de Rigidez das ligações dos corpos de prova de madeira plástica

nº CP	Teórico		Experimental			Teórico/Experimental	
	Força NBR 7190-Ft1 (kN)	Força EUROCODE5-Ft2 (kN)	Força - F _{exp} (kN)	Tensão (MPa)	Deformação(mm)	Ft1/F _{exp}	Ft2/F _{exp}
1			33,0	3	20	1,75	1,75
2			39,0	4	30	1,48	1,48
3	57,6	57,6	42,0	4	30	1,37	1,37
4			41,0	4	30	1,40	1,40
5			41,0	4	30	1,40	1,40
Média	-	-	39,2	3,8	28,0	1,5	1,5
Desv. Padrão	-	-	3,6	0,4	4,5	0,2	0,2
Coef. Var.(%)	-	-	9,3%	11,8%	16,0%	10,3%	10,3%

Fonte: Autoria própria. (2023)

Com base nos dados obtidas nos ensaios, durante a análise da resistência da madeira em relação à flexão do pino, é possível concluir que os valores encontrados tanto pela NBR7190 quanto pela EUROCODE5 foram superiores aos valores observados no ensaio experimental, em comparação da madeira plástica com Eucalipto.

Apenas o CP1 apresentou valores mais abaixo das normas brasileira e europeia, enquanto os demais corpos de prova tiveram uma maior aproximação dos resultados encontrados nos ensaios experimentais

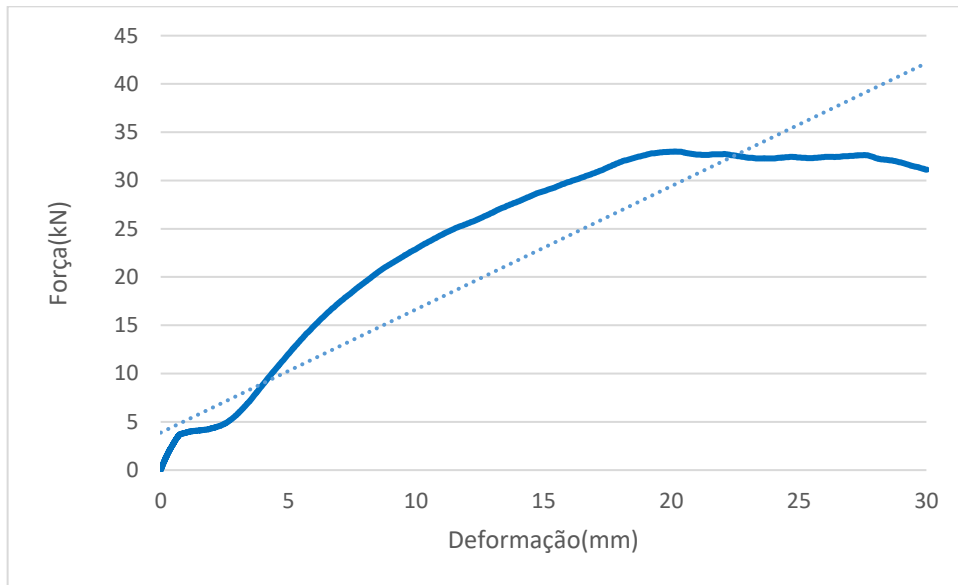
Tabela 4: Resumo do Ensaio das ligações em Eucalipto

nº CP	Força(N)	Força(kN)	Diâmetro médio do CP (cm)
1	28847,65	28,84	8,97
2	15093,08	15,09	9,22
3	35590,09	35,59	9,1
4	41473,49	41,47	8,93
5	13554,80	13,55	10,47
6	19148,53	19,14	10,8
7	33662,25	33,66	10,30
8	43940,73	43,94	12,70
9	41183,82	41,18	13,23

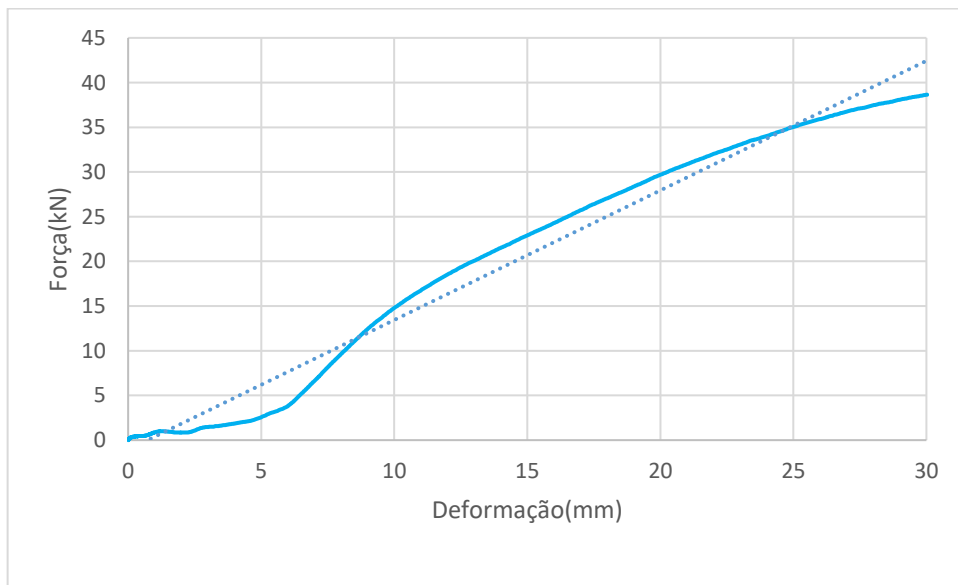
Fonte: Adaptado SHINOHARA; Pedro Henrique. (2020)

Ao comparar os resultados dos ensaios entre Eucalipto e madeira plástica com barra roscada, observou-se que a madeira plástica obteve um desempenho superior em relação ao Eucalipto. Apenas o CP8 de Eucalipto obteve um valor ligeiramente acima do melhor resultado de madeira plástica no CP3.

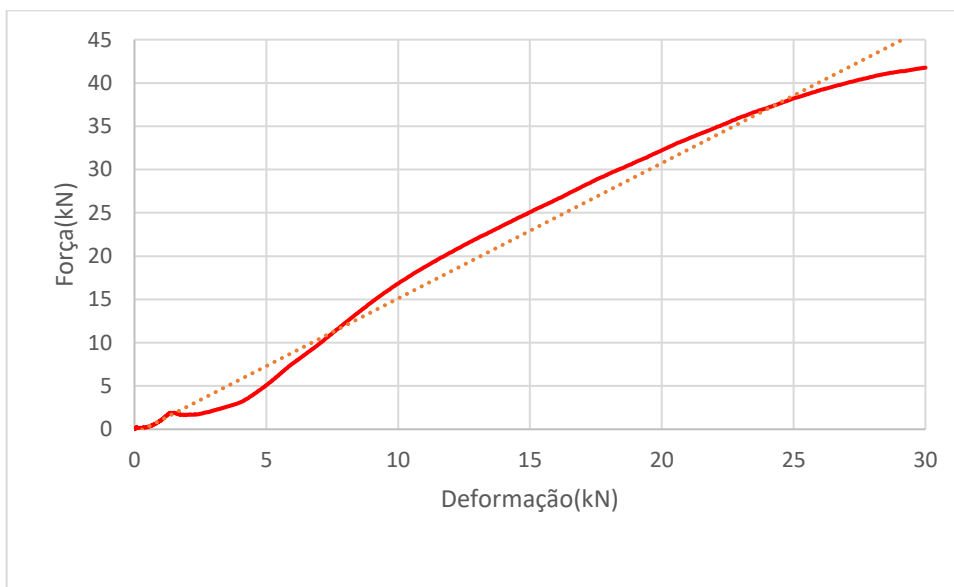
Os gráficos feitos a partir dos dados obtidos na tabela 3 podem ser vistos nos gráficos 1,2,3,4 e 5.

Gráfico 1: Força x Deformação CP1

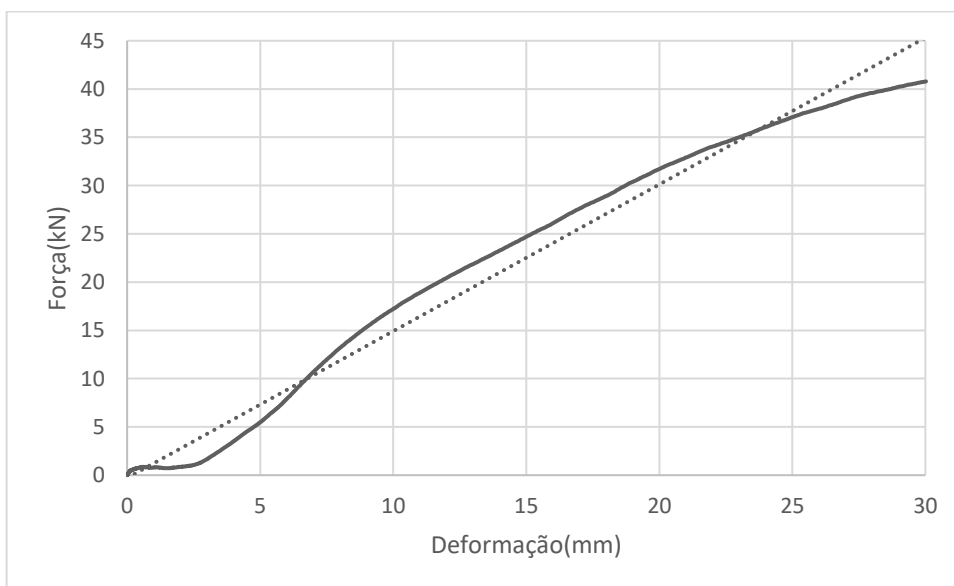
Fonte: Autoria própria. (2023)

Gráfico 2: Força x Deformação CP2

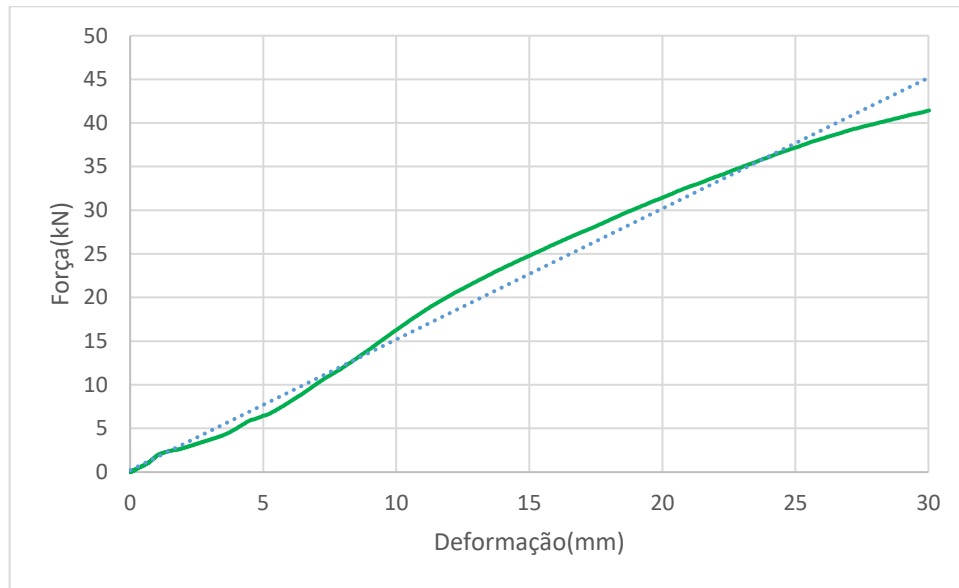
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 3: Força x Deformação CP3

Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 4: Força x Deformação CP4

Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 5: Força x Deformação CP5

Fonte: Autoria própria (2023)

Todos eles se mostraram muito uniformes com execução ao CP1, que será detalhado mais à frente o motivo de sua curva que sai do padrão dos outros quatro CP's. É possível verificar na tabela 3, que com exceção ao CP1 todos resistiram a deformação máxima imposta de 30mm, enquanto o CP1 suportou 20mm de deformação, com coeficiente de variação de 9,29%, com força média de 39kN. Onde CP3, CP4 e CP5 apresentaram força máxima acima dos 40kN como pode ser visto dos gráficos 3,4 e 5. Já o CP2 alcançou força máxima de 38kN, já CP1 como citado anteriormente ficou abaixo com 33kN, sendo que ele não suportou toda a deformação de 30mm e como veio a romper e compreensivo sua força máxima ficar mais baixa que os demais.

5.3 CORPOS DE PROVA APÓS OS ENSAIOS

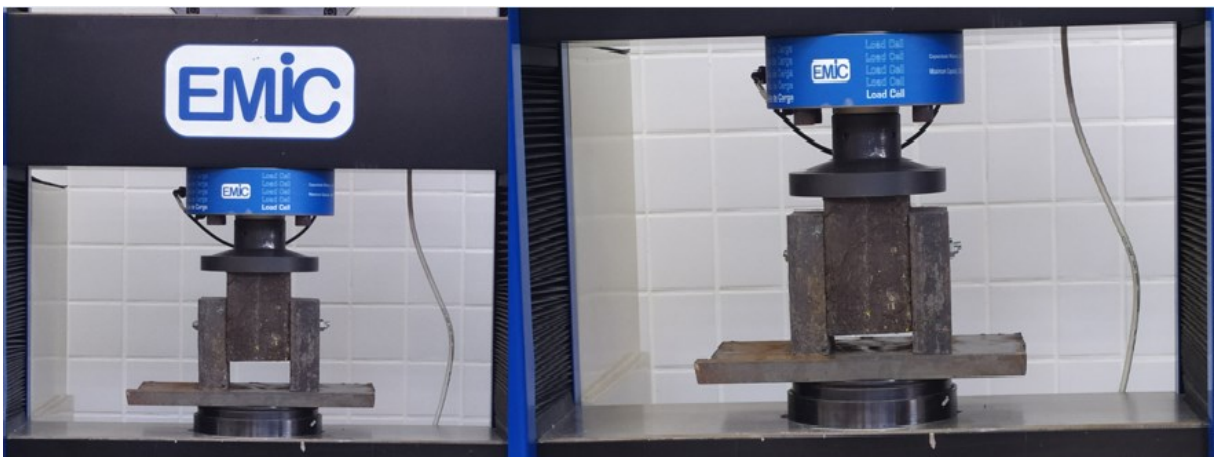
Após a conclusão dos ensaios, os corpos de prova foram avaliados quanto às características e danos decorrentes das cargas aplicadas durante os ensaios. Essa etapa é importante para observar o comportamento do material e das ligações

parafusadas após a aplicação das cargas, bem como identificar possíveis falhas ou danos que tenham ocorrido.

A análise dos corpos de prova após os ensaios permite avaliar a resistência, a deformação e a capacidade de suporte das ligações parafusadas em WPC. Também fornece informações valiosas sobre a integridade do material e a eficácia das ligações em suportar as cargas impostas.

Os corpos de prova foram inspecionados visualmente e puderam ser registrar os danos sofridos por ele. Foram observados danos causados tanto no material plástico quanto na barra roscada. Podem ser vistos como ficaram os corpos de prova durante, após os ensaios e depois de abertos para uma melhor visualização, nas figuras a seguir:

Figura 20: Corpo de prova1 antes e depois do ensaio.



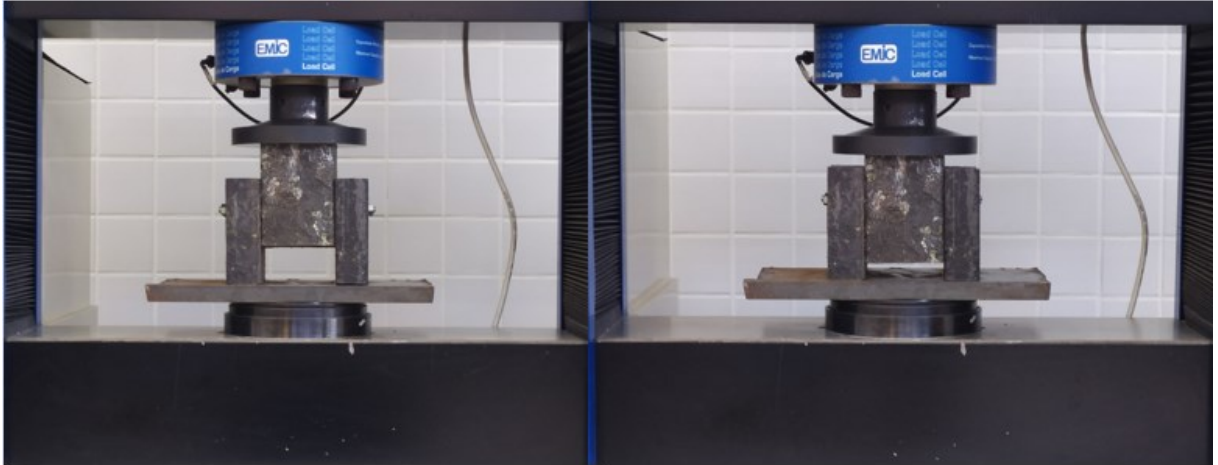
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 21: CP1, após abertura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 22: Corpo de prova 2 antes e depois do ensaio.



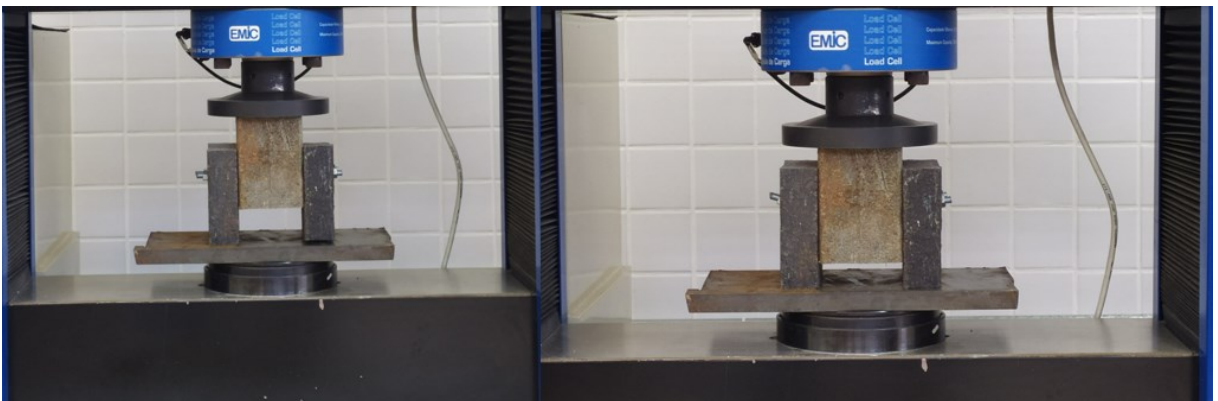
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 23: CP2 após a abertura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24: Corpo de prova 3 antes e depois do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 25: CP 3 após a abertura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 26: Corpo de prova 4 antes e depois do ensaio.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 27: CP4 após a abertura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 28: Corpo de prova 5 antes e depois do ensaio



Fonte: Autoria própria. (2023)

Figura 29: CP5 após a abertura



Fonte: Autoria própria (2023)

Com base na análise da Figura 2, foi observado que o efeito de embutimento ocorreu nos corpos de prova ensaiados. A carga aplicada durante o ensaio foi suficiente para causar esse efeito, sem a ocorrência de outras falhas evidentes. No entanto, no caso específico do CP1, foi possível observar, de acordo com a Figura 36, a presença de rachaduras, indicando uma falha durante o ensaio.

O resultado obtido foi observado que a carga aplicada nos corpos de prova foi significativa o bastante para gerar o efeito de embutimento.

5.4 BARRA ROSCADA APÓS O ENSAIO

Após a realização dos ensaios, as barras roscadas utilizadas nas ligações foram inspecionadas para avaliar possíveis danos ou deformações resultantes das cargas aplicadas durante o ensaio de compressão em WPC.

Durante a inspeção das barras roscadas, foram observados detalhes como a integridade da rosca, a presença de trincas, a deformação plástica ou qualquer outro sinal de falha estrutural. Para uma melhor visualização das barras seguem as figuras 30,31,32,33 e 34:

Figura 30: Barra roscada CP1 após ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 31: Barra roscada CP2 após ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 32: Barra roscada CP3 após ensaio



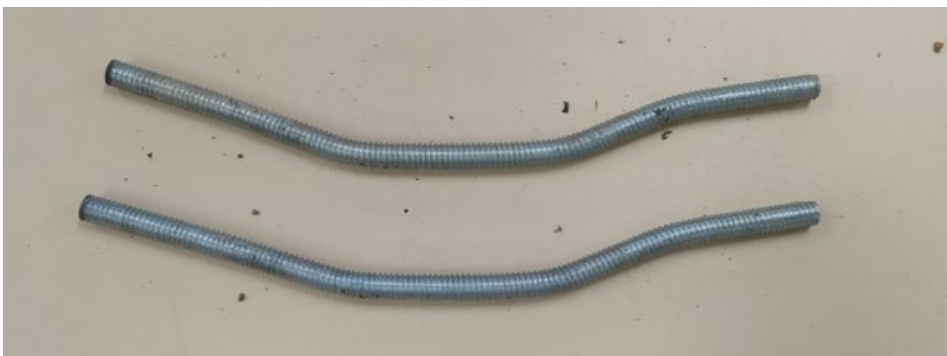
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 33: Barra roscada CP4 após ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 34: Barra roscada CP5 após ensaio



Fonte: Autoria própria (2023)

Durante a análise das barras roscadas utilizadas no ensaio, constatou-se que (β) era maior que (β_{lim}) , o que resultou na flexão do pino, conforme pode ser observado nas figuras 31, 32, 33, 34 e 35

Além disso, por meio da Equação 4. Além disso, a determinação da resistência do parafuso é fundamental para avaliar sua capacidade de suportar as cargas aplicadas nas ligações parafusadas em WPC.

5.5 DISCUSÃO DO ENSAIO NO CP1

Como dito anteriormente no item 5.2, o CP1 apresentou falha no material assim como como visto no gráfico 2, ele suportou uma deformação de apenas 20mm enquanto os outros suportaram a deformação total de 30mm. Foram observadas falhas no material, mais especificamente uma trinca ou fissura. Essa ocorrência indica uma limitação na resistência do WPC

A presença de uma trinca ou fissura pode ser um sinal de concentração de tensões, incompatibilidade de deformação entre os materiais envolvidos na ligação ou até mesmo falha no processo de fabricação do WPC

A análise e discussão dessa falha específica no CP1 são importantes para compreender as possíveis causas e propor soluções para evitar a ocorrência de falhas semelhantes no futuro. Podem ser observadas falhas nas figuras 36:

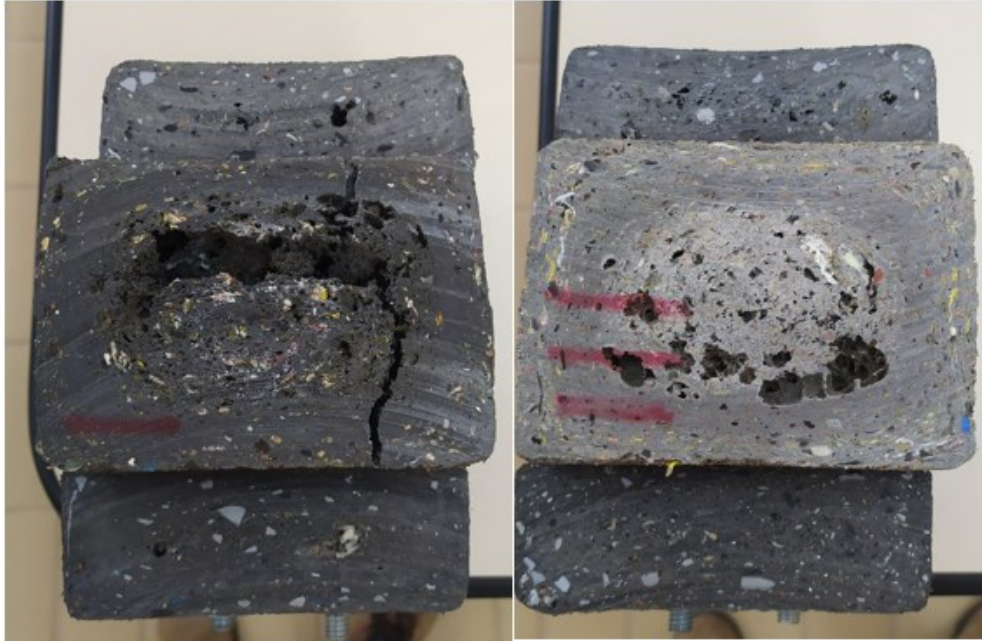
Figura 35: Falha apresentada no CP1.



Fonte: Autoria própria (2023)

Após essa observação, com a utilização de uma serra fita para cortar o corpo de prova e comparar com CP3 que foi o que obteve um melhor desempenho, poderá ser visto nas figuras 36, 37 e 38 essas comparações:

Figura 36: Vista superior de comparação CP1 e CP3



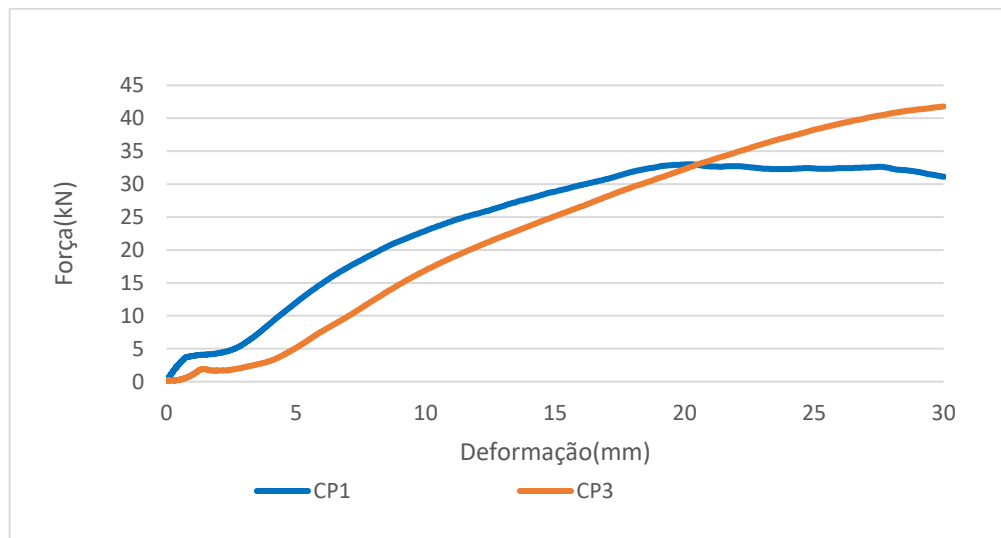
Fonte: Autoria própria. (2023)

Figura 37: Comparação do CP3 com CP1 após corte.



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 6: Comparativo entre CP1 e CP3



Fonte: Autoria própria. (2023)

Pode ser observado uma maior porosidade no CP1 em relação ao CP2 isso pode ser uma das causas da ocorrência da trinca ou fissura observada. A porosidade excessiva pode enfraquecer o material, sua resistência e comprometer sua capacidade de suportar cargas.

A porosidade pode ser resultado de diversos fatores, como problemas no processo de fabricação do WPC, controle inadequado de temperatura e pressão durante a moldagem do material, presença de impurezas. Esses fatores podem levar à formação de espaços vazios dentro da estrutura do material, tornando-o mais frágil e suscetível a falhas.

A porosidade interna do material pode ter afetado a integridade da ligação parafusada, uma vez que a força transmitida pelo parafuso pode encontrar áreas de menor resistência no material, transitou em concentração de tensão e, eventualmente, não evoluiu de trincas ou fissuras.

6 CONCLUSOES

O material plástico reciclado utilizado, mostrou ser uma opção viável e aplicações que requerem ligações parafusadas. Sua resistência mecânica e durabilidade atenderam às expectativas, uma vez que apenas um dos corpos de prova rompeu, tornando-o uma alternativa sustentável aos materiais convencionais. Já que sua maior utilização se dá por construção decks, pergolados, pisos e elementos não estruturais.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se verificar que o material plástico reciclado, apresenta uma resistência igual ou superior em comparação ao eucalipto com uma mesma ligação por barra roscada como pode ser visto na tabela 4. Uma madeira que é comumente utilizada para fins construtivos

A análise dos corpos de prova após os ensaios revelou que a maioria das ligações por barras roscadas em WPC apresentou boa integridade estrutural. Isso pode mostrar que as ligações foram capazes de suportar adequadamente as cargas aplicadas durante os ensaios.

No entanto, em um dos corpos de prova (CP1), foi observada a ocorrência de uma trinca ou fissura no material. Essa falha pode estar relacionada a uma porosidade

excessiva do material. Essa ocorrência destaca a importância de um controle rigoroso do processo de fabricação do WPC para garantir a qualidade e a resistência do material.

Os resultados obtidos neste estudo fornecem informações que demonstram uma boa resistência do WPC com relação as ligações por barra roscada. Sendo também necessário mais estudos com outros tipos de ligações, além da barra roscada.

6.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

É recomendado que futuros estudos sejam realizados para explorar outras configurações de ligação, tamanhos de parafusos e diferentes tipos de materiais plásticos reciclados. Isso permitirá uma compreensão mais abrangente das características e limitações das ligações parafusadas em WPC e contribuirá para o avanço do conhecimento nessa área.

Assim como um material ainda sem tanto estudo no Brasil, é possível também estudos para melhorar a composição do material. Investigar diferentes combinações de materiais plásticos e de madeira para obter propriedades específicas desejadas,

Avaliação da sustentabilidade do WPC, o impacto ambiental do WPC em comparação com outros materiais tradicionais, considerando sua composição, processamento, vida útil e descarte.

Explorar novas áreas de aplicação para o WPC, como móveis, indústria automotiva, embalagens, entre outros.

7 REFERENCIAS

ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira. São Paulo, 1987, 174p.**
Dissertação(mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1987.

BRIGANTE, D. **New Composite Materials - Selection, Design, and Application.**
Springer, Nápoles, 2014.

CARROLL, Douglas R. et al. **Structural properties of recycled plastic/sawdust
lumber decking planks.** Resources, conservation and recycling, v. 31, n. 3, p. 241-
251, 2001.

CLEMONS, Craig. **Wood-plastic composites in the United States: The
interfacing of two industries.** Forest products journal, v. 52, n. 6, p. 10, 2002.

GARDNER, Douglas J.; HAN, Yousoo; WANG, Lu. **Wood-plastic composite
technology.** Current Forestry Reports, v. 1, p. 139-150, 2015.

HILSON, B. O. **Nailed joints II. Timber Engineering. STEP 1.** C5/1-C5/6, 1995.

JOHANSEN, Knut W. **Theory of timber connections.** Int Assoc Bridge Struct
Eng, v. 9, p. 249-262, 1949.

JUNIOR, Carlito Calil; LAHR, Francisco Antonio Rocco; DIAS, Antonio Alves.
Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Editora Manole, 2003.

FALK, Robert H. et al. Performance of fasteners in wood flour-thermoplastic
composite panels. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 1, p. 55-61, 2001.

KIELING, A.; PEREIRA, S.; DOS SANTOS, Maria Cristina. **Compósitos de madeira
plástica: considerações gerais.** Scientia Amazonia, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

KLYOSOV, Anatole A. **Wood-plastic composites.** John Wiley & Sons, 2007.

LEUTNER, Aline Marques. **Resistência de ligações com parafuso passante com
porca e arruela em madeira. 2013.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

MAIA, Bruna Bernardi. **Resistência de ligações pregadas em madeira. 2016.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PARENTE, Ricardo Alves. **Elementos estruturais de plástico reciclado.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PFEIL, Walter. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americana NDS e européia EUROCODE 5 /** Walter Pfeil, Michèle Pfeil. - 6.ed., rev. e ampl. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2017.

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy. **Design of built-up columns. Structural timber design to Eurocode**, v. 5, p. 308-311, 2007.

SCHWARZKOPF, Matthew John; BURNARD, Michael David. **Wood-plastic composites—Performance and environmental impacts. Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts**, p. 19-43, 2016.

SILVA JUNIOR, Josué da. **Avaliação experimental da resistência de ligações em corte duplo em madeira com parafusos passantes. 2017.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TEIXEIRA, Divino Eterno; MOREIRA, José Mauro MAP; COSTA, Alexandre Florian da. **Confecção de composto de madeira-plástico utilizando resíduos de Eucalyptus grandis Hill Ex Maiden e polietileno de baixa densidade (PEBD).** Floresta e Ambiente, v. 9, n. único, p. 72-80, 2012.

TOMAZ, Daniel Ferreira. **Fenômenos de segunda ordem em ligações parafusadas em madeira. 2016.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

UTRI, Adam Cebulski. **Estudo de propriedades físico-mecânicas de composto plástico reciclado. 2021.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

WIT, Wijnand et al. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização**. Gland: WWF, 2019.

PIATTI, Tania Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. **Maceió: Edufal**, p. 51, 2005.