

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JEAN MICHEL CARNEIRO

LUIZ EDUARDO CZAICA

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE PLACAS DE GESSO REFORÇADAS
COM FIBRA DE PET RECICLADO**

GUARAPUAVA

2023

JEAN MICHEL CARNEIRO

LUIZ EDUARDO CZAICA

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE PLACAS DE GESSO REFORÇADAS
COM FIBRA DE PET RECICLADO**

Flexural behavior of gypsum boards reinforced with recycled pet fiber

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Carla Dantas da Silva

Coorientador: Luan José Franchinni

GUARAPUAVA

2023



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JEAN MICHEL CARNEIRO

LUIZ EDUARDO CZAIIKA

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE PLACAS DE GESSO REFORÇADAS
COM FIBRA DE PET RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Tecnólogo em Manutenção Industrial da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 4 de dezembro de 2023

Carla Dantas da Silva

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Denise Alves Ramalho

Doutora em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Bernardo Gouveia Pereira

Doutor em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

Agradecimentos: Jean

Primeiramente à Deus por minha vida, família e amigos. Sou grato a minha esposa Janaine que nunca me recusou amor, apoio e incentivo. Agradeço a todos, Pai e Mãe, minha filha Izadora e amigos que com seus incentivos me fizeram chegar à conclusão do meu curso.

A Profa. Dra. Carla Dantas da Silva, pela orientação acadêmica, apoio e confiança. Agradeço aos professores que me acompanharam ao longo do curso e que, com desempenho, se dedicam à arte de ensinar.

Agradecimentos: Luiz Eduardo

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento à minha esposa Eliane, aos filhos maravilhosos Mayara, Luiz Gustavo e Eveline, aos meus professores do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial. Sem o apoio de minha esposa eu não teria conseguido conciliar os estudos e as outras responsabilidades. Sem o incentivo dos filhos teria sido impossível a dedicação aos estudos. Sem o empenho dos professores em transmitir o conhecimento, seria impossível alcançar a conclusão deste curso, logo esta conquista não é apenas minha, é fruto do apoio, amor, confiança e dedicação de todos que me acompanharam nessa jornada.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Carla Dantas da Silva pelas orientações preciosas e pelo estímulo constante ao desenvolvimento deste projeto.

Aos meus colegas pelos estudos compartilhados.

A toda a diretoria e coordenação do curso de TMI.

“A nossa fé lembra-nos constantemente de observarmos e agradecermos a beleza do mundo e do universo que nos envolve, e nossa responsabilidade e obrigação, como bons administradores da criação de Deus, de deixar o mundo em melhores condições do que as que encontramos”.

Mawlana Hazar Imam. Ottawa, 2013.

RESUMO

Este estudo aborda a reciclagem de PET e sua aplicação potencial na indústria da construção civil. A pesquisa foi motivada pela necessidade de encontrar soluções sustentáveis para o uso desse material, que enfrenta desafios logísticos significativos em termos de reciclagem. O objetivo foi investigar o comportamento à flexão de placas de gesso reforçadas com fibra de PET reciclado. Para isso, foram produzidos corpos de prova com diferentes proporções de gesso e fibra de PET reciclado, e realizados testes de flexão para avaliar o comportamento das misturas. Os resultados indicam que a adição de fibra de PET reciclado pode melhorar a resistência à flexão das placas de gesso, sugerindo um potencial uso deste material na construção civil. Este estudo contribui para a economia circular, promovendo a reciclagem de PET e a construção de habitações acessíveis para comunidades de baixa renda. A pesquisa abre caminho para estudos futuros sobre a aplicação de PET reciclado na indústria da construção e seu impacto na economia circular.

Palavras-chave: PET reciclado; gesso; construção civil; economia circular; resistência à flexão.

ABSTRACT

This study addresses PET recycling and its potential application in the construction industry. The research was motivated by the need to find sustainable solutions for the use of PET, a material that faces significant logistical challenges in terms of recycling. The aim of the study was to investigate the flexural behavior of gypsum boards reinforced with recycled PET fiber. To this end, test specimens were produced with different proportions of gypsum and recycled PET fiber, and flexural tests were carried out to evaluate the behavior of the mixtures. The results indicate that the addition of recycled PET fiber can improve the flexural strength of gypsum boards, suggesting a potential use of this material in construction. This study contributes to the circular economy, promoting the recycling of PET and the construction of affordable housing for low-income communities. The research paves the way for future studies on the application of recycled PET in the construction industry and its impact on the circular economy.

Keywords: recycled PET; gypsum; construction; circular economy; flexural strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 - Gesso aplicado em quadros de distribuição	14
Fotografia 2 - Gesso aplicado em banheiro	15
Fotografia 3 - Gesso em Cozinha Americana	15
Fotografia 4 - Logomarca POLIPRO®	19
Fotografia 5 - (a, b, c, d, e, f) processo de recuperação do PET	21
Fotografia 6 – Molde	22
Fotografia 7 – Gesso	22
Fotografia 8 - Máquina de ensaio universal	24
Fotografia 9 - Pesagem 1	25
Fotografia 10 - Pesagem 2	25
Fotografia 11 - Pesagem 3	25
Fotografia 12 - Fibra no molde	25
Fotografia 13 - Gesso inserido no molde com fibra	26
Fotografia 14 - Cortando corpo de prova no comprimento de 160mm	26
Fotografia 15 - Início do ensaio de flexão	27
Fotografia 16 - Teste de flexão	28
Fotografia 17 - Teste de flexão	28
Fotografia 18 – Corpo de prova ensaiado com uma ampliação de 20x	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACPG	Associação dos Catadores de Papel de Guarapuava
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Vf	Volume de fibra
mf	massa da fibra
ρ_f	densidade da fibra
Vtot	Volume total
PET	Polietileno Tereftalato
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
EN	European Norm
PVC	Policloreto de Vinila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 Justificativa.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Gesso na Construção Civil.....	14
2.2 Fibra de PET reciclado.....	15
2.2.1 PET.....	16
2.2.2 Fibra de PET.....	16
2.3 Compósito de gesso e fibra de PET.....	16
2.4 PET cores e formas.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 Moldes.....	21
3.2 Gesso em pó.....	22
3.3 Preparação do gesso.....	22
3.4 Preparação da matriz de corpos de prova.....	23
3.5 Máquina de Ensaio Universal.....	23
3.6. Moldagem dos corpos de prova.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Teste de Flexão.....	30
5 CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O avanço da civilização tem gerado uma crescente demanda por recursos naturais, resultando na degradação desses recursos, geração de resíduos e consumo de energia e insumos não renováveis. Diante disso, torna-se necessário buscar soluções alternativas na construção civil, utilizando materiais e componentes que reduzam a geração de resíduos e privilegiem o uso de produtos recicláveis, causando menor impacto no meio ambiente ao longo do ciclo de vida desses materiais (CUNHA, 2012).

Dentre as opções de fibras disponíveis, as fibras de PET reciclado podem ser uma alternativa interessante no campo dos materiais fibrosos. Essas fibras, provenientes da reciclagem de garrafas PET, apresentam diversas vantagens em relação a outras. Uma das principais, é o fato de serem produzidas a partir de material reciclado, o que contribui para a redução de resíduos no meio ambiente e possui baixo custo de produção, tornando-as uma escolha sustentável.

As transformações no meio ambiente muitas vezes têm repercussões negativas, associadas à falta de informações sobre a importância do meio ambiente para uma vida saudável (VIDAL, SOBRAL, 2006). É crucial ressaltar a importância da coleta seletiva do PET e sua reciclagem para evitar a contaminação do meio ambiente por esse material poluente. Segundo a Pesquisa FAPESP (2019), o PET é considerado não biodegradável, o que significa que não se decompõe na natureza em condições ambientais normais. As fibras utilizadas neste projeto foram obtidas de garrafas PET adquiridas na Associação de Catadores de Recicláveis de Guarapuava.

No contexto da construção civil, o gesso desempenha um papel importante na confecção de paredes e forros, devido ao seu baixo custo e plasticidade em comparação com o cimento Portland. Sua fabricação consome menos energia e é menos agressiva ao meio ambiente. Sua desidratação ocorre em temperaturas mais baixas, enquanto a produção de cimento libera grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera (CUNHA, 2012).

Dado o potencial promissor, o uso de fibras de PET reciclado como alternativa às fibras naturais pode trazer diversos benefícios para a construção civil. A possibilidade de reduzir a geração de resíduos e o impacto no meio ambiente, aliada ao baixo custo de produção e às propriedades que podem contribuir para o melhor desempenho do material composto, como o gesso, torna essa linha de pesquisa particularmente atraente. Portanto, é de grande relevância incentivar a pesquisa e o desenvolvimento dessas tecnologias, com o objetivo de promover uma

construção mais sustentável e consciente. Este trabalho se propõe a explorar essas possibilidades e contribuir para esse campo de estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Fazer um estudo comparativo do compósito com o intuito de viabilizar seu uso na indústria da Construção Civil.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar os corpos de prova de gesso e fibras de PET nas proporções 0%, 2%, 3% e 4% de acordo com a EN 13279-2 (Europe Standards, 2006);
- analisar o comportamento mecânico dos corpos de prova em relação ao Ensaio de flexão, utilizando a EN 13279-2 (Europe Standards, 2006);
- comparar as alterações nas propriedades físico-mecânicas do gesso antes e após a incorporação da fibra de PET;
- analisar o tempo de manutenção da tensão de flexão (até 80% da tensão máxima de flexão), para todas as proporções de PET incorporadas;
- incentivar a utilização de fibra de PET reciclado na indústria da construção civil.

1.2 Justificativa

A sustentabilidade e a responsabilidade ambiental são questões cada vez mais urgentes na sociedade atual, e a Construção Civil não é exceção. O uso de materiais recicláveis, como o PET, é uma estratégia que se alinha a essas preocupações. No entanto, a reciclagem do PET apresenta desafios, especialmente devido à complexidade e ao custo da logística necessária para classificar, armazenar e transportar objetos de diferentes cores e formas feitos com esse material.

Além disso, a literatura sobre o assunto ainda é limitada, em parte porque o uso do PET em algumas linhas de produção é recente. Isso reforça a importância de pesquisas que busquem soluções inovadoras para facilitar a reciclagem do PET e promover seu uso na Construção Civil.

Um problema específico é o destino de embalagens e objetos de PET de cores como vermelho, amarelo, âmbar, branco fosco e preto, que são difíceis de reciclar. Atualmente, esses materiais muitas vezes acabam em aterros sanitários, o que é uma solução insatisfatória. Acreditamos que esses materiais podem ter um uso mais sustentável e valioso. Reciclar esses resíduos não só reduziria seu impacto ambiental, mas também contribuiria para a economia circular e ajudaria a construir moradias acessíveis para comunidades de baixa renda.

Portanto, este trabalho é motivado pela necessidade de repensar a forma como lidamos com as embalagens e objetos de PET. Nosso objetivo é explorar maneiras eficazes de tornar o processo de reciclagem do PET mais viável, transformando-o em uma matéria-prima valiosa para a construção de moradias acessíveis. Esperamos que essa abordagem integrada e sustentável nos ajude a combater a poluição, reduzir a pressão sobre os recursos naturais e promover um desenvolvimento mais consciente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse tópico iremos fazer uma breve descrição dos conceitos dos temas que irão ser estudados.

2.1 Gesso na Construção Civil

A gipsita, matéria-prima para fabricação do gesso, é um sulfato de cálcio di-hidratado cuja fórmula química é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, geralmente ocorrendo associada a anidrita, sulfato de cálcio anidro (CaSO_4), que é um mineral sem maior expressão econômica (CUNHA, 2012, p. 24).

O uso do gesso na construção civil vem aumentando, principalmente devido à melhoria da qualidade dos hidrofugantes desenvolvidos atualmente, hidrofugantes são aditivos impermeabilizantes, os quais prolongam em décadas a vida útil do gesso. Nesta área, o gesso é empregado de duas maneiras diferentes, para fundição e para revestimento. O gesso para revestimento é o material empregado em revestimentos de forros e paredes, sendo aplicado em ambientes secos e internos. O gesso para fundição é utilizado na fabricação de pré-moldados, peças de decoração e placas para forros, sendo um elemento para vedação aplicado em blocos e chapas. Este último é o foco do trabalho aqui proposto. A seguir temos na Fotografia 1 uma imagem que ilustra o gesso aplicado em quadros de distribuição energia elétrica, podemos perceber perfeitamente a facilidade da manutenção.

Fotografia 1 - Gesso aplicado em quadros de distribuição



Fonte: Autoria própria (2023)

Nas Fotografias 2 e 3 podemos observar a tubulação do chuveiro embutida no gesso tratado atrás do material cerâmico, como também podemos observar que não existe preocupação em queda ou desmoronamento por degradação em função da umidade pois o gesso é tratado com hidrofugante.

Fotografia 2 - Gesso aplicado em banheiro



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 3 - Gesso em Cozinha Americana



Fonte: Autoria própria (2023)

2.2 Fibra de PET reciclado

2.2.1 PET

Polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular (MANRICH, 2005). O PET (polietileno tereftalato) é um

polímero termoplástico amplamente utilizado na fabricação de garrafas de plástico, embalagens e outros produtos. A produção do PET envolve várias etapas: extração e processamento do petróleo, refino, produção do etileno, produção do ácido tereftálico e polimerização. O etileno e o ácido tereftálico são combinados em uma reação de poli-condensação. Para chegar ao produto final, o PET passa pelo processo de moldagem, resfriamento e acabamento.

2.2.2 Fibra de PET

Incluído na categoria de fibras sintéticas é a fibra sintética de maior consumo no setor têxtil, representando pouco mais de 50% da demanda total de fibras químicas (SILVA, 2003). O fio de poliéster, teve suas origens no início do século XX, por volta dos anos 1930. No entanto, sua produção em grande escala e popularização ocorreram principalmente na década de 1950, o PET foi patenteado como material plástico pela DuPont em 1941. No entanto, as primeiras embalagens feitas de PET surgiram mais tarde, durante os anos 1970.

Inicialmente, o PET foi utilizado para embalagens de bebidas gaseificadas. Sua popularidade aumentou devido às suas propriedades, como transparência, leveza, resistência e capacidade de reter o gás carbonatado, tornando-se uma escolha comum na indústria de embalagens de bebidas. Ao longo dos anos, o PET expandiu seu uso para uma variedade de outros produtos, utilidades domésticas, televisores e máquinas de lavar, sua reciclagem não acompanha sua produção.

2.3 Compósito de gesso e fibra de PET

Estudos têm investigado a utilização de fibras para reforçar placas de gesso, visando melhorar seu desempenho mecânico na construção civil. Pesquisas realizadas por Oliveira (2020), Magalhães (2009) e Cunha (2012) oferecem uma análise aprofundada do comportamento à flexão de placas de gesso reforçadas com diferentes tipos de fibras. Esses estudos evidenciam que a adição de fibras, como polímero, vidro, celulose ou coco, pode substancialmente melhorar a resistência à flexão das placas de gesso.

A incorporação de fibras promove um aumento na capacidade estrutural das placas, permitindo que suportem cargas aplicadas. Foi observado que o teor de fibras desempenha um papel crucial na resistência à flexão das placas de gesso reforçadas, além de aprimorar a resistência à flexão, essa substituição contribui para a redução do consumo de recursos naturais, fomentando a sustentabilidade ambiental. É importante destacar que, no caso das fibras de PET reciclado utilizadas na fabricação de placas de gesso, não é necessário o processo de descontaminação para remover cola de rótulos e outros tipos de plásticos.

Em resumo, a adição de fibras de PET reciclado pode melhorar a resistência à flexão das placas de gesso, com um composto de fácil fabricação e sem necessidade de descontaminação criteriosa.

2.4 PET cores e formas

A reciclagem de PET vai além das garrafas e deve incluir também embalagens de cores menos comuns e outros objetos feitos com esse material. No entanto, é importante ressaltar que as fibras produzidas a partir desses materiais têm um baixo custo de aquisição devido à baixíssima demanda de reciclagem dessas cores específicas. É necessário desenvolver estratégias e investir em infraestrutura para aumentar a reciclagem e promover uma gestão mais eficiente dos resíduos de PET em todas as suas formas. Entre as cores menos recicladas de PET, o vermelho é uma delas. Muitas embalagens de ketchup e condimentos usam a cor vermelha como identificação de marca. No entanto, essa cor representa um desafio logístico para a reciclagem, pois a separação eficiente do PET vermelho durante o processo é complexa.

É necessário desenvolver métodos avançados de triagem e separação para viabilizar a reciclagem desse tipo de embalagem. Da mesma forma, o PET amarelo presente em embalagens de mostarda também é reciclado. A cor amarela vibrante é comumente associada a produtos alimentícios, mas sua reciclagem em massa requer avanços nas tecnologias de triagem e separação para garantir eficiência adequada. O PET âmbar é amplamente utilizado em embalagens de medicamentos e bebidas, como cervejas. Essa cor, que possui tons de marrom, também apresenta desafios para a reciclagem em grande escala. Outra cor menos reciclada de PET é o branco fosco, comum em máquinas de lavar e outros eletrodomésticos. Embora seja uma cor neutra e

amplamente utilizada, o PET branco fosco pode ter baixa demanda de reciclagem devido às características de textura e pigmentação. Por fim, o PET preto, usado em molduras e pés de televisores, também enfrenta desafios na reciclagem em grande escala. Essa cor, amplamente adotada na indústria eletrônica por razões estéticas, requer técnicas de triagem e separação mais avançadas para facilitar a sua reciclagem em massa.

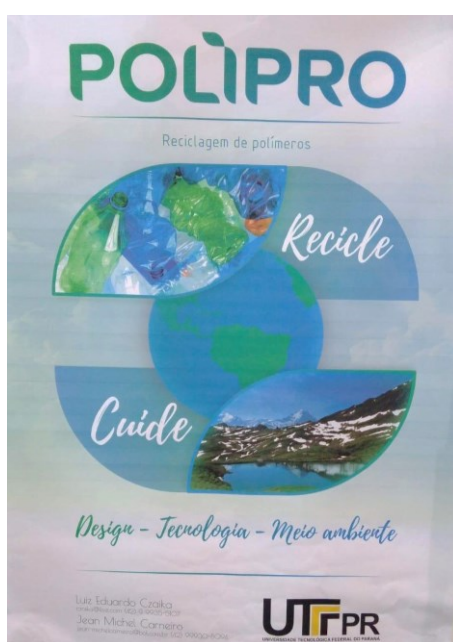
É fundamental desenvolver métodos eficientes que permitam a separação do PET preto durante o processo de reciclagem, a fim de aproveitar esses materiais de forma sustentável. Em resumo, as cores menos recicladas de PET, como vermelho, amarelo, âmbar, branco fosco e preto, apresentam desafios específicos para a reciclagem em massa, o que contribui para uma boa demanda para as fibras produzidas a partir desses materiais. No entanto, é necessário investir em pesquisas, tecnologias e conscientização para melhorar a eficiência da reciclagem dessas cores e promover uma indústria mais sustentável. Ao abordar os desafios relacionados às cores menos recicladas, estamos avançando em direção a uma economia circular, na qual todos os tipos de PET possam ser reutilizados e transformados em novos produtos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui descrevemos as etapas e ensaios do compósito realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UTFPR, campus Guarapuava. O processo inclui a caracterização física, moldagem e análise do comportamento a flexão dos corpos de prova.

As fibras de PET utilizadas neste trabalho foram produzidas em uma microempresa vinculada a incubadora da UTFPR-GP (Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Guarapuava) de 2019 a 2021, nomeada “POLIPRO - Reciclagem de Plásticos” (Fotografia 4).

Fotografia 4 - Logomarca POLIPRO®



Fonte: Autoria própria (2023)

A matéria-prima utilizada foi obtida na Associação dos Catadores de Papel de Guarapuava (ACPG), registrada sob CNPJ de número 00.832.151/0001-0. A empresa exerce a atividade de recuperação de papel e materiais plásticos.

A Fotografia 5 demonstra brevemente em 6 recortes o processo de recuperação do PET realizado nas instalações da ACPG. O recorte 'a' retrata os resíduos de PET já coletados manualmente pelos trabalhadores da associação, para este processo é utilizada uma esteira de classificação (recorte b) no qual são separados manualmente de acordo com o tipo do polímero.

O material de interesse para este projeto – garrafas e objetos de PET – foram submetidos a remoção dos rótulos, tampas e demais resíduos. Após esta separação, os materiais são

prensados em um bloco de aproximadamente 1 metro cúbico a fim de minimizar os custos para transporte e otimizar o armazenamento (recorte c).

O recorte 'd' representa a matéria-prima para a produção da fibra de PET após um processo de trituração e lavagem, visando a eliminação de impurezas como açúcares, partículas de areia e detritos. O material é exposto ao sol para retirada da umidade, e em seguida submetido a um processo complementar de secagem em uma estufa a uma temperatura de 120 graus Celsius por 12 horas.

Posteriormente, o material é direcionado através de uma esteira para um equipamento de transformação, cujo funcionamento se assemelha a uma máquina de algodão doce invertida. Este equipamento incorpora compartimentos segregados para evitar a contaminação das fibras pelo material triturado de PET. O PET triturado é introduzido no compartimento superior da máquina e é depositado em forma de fibras no compartimento inferior, onde se acumula e é manualmente removido, delineando um processo contínuo. Esse processo foi registrado no INPI sob número PI9602813-0, em 17 de junho de 1996 e hoje se encontra em domínio público. Melhoramentos no equipamento foram instalados e novos modelos de utilidade estão em fase de registro.

O produto final deste processo está representado nos recortes 'e' e 'f'. O recorte 'e' apresenta a fibra de coloração cinza devido à mistura de diferentes tonalidades de PET e a separação não criteriosa de outros resíduos como cola, lacres e impurezas. A fibra utilizada neste trabalho está representada no recorte 'f', possui coloração verde decorrente da separação criteriosa da matéria-prima e foi utilizada como preferência devido ao melhor contaste com o gesso utilizado no processo de confecção dos corpos de prova.

Fotografia 5 - recortes (a) (b), (c) (d) (e) e (f).



Fonte: Autoria própria (2023)

3.1 Moldes

Os moldes foram fabricados em madeira reciclada e revestidos com filme de PVC, nas medidas 900mm x 40mm x 40mm e posteriormente recortados nas medidas de 160mm x 40mm x 40mm conforme a EN 13279-2 (Europe Standards, 2006). A Fotografia 6 mostra detalhes do molde.

Fotografia 6 - Molde



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Gesso em pó

Foi utilizado como matriz para produção dos corpos de prova, gesso adquirido na empresa Gesso Paraná, situada à rua XV de novembro nº 5073 - Morro Alto - Guarapuava-PR, que atua na fabricação de blocos e painéis de gesso. Esse material possui massa específica aparente de 781 kg/m^3 , e tempo de início e fim de pega de 9 e 22 minutos. A Fotografia 7 mostra o gesso utilizado.

Fotografia 7 - Gesso



Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Preparação do gesso

Para a preparação da gesso usamos o mesmo procedimento proposto por Brandão (2015). Nesse processo, o tempo de endurecimento em relação à quantidade de água e gesso usados são características essenciais. A maneira como a pasta é preparada tem um papel importantíssimo nas propriedades da base de gesso. Portanto, o preparo seguiu cuidadosamente as diretrizes da NBR 121128 (ABNT, 1991).

3.4 Preparação da matriz de corpos de prova

As matrizes dos corpos de prova foram confeccionadas com base primeiramente na quantidade máxima de fibra de pet reciclado que poderia conter a matriz de 900 x 40mm x 40mm sem a necessidade de prensagem, chegando ao valor máximo de 80g (100% Densidade Aparente) a partir deste valor máximo foi adotado para as próximas matrizes os valores de 60g (75%) e 40 g (50%).

A quantidade de fibra presente na composição do material foi definida de acordo com a Equação, conforme Levy Neto e Pardini (2006) apud Caldas (2014).

$$V_f(\%) = (m_f / \rho_f) / V_{tot}$$

Onde o volume de fibra (V_f) é considerado em função da massa de fibra (m_f), a densidade da fibra (ρ_f) e volume total do compósito (V_{tot}).

O comportamento à flexão e a determinação dos módulos elásticos foram definidos em 16 corpos de prova de dimensões de 160 x 40 x 40 mm³, nas proporções de: 0%, 2%, 3% e 4% de fibra de PET reciclado, valores obtidos a partir da equação acima.

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UTFPR, campus de Guarapuava.

3.5 Máquina de Ensaio Universal

O dispositivo utilizado para a realização dos testes de flexão foi a máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo GRO48, apresentado na Fotografia 8.

Fotografia 8 - Máquina de ensaio universal

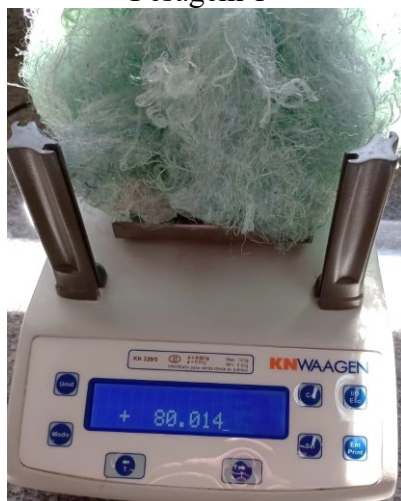


Fonte: A autoria própria (2023)

3.6. Moldagem dos corpos de prova

As Fotografias 9, 10 e 11 mostram a pesagem das porções de fibras usadas na confecção dos corpos de prova, as Fotografias 12, 13 e 14 mostram a fibra no molde, acréscimo do gesso e corte dos corpos de prova respectivamente.

Fotografia 9
Pesagem 1



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 10
Pesagem 2



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 11
Pesagem 3



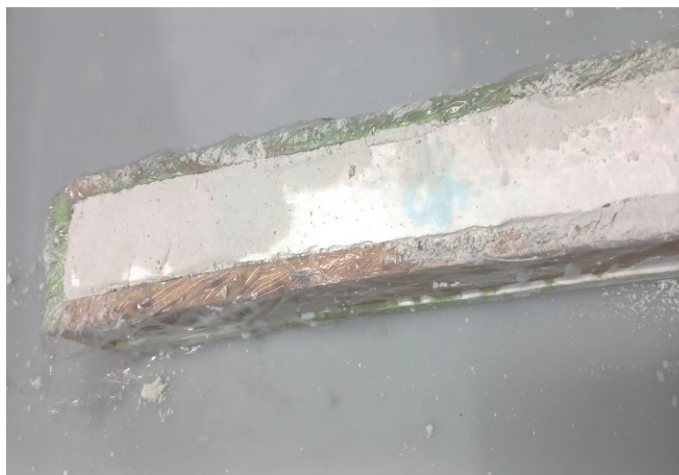
Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 12 - Fibra no molde



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 13 - Gesso inserido no molde com fibra



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 14 - Cortando os corpos de prova no comprimento de 160mm



Fonte: Autoria própria (2023)

Cada matriz de corpo de prova confeccionado nesta pesquisa forneceu quatro corpos de prova com as seguintes dimensões: 160mm x 40 mm x 40mm.

Todos os procedimentos serão repetidos para as proporções de 0%, 2%, 3% e 4% de fibra de PET reciclado, onde serão gerados gráficos de tendência de comportamento das misturas gesso que serão comparados ao gesso puro. O reforço de fibras de PET reciclado foi produzido pela POLIPRO Reciclagem de Plásticos, empresa incubada do UTFPR, utilizando garrafas PET

adquiridas na associação de catadores de recicláveis de Guarapuava, posteriormente lavadas e trituradas, a massa específica do PET é de 1,38 kg/m³. Estas foram incorporadas nas proporções de 0%, 2%, 3% e 4% em substituição ao volume de gesso.

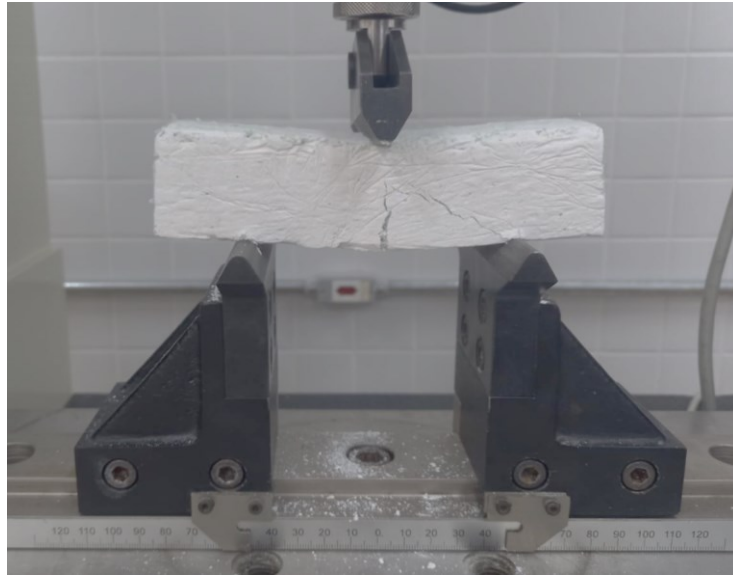
A pasta de gesso utilizada é classificada como de baixa densidade, com valores entre 600 a 800 kg/m³, ou 600 a 800 g/mm³. relação água/gesso foi determinada de acordo com a norma EN 13279-2 [16], seguindo o método de aspersão, pela massa de gesso que pode ser saturada quando são polvilhados em 100g de água, o objetivo era encontrar uma trabalhabilidade ideal e uma resistência adequada sem incorporar aditivos. O traço foi determinado com base na massa unitária do gesso, sendo calculada conforme a NBR 12127 [17] e NBR 13207. As matrizes para os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram confeccionados em madeira de pinus nas medidas de 40mm x 40mm x 900mm, os compósitos com suas densidades identificados nas respectivas formas foram colocados para curar e após 24h foram retirados dos moldes e colocados em local seco e ventilado e durante nove dias eles foram virados diariamente, para garantir uma secagem uniforme, posteriormente foram cortadas na medida de 40mm x 40mm x 160mm conforme especificações da EN 13279-2 [16]. resultando em 5 corpos de prova tecnicamente iguais dos quais um foi descartado aleatoriamente para do teste final. No décimo dia realizou-se o ensaio de flexão. As Fotografias 15, 16 e 17 destacam etapas do ensaio de flexão, e na Fotografia 18 destaca um corpo de prova ensaiado com uma ampliação de 20x e mostra a distensão das fibras e manutenção da tensão de flexão.

Fotografia 15 - Início do ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 16 - Teste de flexão



Fonte: Autorial própria (2023)

Fotografia 17 - Teste de flexão 2



Fonte: Autorial própria (2023)

Fotografia 18 - Corpo de prova ensaiado com uma ampliação de 20x



Fonte: Autoria própria (2023)

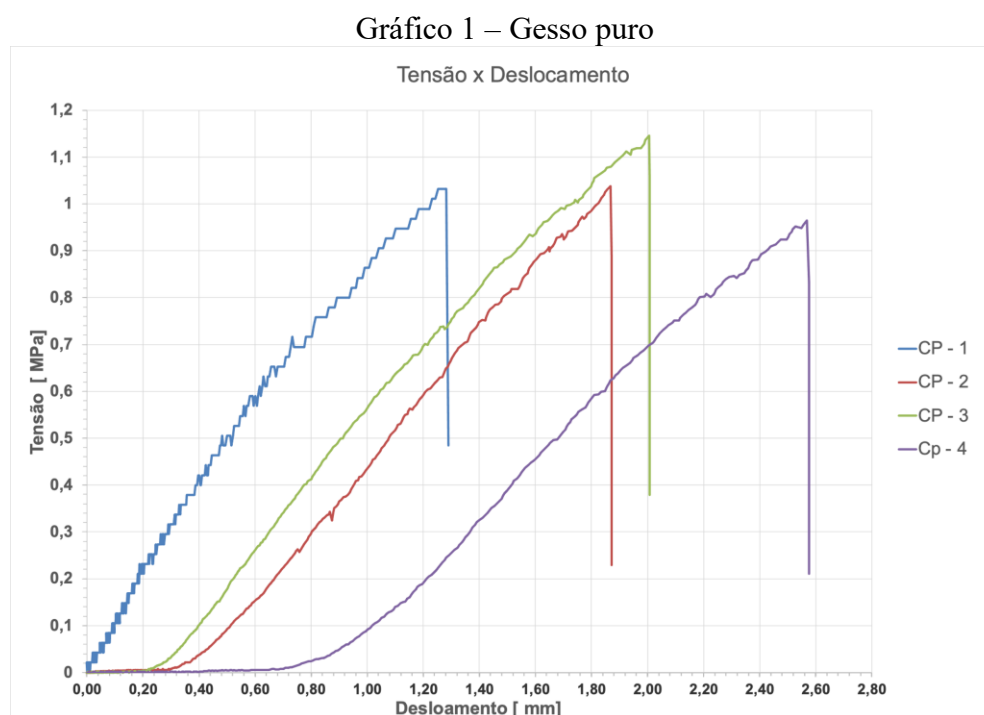
A resistência à flexão foi definida de acordo com o método da EN 13279-2 [16]. Neste ensaio um carregamento central é aplicado ao corpo de prova prismático de 40 x 40 x 160 mm, que é colocado sobre dois apoios afastados 100 mm entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos a partir dos testes realizados, seguidos de uma discussão detalhada sobre o que esses resultados indicam em relação aos nossos objetivos de pesquisa.

4.1 Teste de Flexão

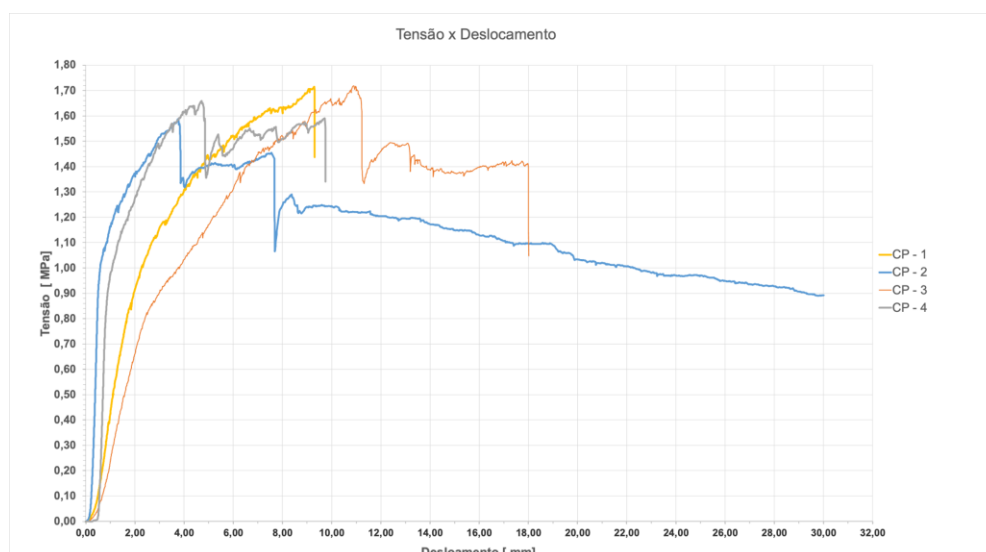
Os resultados dos ensaios de flexão para o gesso puro são apresentados no Gráfico 1.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados dos ensaios de flexão para o gesso com 2% de PET, são apresentados no Gráfico 2.

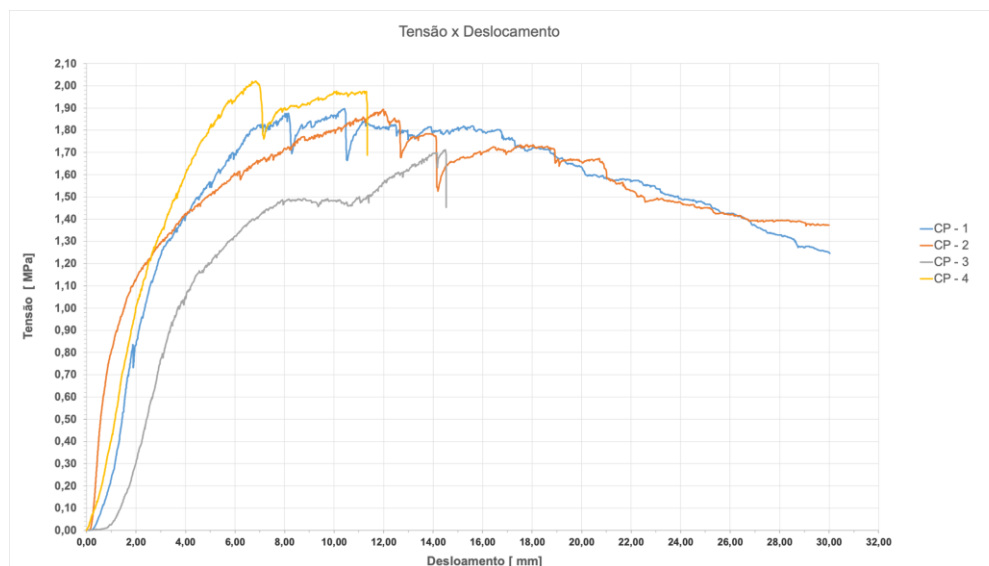
Gráfico 2 - Gesso x PET 2%



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados dos ensaios de flexão para o gesso com 3% de PET são apresentados no Gráfico 3.

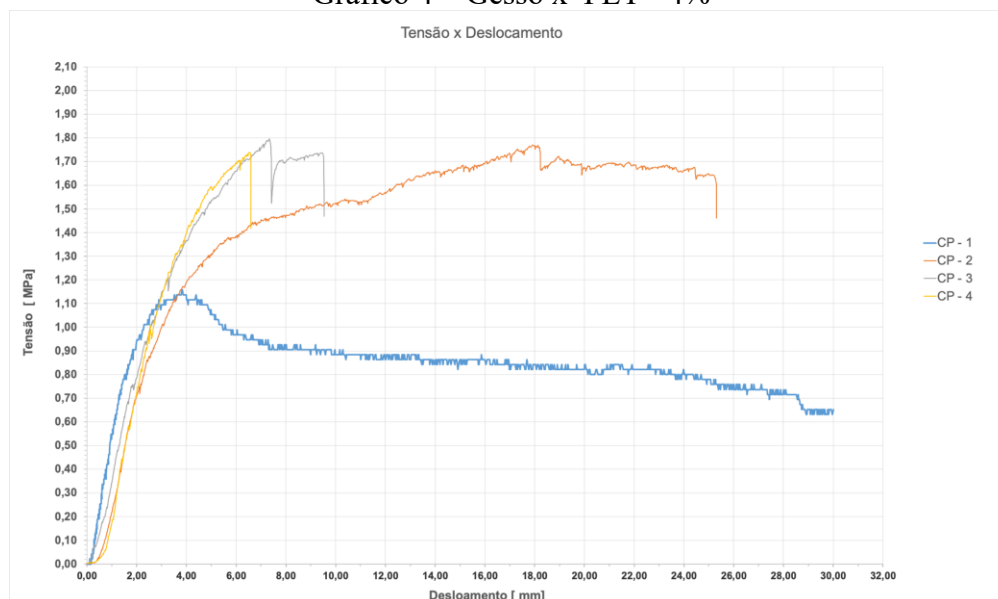
Gráfico 3 - Gesso x PET 3%



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados dos ensaios de flexão para o gesso com 4% de PET, são apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Gesso x PET - 4%



Fonte: Autoria própria (2023)

Na tabela 1, a seguir, temos os resultados obtidos a partir de diferentes amostras de gesso nas suas composições: gesso puro, gesso com 2%, 3% e 4% de PET. Nela, são apresentados a média e o desvio padrão, correspondentes aos dados de cada tipo de amostra.

Tabela 1 - Resultados de resistência máxima (MPa), obtidos no ensaio de flexão.

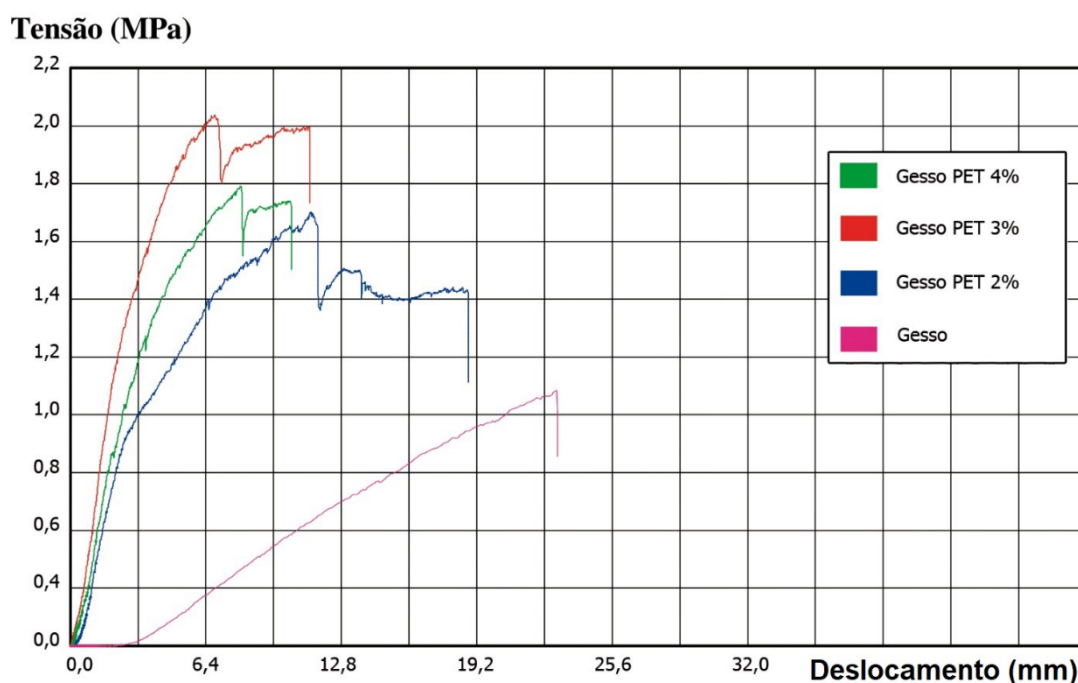
<i>Corpos de prova</i>	<i>Resistência máxima (MPa)</i>			
	<i>Gesso Puro</i>	<i>2%PET</i>	<i>3%PET</i>	<i>4%PET</i>
<i>1</i>	<i>1,032</i>	<i>1,715</i>	<i>1,897</i>	<i>(1,158)*</i>
<i>2</i>	<i>1,038</i>	<i>1,588</i>	<i>1,893</i>	<i>1,770</i>
<i>3</i>	<i>1,146</i>	<i>1,718</i>	<i>1,712</i>	<i>1,795</i>
<i>4</i>	<i>0,965</i>	<i>1,659</i>	<i>2,022</i>	<i>1,738</i>
<i>Média</i>	<i>1,045</i>	<i>1,670</i>	<i>1,881</i>	<i>1,615</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>0,075</i>	<i>0,053</i>	<i>0,128</i>	<i>0,306</i>

Fonte: Autoria própria (2023)

*É importante salientar que os dados apresentados na análise do corpo de prova 1 com 4% de PET, foi afetado por uma falha na EMIC durante a coleta dos dados, o grafico apresentado para esse corpo específico foi obtido de um corpo de prova que já havia sofrido pressão antes da falha citada, isso possivelmente afetou os resultados obtidos. Tal circunstância sugere a necessidade de considerar a potencial influência dessa falha no equipamento ao interpretar os resultados, portanto foi desconsiderado esse valor nos cálculos de média e desvio padrão.

O Gráfico 5 foi gerado com os melhores resultados obtidos nas proporções testadas, podemos visualizar a resposta à tensão nas diferentes proporções de gesso e fibras de PET. As curvas revelam a influência significativa da adição de fibras de PET na capacidade de resistência à tensão dos corpos de prova.

Gráfico 5 – Melhores resultados obtidos, de resistência máxima (MPa), das proporções testadas.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores médios da resistência máxima apresentados na tabela, demonstram que houve um aumento na resistência máxima do gesso com fibra de PET em relação ao gesso puro em todas as porcentagens. Os valores de percentuais de incremento de resistência mecânica em relação ao

gesso são demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 - % de incremento de resistência máxima em relação ao gesso puro

<i>2%PET</i>	<i>3%PET</i>	<i>4%PET</i>
<i>59,8%</i>	<i>80%</i>	<i>54,5%</i>

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 3 resume o tempo em segundos, onde houve a manutenção da tensão de flexão em até 80% da tensão máxima.

Tabela 3 – Tempo em segundo de manutenção da tensão em 80% da tensão máxima

Corpo de prova	Gesso puro	PET 2%	PET 3%	PET 4%
1	0	89,11	257,92	345,51
2	0	89,54	205,12	148,35
3	0	89,63	226,87	44,44

Autoria própria (2023)

Os dados apresentados na tabela 3, demonstram um aumento significativo na manutenção da tensão em até 80% do valor da tensão máxima, demonstrando que após a fratura do gesso as fibras de PET sustentam a carga aplicada por um período significativo até que estas fraturem completamente, isso também pode ser visto na curva tensão/ deformação dos corpos de provas de gesso com reforço de fibra de PET 2%, 3% 4% e também pelas fotografias 16, 17 e 18.

5 CONCLUSÕES

Observou-se que, após os corpos de prova atingirem o ponto de tensão máxima, há uma persistência de resistência à força aplicada. Concretamente, enquanto a matriz de gesso puro evidencia um colapso imediato após a máxima tensão ser alcançada — caracterizado pela formação de fissuras —, as matrizes contendo 2% e 3% de fibras de PET mantêm a integridade estrutural por um deslocamento adicional considerável, atribuível ao suporte tensional fornecido pelas fibras. Esta capacidade de sustentação após a fissuração inicial torna-se patente nas amostras analisadas, indicando um aumento na tenacidade do compósito. No entanto, para a proporção de 4% de fibra, apesar da manutenção da tensão, observou-se uma diminuição na tensão máxima suportada, sugerindo a superação do que é denominado na literatura como 'teor de reforço ótimo'. Este fenômeno alinha-se com estudos precedentes, como aqueles que investigam a incorporação de fibras de bambu em matrizes cimentícias, nos quais se identifica o teor ótimo de reforço na faixa de 8% do volume total do compósito. Essa observação ressalta a necessidade de estudos adicionais para compreender completamente os limites e potenciais das matrizes de gesso reforçadas com fibras de PET. Acreditamos que esta pesquisa contribui de maneira significativa para o campo de materiais de construção e oferece perspectivas valiosas para o desenvolvimento de compósitos robustos e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12142: **Determinação de resistência à tração na flexão de corpos prismáticos**. Rio de Janeiro. 1991.

NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - **Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro. 1991.

NBR 12775: Placas lisas de gesso para forro – **Determinação das dimensões e propriedades físicas**. Rio de Janeiro. 1992.

BRANDÃO, C. P. **Compósito com matriz de gesso e reforço de manta de sisal**. Dissertação (Mestrado) Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2015.

CUNHA, P. W. S. **Estudo sobre as potencialidades de compósitos à base de gesso e fibras de coco seco para aplicação na construção civil**. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

DOMÍNGUEZ, L. V.; SANTOS, A. G. **Manual do gesso**. Tradução de Paulo Mariano Lopes. [s.l.: s.n.], agosto de 2002.

MUNHOZ, F. C. **Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos no contexto de produção mais limpa**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008. 164 p.

PINHEIRO, S. M. de M. **Gesso reciclado: avaliação das propriedades para uso em componentes**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, São Paulo: 2011.

SILVA, C. D. **Influência da Presença de Fibras Naturais em Compósitos Híbridos, tipo Sandwich.** Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, out, 2003.

OLIVEIRA, A. S., Villela, L. S., Veloso, M. C. R. A., Silva, D. W., Mendes, L. M., & Guimarães Junior, J. B. **Compósitos com matriz de gesso reforçada com fibras de madeira de eucalipto.** Scientia Forestalis, 48(127), e3260.

MAGALHÃES, A. C. T. V. **Estudo de Fibras Vegetais, Mucilagem de Cacto e Gesso em Componentes Construtivos,** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília - DF, 2009.

CUNHA, P. W. S. **Estudo Sobre as Potencialidade de Compósitos à base de Gesso e Fibras de Coco Seco para Aplicação na Construção Civil,** Tese (doutorado) -Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal - RN, 2012.

DE PAULA VIDAL, L.; SOBRAL S. MAIA, J. **A IMPORTÂNCIA DA COLETA SELETIVA PARA O MEIO AMBIENTE .** Revista Hórus, [S. l.], v. 3, n. 01, p. 46–60, 2006.

LEVY Neto, F., PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia.** 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2014. 121 f.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde,** 1. ed. - São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

Marcos A. S. dos Anjos I; Khosrow Ghavami II; Normando P. Barbosa III, **CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo.** IEscola Técnica Federal de Palmas. Coord. de Edificações, Palmas, TO.