



LEONARDO SANCHES ALVES

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COMO
MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTOS**

**LAVRAS – MG
2023**

LEONARDO SANCHES ALVES

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COMO MATÉRIA-PRIMA
PARA PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Alves, Leonardo Sanches.

Resíduos da indústria automobilística como matéria-prima para
produção de fibrocimentos / Leonardo Sanches Alves. - 2023.

43 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.
Bibliografia.

1. Compósitos. 2. Fibrocimento. 3. Resíduos poliméricos. I.
Mendes, Rafael Farinassi. II. Título.

LEONARDO SANCHES ALVES

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA
PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTOS
WASTE FROM THE AUTOMOTIVE INDUSTRY AS RAW MATERIAL FOR
FIBERCEMENT PRODUCTION**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 04 de dezembro de 2023.

Dr. Rafael Farinassi Mendes - UFLA

Ma. Bruna Resende Fagundes Pereira

Ma. Queilla Santos Viana

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado ao longo da minha jornada acadêmica em Lavras e, em especial, desejo iniciar agradecendo à Casa Nostra, a república que se tornou meu lar durante alguns anos de faculdade.

Ao meu colega de curso, tanto em Química quanto em Engenharia de Materiais, Marco Aurélio, cuja parceria foi essencial para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À Transforma Júnior e aos seus membros, meu agradecimento por contribuírem de maneira significativa para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Não posso deixar de mencionar o Núcleo Sul de Empresas Juniores, uma experiência enriquecedora da qual tive a sorte de fazer parte. Também sou grato pela oportunidade de participar da Enactus e da Atlética Xarada de Engenharias durante minha graduação.

Aos meus amigos em Bragança Paulista, Guilherme, Felipe, Matheus, Camila, Caique, Daniel, Gustavo e Lara, merecem uma menção especial. A presença de vocês foi fundamental nos momentos bons e ruins, e agradeço por cada um de vocês ter sido parte importante da minha formação.

À minha namorada Lorrana, meu agradecimento por ser um apoio constante e por contribuir de maneira tão valiosa em todos os aspectos da minha jornada acadêmica.

À Tati e à Elisa, agradeço por toda ajuda e disposição em momentos cruciais.

Não posso deixar de expressar minha gratidão à minha família: minha mãe Dúlcineia, tia Claudinéia e, especialmente, à minha avó Percília. Seu apoio incondicional em Lavras foi fundamental e significou o mundo para mim.

Por fim, estendo meus agradecimentos a dois professores que desempenharam papéis fundamentais em minha trajetória. Ao Dr. Rafael, agradeço por todo apoio e amizade, especialmente nos momentos decisivos do curso. À Dra. Lívia, meu profundo agradecimento por ser um suporte crucial no início da minha jornada acadêmica.

Cada um de vocês contribuiu de maneira única para o meu sucesso, e sou profundamente grato por todo o apoio e encorajamento ao longo desses anos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre a viabilidade técnica de incorporar fios de carros descartados como reforço em compósitos de fibrocimento extrudados. O estudo investigou o impacto de diferentes concentrações desses reforços nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais, visando aplicações na construção civil. Os materiais de base consistiram em uma matriz de cimento CPV com adição de calcário, com o intuito de reduzir os custos de produção. Além disso, foram adicionados hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e um aditivo superplastificante (ADVA®) para melhorar as características do compósito. Os fios de carros descartados, de natureza polimérica, foram incorporados em diferentes proporções, variando desde o controle 0% de fibras e com reforço nas seguintes proporções 1%/2%/3%/4% e 5%. O estudo incluiu uma análise da granulometria das partículas, das propriedades físicas de densidade, absorção de água e porosidade, das propriedades mecânicas de Módulo de ruptura (MOR), Módulo de elasticidade (MOE) e Tenacidade, ambos obtidos no ensaio de flexão estática. Os fibrocimentos reforçados com 1% de resíduos de fios de carros se destacaram em relação aos demais tratamentos, obtendo resultados próximos ao tratamento controle de densidade, Porosidade, absorção de água, MOR e MOE, e ainda obtendo valores de tenacidade superiores. Desta forma, o estudo contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o uso de resíduos de fios de carros na produção de materiais de construção sustentáveis, além de fornecer possibilidades para destinação adequada e agregação de valor para esse resíduo.

Palavras-chaves: Compósito cerâmicos. Resíduos de fios elétricos. Reaproveitamento. Propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the technical feasibility of incorporating discarded car wires as reinforcement in extruded fiber cement composites. The study investigated the impact of different concentrations of these reinforcements on the physical and mechanical properties of the materials, aiming for applications in civil construction. The base materials consisted of a CPV cement matrix with the addition of limestone, with the aim of reducing production costs. Furthermore, hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) and a superplasticizing additive (ADVA®) were added to improve the characteristics of the composite. Threads from discarded cars, of a polymeric nature, were incorporated in different proportions, ranging from the 0% fiber control and with reinforcement in the following proportions 1%/2%/3%/4% and 5%. The study included an analysis of particle size, physical properties of density, water absorption and porosity, and mechanical properties of Modulus of Rupture (MOR), Modulus of Elasticity (MOE) and Tenacity, both obtained in the static bending test. . Fiber cements reinforced with 1% car wire waste stood out in relation to other treatments, obtaining results close to the density control treatment, Porosity, water absorption, MOR and MOE, and also obtaining higher tenacity values. In this way, the study contributed to the advancement of knowledge about the use of car wire waste in the production of sustainable construction materials, in addition to providing possibilities for adequate disposal and adding value to this waste.

Keywords: Ceramic composites. Waste electrical wires. Reuse. Physical and mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise de granulometria: (a) peneiras utilizadas; (b) material.....	21
Figura 2 - Produção dos compósitos.	22
Figura 3 – Fluxograma.	23
Figura 4 - Máquina de ensaio universal Instron.	24
Figura 5 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a densidade aparente dos fibrocimentos.	26
Figura 6 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a porosidade aparente dos fibrocimentos.....	28
Figura 7 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a absorção de água dos fibrocimentos.	29
Figura 8 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre Módulo de ruptura dos fibrocimentos.	31
Figura 9 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre Módulo de Elasticidade dos fibrocimentos.....	32
Figura 10 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a tenacidade dos fibrocimentos.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS

PP	Polipropileno
AE	Acrílico-estirenado
APA	Acrílico poliácido
VAE	Acetato de vinila-etileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
STF	Supremo Tribunal Federal
PE	Polietileno
PVC	Cloreto de polivinila
PET	Politereftalato de etileno
HPMC	Hidroxipropilmetilcelulose
ADVA	Poliéster Carboxílico
ASTM	American Society for Testing and Materials
MOR	Módulo de ruptura
MOE	Módulo de elasticidade
DA	Densidade aparente
PA	Porosidade aparente
PVA	Poli (álcool vínlico)
AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Fibrocimento	14
2.2	Fibras poliméricas	15
2.3	Resíduos poliméricos de fios de carro	16
2.4	Extrusão.....	17
2.5	Fibrocimento e Resíduos Poliméricos	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	Materiais.....	21
3.2	Métodos	21
3.2.1	Granulometria das fibras.....	21
3.2.2	Produção dos fibrocimentos	22
3.2.3	Propriedades físicas	23
3.2.4	Propriedades mecânicas.....	24
3.2.5	Análise estatística.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	Propriedades físicas	26
4.1.1	Densidade	26
4.1.2	Porosidade aparente	27
4.1.3	Absorção de água.....	29
4.2	Propriedades mecânicas.....	30
4.2.1	Módulo de Ruptura	30
4.2.2	Módulo de elasticidade.....	32
4.2.3	Tenacidade	33
5	CONCLUSÕES.....	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos sempre foi utilizado na construção civil, podendo ser observado seu uso até nas grandes construções da Roma Antiga (SEYMOUR et al., 2023). Desde então, as técnicas de produção e uso desses compósitos passaram por constantes evolução, uma vez que suas características, como resistência, durabilidade e leveza, são fundamentais para o desenvolvimento das sociedades humanas (BISSONNETTE; COURARD; GARBACZ, 2018). Dentre os materiais compósitos desenvolvidos ao longo desse processo, destaca-se o fibrocimento com reforço polimérico em sua matriz.

O fibrocimento é um material majoritariamente composto por cimento e reforço de diversos tipos de materiais, como o polipropileno (PP) puro ou em associação com celulose. Essas combinações conferem ao fibrocimento propriedades únicas de resistência, durabilidade e versatilidade, tornando-o adequado para diversas aplicações na indústria civil (SELVAMONY; RAVINCHANDRAN, 2017), tais como em coberturas e telhados, painéis de fachada, tubos e caixas d'água, paredes e divisórias, entre outras finalidades.

Contudo, o PP pode ser relativamente caro (PIETRAFESA; BUENO; BUENO, 2018), o que faz com que a celulose seja mais vantajoso economicamente, mas sem entregar a mesma resistência mecânica, devido a sua degradação em uma matriz alcalina e sua movimentação dimensional, quando os fibrocimentos são expostos a ciclos de molhagem e secagem, como estão, por exemplo, sujeitas as telhas.

Nesse sentido, o preço do polipropileno e a fragilidade da celulose no contexto do fibrocimento motiva pesquisas e desenvolvimento de novos materiais para reforço desse composto (BARBIRATO *et al.*, 2015; CRUZ, 2020; MIYAMARU SEO, 2021).

Essas pesquisas exploram diferentes tipos de polímeros, principalmente sintéticos, como acrílico-estirenado (AE), acrílico poliácido (APA) e acetato de vinila-etileno (VAE) (CRUZ, 2020). Além disso, estudos que incluem polietileno de alta densidade (PEAD) apontam esse material como promissor, já que pode fornecer propriedades mecânicas comparáveis ao PP, mas a um custo potencialmente mais baixo (JIANG *et al.*, 2021). Ainda, existem pesquisas que se concentram na reutilização de polímeros reciclados como uma alternativa viável, contribuindo para a sustentabilidade e, ao mesmo tempo, reduzindo custos.

Nesta concepção vários estudos estão sendo desenvolvidos com a incorporação de materiais reciclados como reforço em compósitos cimentícios, sendo então caracterizados de modo a entender as modificações de propriedades quando este é incorporado, sendo possível

avaliar resistência à compressão, módulo elástico, resistência à flexão, absorção de energia e resistência à tração afim de verificar não só o desempenho do compósito mas também sua viabilidade econômica (SCARPITTI *et al.*, 2023).

Dentre as indústrias que se interessam por esse tipo de desenvolvimento técnico-científico, destaca-se a indústria automobilística, considerando essa abordagem inovadora para a produção de componentes automotivos mais leves, resistentes e sustentáveis (OVALI; SANCAK, 2022).. Isso resulta em veículos mais eficientes em termos de combustível, menor desgaste dos pneus e menor consumo de energia.

Outro aspecto importante é a versatilidade no *design*, já que esses compósitos podem ser moldados em formas complexas, como afirma Cruz (2020), o que permite a construção de painéis internos, revestimentos e até mesmo peças de carroceria. Isso abre oportunidades para aprimorar a estética dos veículos e otimizar o espaço interno sem impactar tanto no preço final do produto.

Além do mais, a sustentabilidade é uma preocupação cada vez mais crescentena indústria automobilística, sendo os compósitos materiais importantes nesse aspecto (ASHORI, 2008). A utilização de fibras naturais, como celulose, juntamente com polímeros biodegradáveis ou reciclados, contribui para a redução do impacto ambiental na produção dos veículos, sendo promissores para se pensar em uma indústria automobilística mais verde (ASHORI, 2008).

Dessa maneira, o emprego de fibrocimento com polímeros na indústria automobilística desempenha um papel crucial na redução da produção de resíduos e na utilização mais eficiente de materiais, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade ambiental. Como já citado, esses compósitos diminuem o peso dos veículos, o que gera um menor consumo de combustível e emissões, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

Essas questões são ainda mais notórias quando olhamos para os fios automotivos, que são componentes vitais nos veículos modernos, desempenhando um papel essencial na transmissão e conexão de energia elétrica e sinais para uma variedade de sistemas e dispositivos (COSTA NETO *et al.*, 2023). A composição química desses fios é de suma importância, e os materiais mais comuns utilizados incluem cobre e, em alguns casos, alumínio ou ligas de cobre-alumínio (Cu-Al). O cobre é preferido devido à sua excelente condutividade elétrica e resistência à corrosão, tornando-o ideal para transportar correntes elétricas com eficiência.

Um dos problemas é o descarte inadequado desses materiais, contribuindo para agravar os problemas relacionados à questão ambiental. Uma alternativa interessante, é a reutilização

desses resíduos poliméricos para a construção de compósitos de fibrocimento, considerando todas as vantagens já citadas. Assim, utilização das fibras poliméricas associadas ao fibrocimento proporciona melhorias significativas nas propriedades estruturais e na capacidade de suportar carga, além de aumentar sua resistência à tração e à flexão (AMARAL JÚNIOR *et al.*, 2017), além de contribuir para a redução do impacto ambiental das indústrias (TEIXEIRA, 2010).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de utilização de fios de carros descartados como matéria-prima em fibrocimentos extrudados, assim como o efeito de diferentes concentrações sobre as propriedades físicas e mecânicas destes compósitos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fibrocimento

O fibrocimento é um material produzido a partir de uma matriz de cimento reforçado com partículas ou fibras. O cimento necessita de agregados para melhorar seu desempenho relacionado a funções mecânicas, pois, sozinho, ele apresenta baixa absorção de energia e deformação. Com isso, os reforços adicionados na matriz cimentícia, tendem a aumentar suas propriedades mecânicas e físicas, melhorando a tenacidade e seu desempenho após a fissura. Isso acontece, pois, antes do compósito se romper, ocorre deformação plástica devido a transferência de tensões da matriz para as fibras (TOLÊDO FILHO *et al.*, 2000).

O fibrocimento tem sido muito versátil em sua aplicação no mercado de construção civil, desde telhas de cobertura à placas de fechamento light steel frame. Essa grande variedade de aplicações se deve às suas melhorias relacionadas a resistência do compósito a partir de adições de fibras/partículas na mistura do material, que podem ser de base vegetal ou polimérica.

As propriedades mais importantes do fibrocimento dependem da aplicação que ele terá. No caso de telhas de cobertura, resistência a impactos, alta resistência antes do início da deformação e densificação dos poros da matriz são mais importantes que resistência mecânica à flexão, por exemplo, já que as telhas devem ter proteção contra chuvas de granizo (CARMELLO, 2021). Já as placas planas, utilizadas para divisórias, devem apresentar melhor isolamento térmico e acústico (IKAI *et al.*, 2010).

A partir dos anos 30, era utilizado como agregado fibroso o amianto, constituído por fibras minerais caracterizadas por sua resistência à tração, boas propriedades térmicas e acústicas, assim como também outras características adequadas para uso em materiais de construção civil, como a incombustibilidade, não sofre decomposição química, não oxida, apresenta grande durabilidade e boa interface com a matriz cimentícia (GARCIA *et al.*, 2010). No entanto, no Brasil seu uso foi proibido pelo Supremo Tribunal Federal (STF) em 2017, devido à associação feita entre doenças respiratórias e a manipulação de fibras do amianto utilizadas na fabricação do fibrocimento.

Com isso, houve a alteração da fibra de amianto por fibras sintéticas para reforço de fibrocimentos. A tecnologia do uso de fibras sintéticas na fabricação do fibrocimento é normatizada no Brasil por meio da NBR 15210-1 (ABNT, 2019).

2.2 Fibras poliméricas

As fibras poliméricas são amplamente utilizadas como materiais de reforço em diversos setores industriais. Essas fibras, derivadas de polímeros sintéticos como polietileno, polipropileno ou nylon, oferecem propriedades mecânicas superiores, como resistência à tração, rigidez e tenacidade (FERNANDES, 2019). As fibras poliméricas têm uma ampla gama de aplicações, desde a indústria automotiva, onde são usadas para melhorar a resistência e o desempenho de peças estruturais, até a indústria da construção civil, onde são empregadas para aumentar a durabilidade e a resistência à fissuração de concretos e argamassas (AMARAL JÚNIOR *et al.*, 2017). Além disso, as fibras poliméricas também são utilizadas em compósitos de matriz polimérica e cerâmicas, proporcionando reforço estrutural e aumentando a resistência ao impacto desses materiais. Sua versatilidade e propriedades mecânicas tornam as fibras poliméricas uma escolha promissora para diversas aplicações industriais (AHMAD *et al.*, 2021).

O fibrocimento utilizando fibras poliméricas como reforço produzido atualmente no Brasil é normalmente composto por mais de quatro matérias-primas, que vão desde o cimento e diferentes tipos de adições minerais, até diferentes tipos de fibras curtas (polipropileno e polivinil álcool) e polpa celulósica (EHRENBRING, 2017). A diversidade das matérias primas dificulta o planejamento das misturas, de modo que estudos são conduzidos variando a quantidade destes materiais e avaliando seu efeito nas propriedades finais do fibrocimento.

Além da maior resistência mecânica, o reforço polimérico na matriz de fibrocimento apresenta outras vantagens, como a facilidade de aplicação, e a redução de peso e espessura dos materiais, sem comprometer sua resistência. Por essas razões, o reforço com polímero na matriz fibrocimento é uma técnica adequada para aprimorar a qualidade e durabilidade dos materiais de construção, permitindo a construção de estruturas mais resistentes e duráveis, inclusive, já sendo usado em escala industrial.

No entanto, a utilização apenas de fibras poliméricas, tais como o polipropileno, resulta em aumento de até 40% no preço final dos fibrocimentos (FARRAPO *et al.*, 2017), o que faz com que atualmente seja usado em associação com celulose. Contudo, a celulose apresenta a dificuldade de degradação alcalina da matriz cimentícia e sua movimentação dimensional, devido duas características higroscópicas, promovendo a redução da durabilidade do compósito (MENDES *et al.*, 2021).

Assim, surge um grande interesse em buscar a utilização de novas fibras, com melhor

vantagens econômicas, que promova durabilidade no fibrocimento e que permita a obtenção de fibrocimentos mais sustentáveis.

2.3 Resíduos poliméricos de fios de carro

Os fios de carro são geralmente feitos de polímeros termoplásticos, como polietileno (PE), cloreto de polivinila (PVC), polipropileno (PP) e Teflon, e são usados para conduzir eletricidade em carros e outros veículos automotores. Quando descartados, esses fios podem contribuir para a poluição ambiental, especialmente se não forem tratados adequadamente.

Os plásticos compõemem um veículo cerca de 12 % do seu peso, onde a composição de cobre e plástico dos fios é equivalente a aproximadamente 30 kg do peso total, cerca de 100 m de fiação. Visto que cerca de 6 milhões de carros são descartados por ano na Europa, têm-se então uma ampla geração de resíduos de fiação anual com aproximadamente 180 milhões de kg de descarte apenas na Europa (VILLANUEVA-REY *et al.*, 2018; VIEYRA *et al.*, 2022). Santos (2012) afirma que o mercado para o descarte de fios de carro varia de acordo com o país e a região, mas geralmente envolve o recolhimento, transporte e processamento dos fios para recuperação de materiais valiosos, como metais e plásticos.

Santos (2012) enfatiza a importância crítica de adotar práticas de gestão adequada de resíduos, incluindo os resíduos gerados pelos fios de carro, como uma medida essencial para minimizar o impacto ambiental decorrente do descarte desses materiais. É importante ressaltar que a quantidade de resíduos produzidos pela indústria automobilística e oficinas mecânicas é substancial, o que torna a gestão adequada ainda mais crucial. Isso ocorre devido ao fato de a indústria automotiva ser uma das maiores geradoras de resíduo sólido em todo o mundo, principalmente em relação aos fios de carros (BARBIERI; AQUINO, 2021). A tendência é aumentar cada vez mais esse volume, já que existe uma crescente complexidade dos sistemas elétricos e eletrônicos em veículos modernos, requerendo cada vez mais o aumento da quantidade de fios.

Entre os materiais presentes nos fios de carro, os polímeros, em particular o PVC, são comuns em revestimentos isolantes (ANTUNES, 2021), sendo escolhido por sua resistência ao calor, isolamento elétrico e durabilidade. No entanto, a reciclagem desses polímeros é crucial, uma vez que a queima inadequada de PVC pode liberar poluentes tóxicos, como dioxinas, que representam sérios riscos ambientais e à saúde. A reciclagem de fios de carro, incluindo a recuperação de polímeros como o PVC, desempenha um papel essencial na conservação de

recursos naturais. Ela ajuda a evitar a extração de matérias-primas virgens, reduzindo assim a pressão sobre o meio ambiente (WIEBECK; BAHIENSE NETO, 2013).

Portanto, a gestão adequada e a reciclagem de fios de carro não apenas ajudam a reduzir o impacto ambiental, mas também representam uma abordagem sustentável para lidar com o crescente volume de resíduos gerados pela indústria automobilística e oficinas mecânicas. Essas práticas são cruciais para a preservação do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade na indústria automotiva.

Dessa forma, esses fios, provenientes de chicotes elétricos ou cabos de aço presentes em veículos podem vir a ser reciclados e processados para serem incorporados em reforço em compósitos cerâmicos, sendo uma opção para um reforço de baixo custo, com maior durabilidade e que permita uma destinação adequada aos resíduos da indústria automobilística.

2.4 Extrusão

Dentro dos compósitos produzidos com resíduos poliméricos como reforço, o método de extrusão se destaca nas pesquisas, como utilizado por Ligowski, Santos e Fujiwara (2015). A extrusão é um processamento de alimentação contínua com alto potencial de aplicação industrial devido à sua alta produtividade. Além disso, ele permite a otimização de misturas pois é capaz de orientar o fluxo do material fazendo com que haja também uma orientação das fibras dispersas de modo que é capaz de melhorar propriedades mecânicas (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016; PERROT *et al.*, 2018).

Segundo Wiecka e Duailibi (2013), o processo de extrusão é utilizado para o processamento de produtos cerâmicos há mais de 150 anos, e a tecnologia só começou a sofrer alterações a partir da década de 50 do século passado. A umidade no processo de extrusão pode facilitar a conformação devido às propriedades da plasticidade, porém existe um limite a partir do qual a água reduz a consistência da massa. Quando atingirmos esse limite a massa apresentará uma resposta reduzida à variação de pressão e, assim, não obterá capacidade suficiente para a conformação. Caso a pressão aumente, a compactação da massa será maior.

No processo de extrusão, o material é formado através de um alto grau de cisalhamento e forças de compressão, passando por uma seção a qual dará origem ao seu formato. A característica reológica da mistura e sua plasticidade constituem o fator fundamental para atingir a menor porosidade, proporcionando uma melhor força de adesão entre fibra e matriz cimentícia (PELED; SHAH, 2003; KUDER, 2010; NASSAR, *et al.*, 2021).

Segundo Bledzki e Gassan (1999), a extrusão de materiais compósitos apresenta diversas vantagens em relação a outros processos de fabricação, especialmente no que diz respeito à redução de custos. Isso se deve principalmente ao fato de que a extrusão permite a produção de peças com geometrias complexas, sem a necessidade de ferramentas caras. Além disso, a extrusão é um processo contínuo, o que significa que pode ser facilmente integrado às linhas de produção automatizadas, reduzindo o tempo de ciclo e o custo final do produto (SILVA; WANG, 2022).

A escolha dos parâmetros de processo é fundamental para a obtenção de materiais compósitos de alta qualidade por extrusão. Segundo Harper e Grove (2006) a velocidade de rotação da rosca e o tipo e quantidade de aditivos são alguns dos parâmetros que afetam diretamente as propriedades do compósito final. A seleção adequada desses parâmetros, juntamente com a escolha dos materiais de matriz e de reforço, é crucial para garantir a qualidade final do produto e maximizar o desempenho mecânico e térmico do compósito (HARPER E GROVE, 2006).

No caso do fibrocimento, o processo de extrusão começa com a mistura das matérias-primas - cimento, água, fibras de reforço e aditivos - em uma massa homogênea. Essa massa é então colocada em uma extrusora, que é uma máquina que age sobre a massa através de uma matriz com uma abertura no formato desejado para a chapa de fibrocimento.

A matriz é um molde que dá forma à massa, produzindo uma chapa de fibrocimento com uma espessura e largura específicas. O processo de extrusão é contínuo, o que significa que as chapas de fibrocimento são produzidas em comprimentos contínuos que podem ser cortados no tamanho desejado após a extrusão.

Depois que a chapa é extrudada, ela é curada em um ambiente úmido por um período de tempo para que o cimento endureça completamente. Depois disso, a chapa pode ser cortada em tamanhos menores e moldada de acordo com as necessidades do projeto.

2.5 Fibrocimento e Resíduos Poliméricos

Os estudos relacionados à combinação de fibrocimento com resíduos poliméricos representam uma área de pesquisa em crescimento, impulsionada pela busca por soluções sustentáveis na construção civil e em diversas outras indústrias (SOUZA, 2014; FIORINI, 2019; FERREIRA, 2023). Isto porque, principalmente a indústria da construção, consome mais da metade das matérias-primas mundiais, chegando a 3 bilhões de toneladas por ano, e é responsável por uma alta geração de resíduos. Em uma escala global têm-se produção de 4,4 bilhões de

toneladas de cimento podendo chegar até 5,5 bilhões de toneladas em 2050 (DANISH *et al.*, 2022).

Os compósitos reforçados com fibras plásticas recicladas sugerem uma produção mais limpa, onde estas são capazes de alterar as propriedades do material cimentício (MING *et al.*, 2021). Para tanto variáveis como morfologia, composição química e propriedade mecânica das fibras são importantes na determinação de propriedades finais do compósito, assim como a quantidade e a dispersão das mesmas na matriz. Dessa forma, em quantidades e processamentos ideais o reforço de fibrocimento com materiais plásticos reciclados pode resultar em um aumento da capacidade de carga, resistência residual, tenacidade e absorção de energia no produto final (BALEA *et al.*, 2021).

É importante notar que os resíduos poliméricos podem ter várias origens, e os resíduos de carro são apenas um dos tipos possíveis de resíduos poliméricos. Portanto, os estudos envolvendo fibrocimento podem abranger diferentes fontes de resíduos, ampliando as possibilidades de aplicação e de projetos de pesquisa e, por isso, as pesquisas nesse campo abordam diversas questões (SOUZA, 2020).

Mendes *et al.* (2021) estudaram a utilização de resíduos poliméricos como reforço de fibrocimento extrusado, eles utilizaram resíduos de pneus e Politereftalato de etileno (PET) em substituição ao cimento em 1, 2, 3, 4 e 5% em peso para avaliar as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de durabilidade. Após 28 dias de cura e envelhecimento acelerado o material foi analisado quanto as propriedades de densidade, absorção de água, porosidade, módulo de ruptura, módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade, tenacidade e condutividade térmica. Os resultados mostraram que a utilização de até 3% de resíduos de pneus e até 5% de PET no fibrocimento obtiveram uma otimização das propriedades físicas e mecânicas. Em relação a resistência mecânica após o envelhecimento acelerado o PET obteve melhores resultados, enquanto os resíduos de pneu incorporados resultou em uma maior tenacidade e menor condutividade térmica.

Farrapo *et al.* (2017) estudaram a produção de fibrocimento reforçado com resíduos de garrafa PET associado à celulose, eles investigaram o efeito da granulometria do PET nas propriedades finais do compósito. As formulações utilizadas avaliaram 5% de polpa de celulose e 2,5% de polpa mais 2,5% de PET em diversas granulometrias. Foram realizados ensaios mecânicos, físicos e microestruturais, antes e após ciclos de envelhecimento. Os resultados mostraram que o fibrocimento sem adição de PET obteve desempenho mecânico melhor quando não passou por ciclos de envelhecimento enquanto as amostras que continham o PET obtiveram melhores desempenhos em relação ao anterior. Isto ocorreu porque no compósito

com partículas de PET a degradação do mesmo é mais lenta que a da celulose quando estão no ambiente alcalino. De um modo geral, o tamanho de partícula do PET não teve efeito significativo nas propriedades mecânicas, entretanto obteve efeito nas propriedades físicas como menor densidade e porosidade aparente para partículas grossas e maiores, e demonstraram serem adequados como reforço de fibrocimentos.

Suksiripattanapong *et al.* (2022) estudaram o compósito cimentício utilizando resíduos de polímeros reciclados, eles utilizaram o polipropileno como reforço, sendo utilizada a mistura de material virgem e reciclado em forma de fibras. A investigação se deu por meio de ensaios de resistência à compressão e flexão, lixiviação e tenacidade. Os resultados mostraram que o compósito reforçado obteve melhoria nas propriedades de resistência à compressão e flexão e também à tenacidade em comparação ao padrão. Além disso, o compósito com 100% de fibra reciclada não obteve requisitos de resistência à compressão para utilização como pavimento.

Os resíduos sólidos plásticos advindos de diversos setores industriais resultam em uma geração de 300 milhões de toneladas onde apenas 7% são reciclados. Dessa forma, a sua utilização como reforço em materiais cimentícios tem um grande potencial para resultar em produtos mais ecológicos. O uso desses materiais em um compósito cimentício é feito de maneira que este podem substituir agregados ou então serem utilizados como fibras de reforço, o que resulta diretamente em uma diminuição de uso de novos recursos naturais além da redução do peso do produto final. Neste contexto, vantagens como a redução de custos com mineração e transporte, além da redução da poluição e emissão de gases de efeito estufa nos processos vão de encontro com uma engenharia sustentável onde se busca reduzir os impactos ambientais e obter uma eco-eficiência favorecendo os aspectos socioeconômicos (NYIKA; DINKA, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os resíduos poliméricos de fios de carros foram obtidos de uma recicladora da cidade de Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil. Para produção dos compósitos foi utilizada cimento CPV e calcário agrícola, além dos aditivos hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e um aditivo de viscosidade de alto desempenho de poliéster carboxílico (ADVA).

3.2 Métodos

3.2.1 Granulometria das fibras

A granulometria dos resíduos poliméricos foi avaliada com uma série de peneiras com malhas de tamanhos diferentes (16/20/40/50/70/100 mesh), que foram empilhadas em ordem decrescente de tamanho de partículas e realizado o agitação (Figura 1). A quantidade de material retido em cada peneira foi pesada e calculada a porcentagem de material retido em cada peneira. A partir desses dados, foi possível entender que não seria necessário um estudo maior pois não tivemos uma grande separação das partículas as quais ficaram mais de 80% do material na primeira e segunda peneira (16/20 mesh).

Figura 1 - Análise de granulometria: (a) peneiras utilizadas; (b) material.



Fonte: Autor, 2023.

3.2.2 Produção dos fibrocimentos

Os compósitos foram produzidos por extrusão (Figura 2 e 3). Os compósitos controles foram produzidos com 70% de cimento Portland CPV-ARI (ASTM C150/C150M – 20, ASTM 2020) e 30% calcário agrícola moído. HPMC e ADVA foram aplicados como modificadores reológicos, ambos com 1% em relação a massa de cimento (TEIXEIRA *et al.*, 2020; EUGENIO *et al.*, 2023). Para os demais tratamentos foram avaliadas as porcentagens de reforço de 1, 2, 3, 4 e 5% (massa/massa) em substituição a quantidade de cimento. Para cada formulação foram utilizadas 6,5 kg de massa total. A relação água / cimento utilizada foi de 0,35.

As matérias-primas foram pesadas e em seguida foram homogeneizadas em uma bateadeira planetária com rotação de 285 rpm. O material misturado foi então processado em extrusora helicoidal Natreb LTB-85 (Santa Catarina, Brasil), utilizando uma rosca com diâmetro de 100/130 mm, comprimento de 673 mm e velocidade de rosca de 32 rpm.

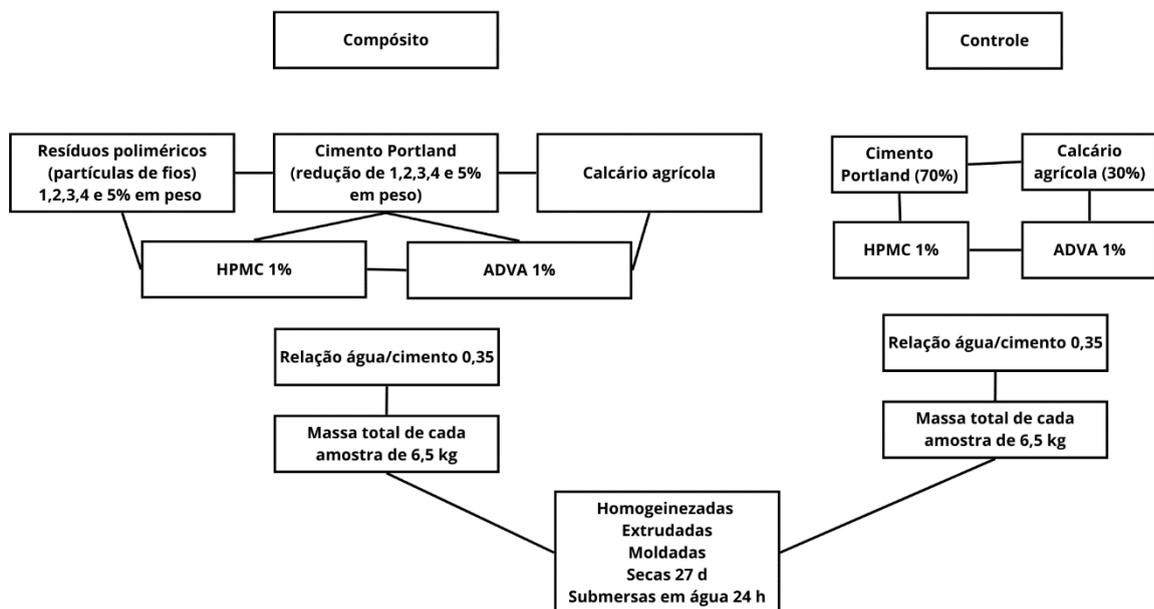
Os fibrocimentos foram produzidos com dimensões de 250 mm x 50 mm x 15 mm x (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Após a moldagem, os compósitos foram armazenados em câmara saturada à temperatura ambiente por 27 dias. Após esse período foi submerso em água por 24h para posterior realização dos ensaios físicos e mecânicos.

Figura 2 - Produção dos compósitos.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3 – Fluxograma.



Fonte: Autor, 2023.

3.2.3 Propriedades físicas

Para a determinação das propriedades físicas, foram realizados os ensaios físicos de absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente. Para cada tratamento foram utilizados sete corpos de prova. Os ensaios seguiram os procedimentos especificados pela norma ASTM C 948 -81 (2001). Com isso foram calculados os valores seguindo as equações 1, 2 e 3.

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde: M_u : Massa úmida e M_s : Massa seca.

$$\text{Densidade aparente} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_s \times \text{pw}}{M_u - M_i} \quad (2)$$

Onde: M_s : Massa seca; pw: Densidade do líquido em que as amostras foram imersas; M_u : Massa úmida e M_i : Massa imersa.

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde: M_u : Massa úmida; M_s : Massa seca e M_i : Massa imersa.

3.2.4 Propriedades mecânicas

Para a realização do ensaio mecânico, as amostras foram colocadas na máquina de ensaio da marca Instron (Figura 4), com célula de carga de 10KN. A distância entre os apoios foi de 15 cm e a velocidade de aplicação 2 mm por minuto, conforme RILEM (1982). Para cada tratamento foram utilizados sete corpos de prova.

Figura 4 - Máquina de ensaio universal Instron.



Fonte: Autor, 2023.

Mediante o ensaio de flexão foram determinadas as propriedades de módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e tenacidade. Para calcular as duas primeiras propriedades foram utilizadas as equações 4 e 5, respectivamente. Já para a tenacidade foi realizado o cálculo da área do gráfico gerado através do software Origin.

$$\text{Módulo de ruptura (MPa)} = \frac{3 \times C_{\text{máx}} \times \text{vão}}{2 \times b \times d^2} \quad (4)$$

Onde: $C_{m\acute{a}x}$ = Ponto máximo da carga aplicada; $v\tilde{a}o$ = Distância das duas pontas onde o material foi colocado para o teste; b = Comprimento do corpo de prova e d = espessura do corpo de prova.

$$\text{Módulo de elasticidade} = \frac{v\tilde{a}o \times (C2 - C1)}{4 \times (D2 - D1) \times b \times d^3} \quad (5)$$

Onde: $C(1, 2)$ = Dois pontos distintos referentes a carga aplicada (no regime elástico); $D(1,2)$ = Dois pontos distintos referentes ao deslocamento (no regime elástico); $v\tilde{a}o$ = Distância das duas pontas onde o material foi colocado para o teste; b = Comprimento do corpo de prova e d = espessura do corpo de prova.

3.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram avaliados em um delineamento inteiramente casualizado, onde as propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas mediante a realizao de análise de variância e de regressão, ambos a 1 e 5% de significância. Os dados foram avaliados utilizando o software Sisvar®.

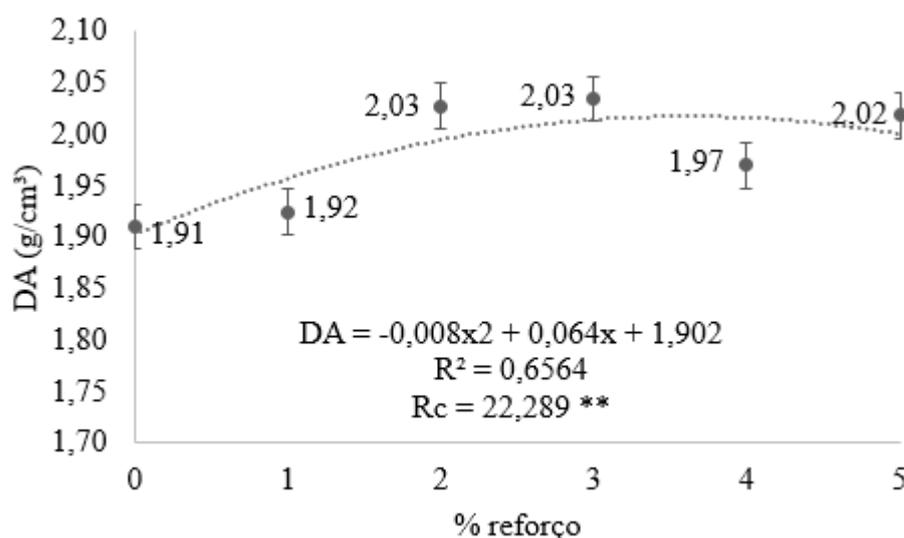
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas

4.1.1 Densidade

Os resultados de densidade aparente (DA) dos fibrocimentos em função da porcentagem de reforço com partículas poliméricas oriundas de resíduos de fios de carros podem ser observados na Figura 5. Houve variação significativa da DA em função da variação da porcentagem de reforço. Foi observado aumento significativo da densidade dos fibrocimentos sem reforço em relação aos fibrocimentos produzidos com porcentagem de reforço superior a 1%. É possível verificar ainda que os maiores valores de DA foram observados com os fibrocimentos produzidos com 2 e 3% de reforço, seguindo de uma queda significativa para os fibrocimentos com 4% de reforço e posterior aumento da densidade com os fibrocimento com 5% de fibras poliméricas.

Figura 5 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a densidade aparente dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

As partículas de fios poliméricos são compostas principalmente de PE, PP e PVC, sendo este último o de maior quantidade, eles apresentam densidade de aproximadamente 0,917-0,965, 0,90-0,91 e 1,30-1,58 g/cm³, respectivamente (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). Essa densidade reflete na tendência de aumento dos valores dos compósitos devido à maior

densidade do PVC, contudo, a variação na densidade aparente pode ser explicada pela interação complexa entre as partículas poliméricas e a matriz de fibrocimento. Quando as partículas são incorporadas, elas podem não se misturar homogeneamente com a matriz de cimento CPV e calcário, o que pode levar a uma menor compactação do material e à presença de vazios ou espaços entre as partículas, resultando em uma densidade aparente ligeiramente reduzida (FONSECA et al., 2021).

Mendes *et al.* (2021) ao avaliarem o reforço com fibrocimento com resíduos de PET e pneu, também observaram aumento dos valores médios da densidade dos compósitos, sendo observado para ambos os resíduos aumento da densidade até a quantidade de 3% de reforço, seguido de queda dos valores médios da densidade para as demais concentrações. Martinelli *et al.* (2023) revisaram a utilização de fibra de coco e malha têxtil em compósitos cimentícios, eles relataram diversos estudos que mostraram que o aumento do teor de reforço incorporado no sistema diminui a densidade aparente do compósito.

Oliveira e Castro-Gomes (2011) estudaram as propriedades de compósitos cimentícios reforçados com PET reciclado, eles relataram uma baixa diminuição da densidade com o aumento do teor de reforço, sendo ela menor que 5% de modo que não há alteração significativa. O PVC é um material com potencial de aglomeração ao ser incorporado em compósitos cimentícios, o que pode afetar fortemente as propriedades do mesmo (ISLAM *et al.*, 2023).

É importante mencionar que a densidade aparente é uma propriedade importante na construção civil, pois influencia diretamente a resistência e a durabilidade do material (REIS; COSTA, 2021). Portanto, a análise desses resultados sugere que a adição de partículas poliméricas ao fibrocimento deve ser cuidadosamente otimizada para evitar uma redução significativa na densidade aparente, ao mesmo tempo em que se beneficia das propriedades aprimoradas que essas partículas podem conferir, como a resistência mecânica e a durabilidade.

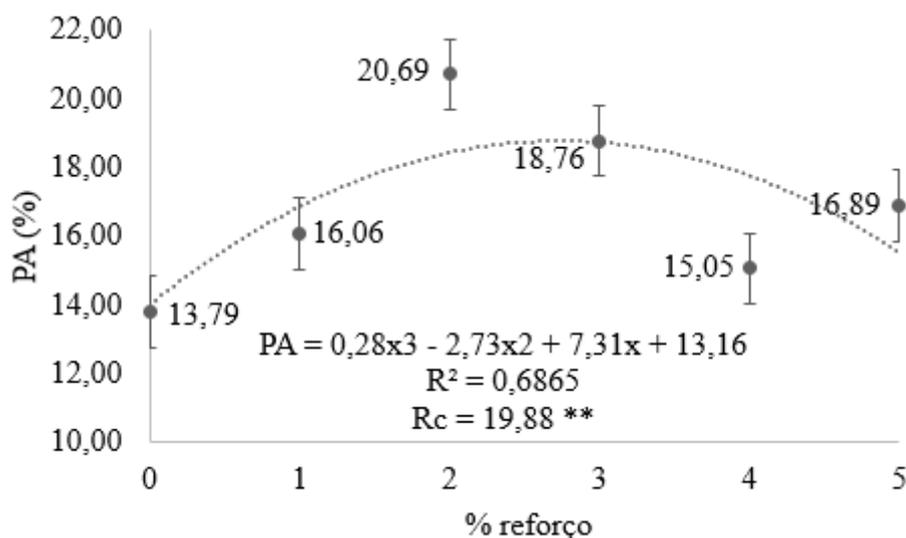
4.1.2 Porosidade aparente

Os resultados da porosidade aparente (PA) dos compósitos de fibrocimento reforçados com resíduos de fios de carros pode ser visualizado na Figura 6. Observou-se efeito significativo da porcentagem de reforço com resíduos de fibras de carro sobre a porosidade dos compósitos. Houve aumento dos valores médios até a concentração de 2%, seguido de redução dos valores de porosidade. Porém, mesmo com a redução da porosidade nas concentrações de

4 e 5% os valores de porosidade observados foram superiores aos materiais sem reforço.

Lertwattanaruk e Suntijitto (2015) destacam que quanto maior a adição de partículas, maior a porosidade será do compósitos, e que esse aumento na porosidade é resultado da presença de mais defeitos na homogeneização do reforço na mistura cimentícia.

Figura 6 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a porosidade aparente dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

A adição de partículas poliméricas ao fibrocimento pode impactar negativamente a compactação da matriz, levando a um aumento da porosidade aparente. Isso ocorre devido à formação de espaços vazios entre partículas, resultando em uma diminuição da coesão interna do fibrocimento.

A porosidade presente em compósitos de cimento são devido à heterogeneidade, multifase e fragilidade dos mesmos, além dos interespaços decorridos do produto de hidratação do cimento que não é preenchido por solução da hidratação inicial (WEI *et al.*, 2020). Além disso, Costa *et al.* (2019) afirmam que a incorporação de reforço em compósitos cimentícios favorece a formação de poros na interface entre o reforço e a matriz.

Visto que os fios poliméricos são, em sua maioria, formados por PVC, Hu *et al.* (2021) estudaram as propriedades do compósito cimentício híbrido, sendo utilizado o PVC, o PP e o Poli (álcool vinílico) (PVA) como reforço, dentre as diversas análises realizadas por eles, a investigação da porosidade do compósito mostrou que a adição de PVC tende a aumentar a estrutura dos poros resultando em poros médios e grandes.

Além disso, a adição de reforços em peso substituindo o cimento faz que haja uma diminuição do mesmo, que é o principal ligante, o que também favorece o aumento da

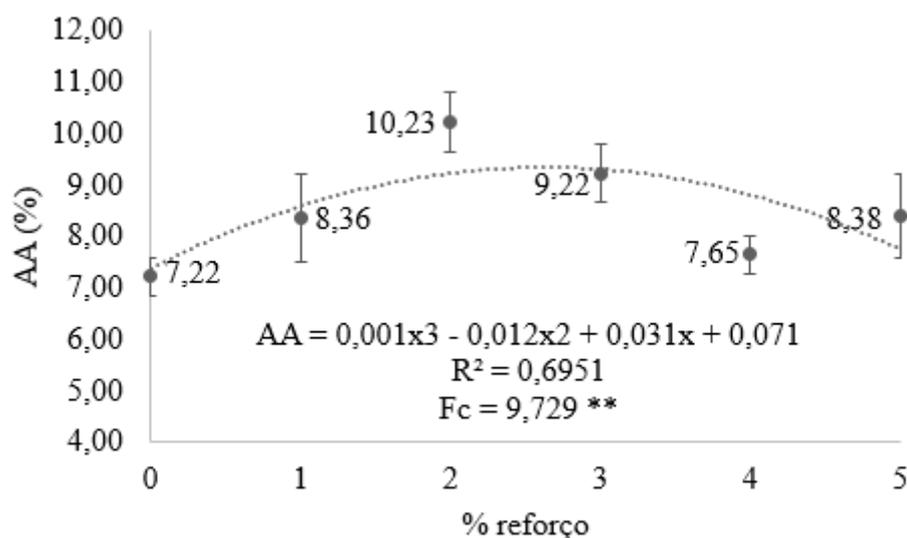
porosidade aparente visto que há uma maior quantidade de material que pode influenciar no processo de hidratação do compósito (DARWEESH, 2020).

Assim, essa porosidade pode ser resultado da menor interação entre as partículas poliméricas e também entre as partículas de reforço e a matriz de fibrocimento, assim a presença dessas partículas durante o processo de extrusão leva à formação de espaços vazios. Contudo, esses fatores dependem muito do processo, e da interação desse material durante a sua mistura, o que dependendo pode vir a gerar melhor interação entre as partículas e o reforço, como foi possível observada com uma certa melhora da porosidade nos fibrocimentos com 4% de reforço.

4.1.3 Absorção de água

Os valores de absorção de água (AA) dos fibrocimentos em função da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros podem ser observados na Figura 7. Observou-se que houve efeito significativo da porcentagem de reforço sobre a propriedade de AA. É possível verificar aumento dos valores de AA até a porcentagem de 2%, seguido de queda dos valores médios. Assim como observado para a propriedade de porosidade dos compósitos, os menores valores observados foram para os fibrocimentos com 4% de reforço. Demonstrando uma melhor interação entre as partículas de fios de carro nessa porcentagem, e também entre o reforço e a matriz cimentícia.

Figura 7 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a absorção de água dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

Os resultados demonstram que característica da fibra e sua porcentagem pode influenciar a AA, devido a interação fibra-matriz. Dessa forma quando ocorre a dispersão de reforços em uma matriz ocorre um aumento das zonas interfaciais fazendo com que haja um aumento da AA conforme aumenta a quantidade de reforço devido ao maior número de espaços vazios (SANTOS *et al.*, 2022). Os resultados indicam que a adição de partículas poliméricas aumentaram a AA devido à esses efeitos adversos da incorporação, além disso pode criar caminhos preferenciais para a penetração de água nos poros do material e também pode ocorrer uma baixa aderência efetiva entre as partículas poliméricas e a matriz de fibrocimento.

Esse aumento de AA está relacionado a porosidade e permeabilidade do material que podem resultar em uma maior capacidade de penetração de água, o que pode vir a comprometer a resistência do material. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Souza (2014) e Cruz (2020), que afirmam que a incorporação de partículas poliméricas no fibrocimento pode levar a um aumento significativo na absorção de água, devido à formação de canais de penetração de água nos poros do material.

Hu *et al.* (2021) relataram um aumento de absorção de água quando foi inserido maior quantidade de PP e PVC no compósito cimentício e eles relacionaram essa maior absorção à maior quantidade de poros do material. Dessa forma, o estudo realizado por eles corrobora com os resultados obtidos neste estudo, pois houve um aumento tanto de PA quanto de AA.

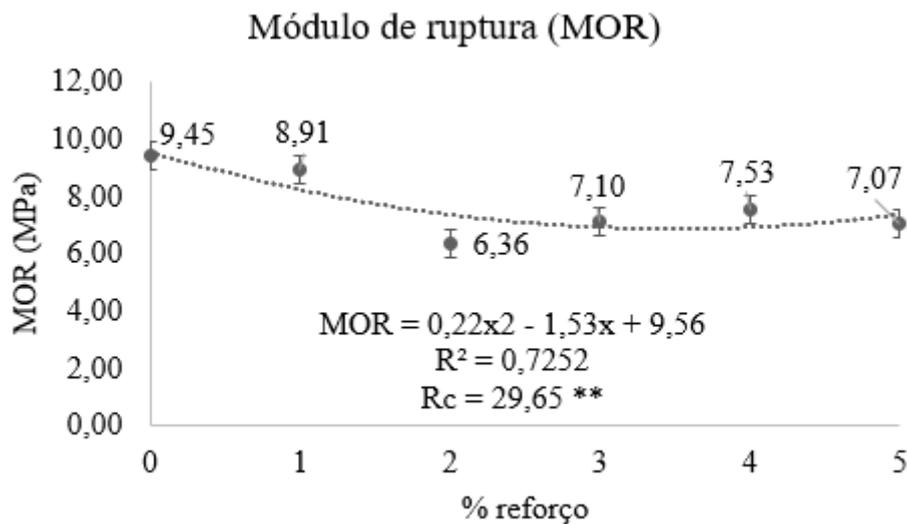
A norma NBR 7581-1 (ABNT 2014) estabelece valor máximo de 37% para a AA de fibrocimento isento de amianto. Todos os tratamentos atenderam aos critérios determinados pela norma para a propriedade de absorção.

4.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Módulo de Ruptura

Os valores obtidos para MOR à flexão estática dos fibrocimentos em função da porcentagem de reforço com resíduos de partículas de fios de carro podem ser visualizados na Figura 8. Observa-se que houve efeito significativo da variação de reforço sobre o MOR dos compósitos, sendo verificado redução significativa dos valores a medida que aumentou a porcentagem de partículas de resíduos de fios de carro utilizado.

Figura 8 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre Módulo de ruptura dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se interação direta com os resultados de PA, pois o menor valor obtido para MOR foi para o tratamento com 2% de resíduo, o qual obteve o maior valor de porosidade (Figura 6). De acordo com Raabe (2019), o aumento da porosidade e da absorção de água em compósitos de fibrocimento com partículas poliméricas enfraquece a estrutura, comprometendo a resistência à flexão do material, como foi latente em nossos resultados. Isso ocorre porque a presença de vazios e espaços entre as partículas enfraquece a estrutura do material, reduzindo sua capacidade de resistir a cargas de flexão. Essa fragilização da estrutura torna o material mais suscetível a fraturas e falhas sob cargas de flexão.

Ruiz-Herrero *et al.* (2016) estudaram o desempenho mecânico de compósitos cimentícios utilizando resíduos de fios elétricos, onde realizaram a separação dos polímeros presentes do mesmo os quais são, em sua maioria, PVC e PE com pequenos traços de outros polímeros. A incorporação do reforço na matriz foi realizada separadamente e por meio de uma mistura de ambos. Os resultados mostraram que o MOR de todas as amostras ficaram abaixo da amostra controle, entretanto também foi possível observar que o aumento da quantidade de reforço diminuiu ainda mais o desempenho do material.

Záleská *et al.* (2018) estudaram a incorporação de resíduos de PP em compósitos cimentícios, eles relataram que o aumento da quantidade de reforço diminuiu a resistência à flexão do compósito. A justificativa para a diminuição da propriedade foi a propriedade do

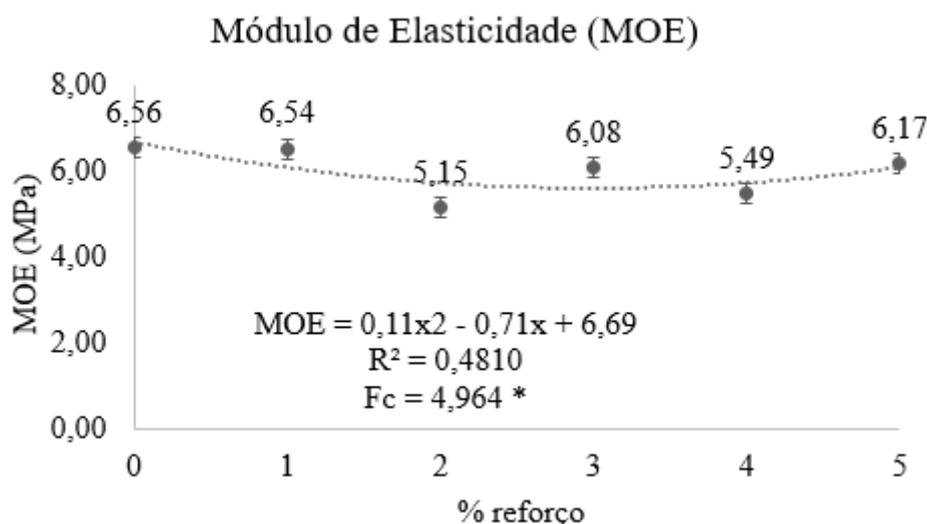
material plástico que possui uma resistência mais baixa e também a interação fraca entre o reforço e a matriz cimentícia que resulta em menores propriedades mecânicas no compósito.

A Norma NBR 15498 (ABNT 2016) estabelece para fibrocimentos planos sem amianto os valores para classe A, que são adequados para aplicações externas diretamente afetado pela luz solar, chuva, umidade e calor, de 4 MPa para categoria 2, 7 MPa para categoria 3 e 13 MPa para categoria 4. Dessa forma, com exceção dos fibrocimentos com 2% de reforço que atendem apenas a categoria 2, os demais tratamentos, mesmo com a redução dos valores em relação ao controle, atendem as especificações para classe 3.

4.2.2 Módulo de elasticidade

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática dos fibrocimentos reforçados com resíduos de fios de carros podem ser visualizados na Figura 9. O MOE foi influenciado significativamente pela concentração de resíduos utilizados, sendo verificado diminuição dos valores a medida que houve o aumento da concentração. Assim como verificado para o MOR, os fibrocimentos com 2% de reforço obtiveram os menores valores médios.

Figura 9 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre Módulo de Elasticidade dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

Esses resultados podem ser explicados pela presença de porosidade e vazios no material, decorrentes do aumento da porosidade aparente. Essa porosidade interna reduz a rigidez

estrutural do material, resultando em uma menor capacidade de suportar cargas e deformações elásticas (NOURI *et al.*, 2021).

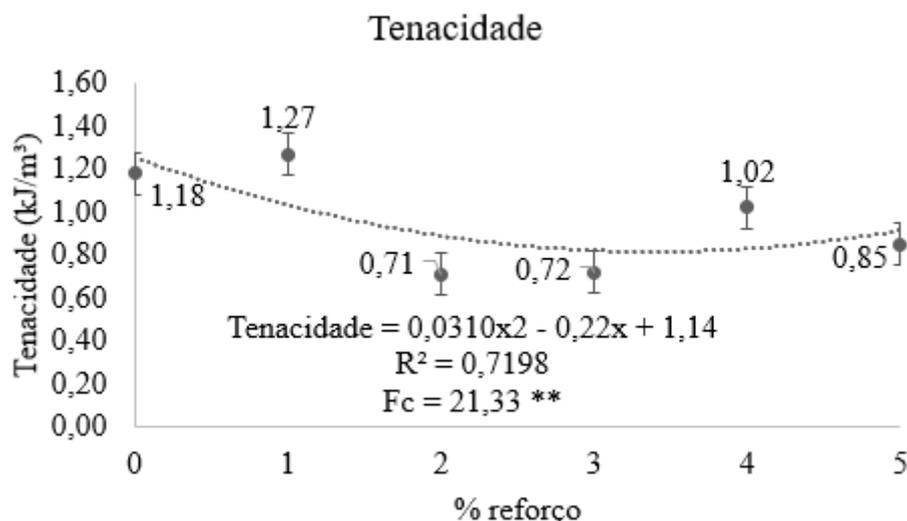
Smarzewski e Barnat-Hunek (2018) estudaram a adição de PP em um compósito cimentício, eles relataram uma diminuição do módulo elástico estático de 10% em relação à referência. Eles relataram que esse efeito adverso pode estar relacionado com a difícil dispersão do reforço na matriz de forma uniforme, onde pode haver aglomeração de partículas. Além disso, relataram que a interação entre reforço e matriz fraca favorece a diminuição das propriedades mecânicas.

Em resumo, os resultados do MOE refletem a influência negativa da porosidade nos compósitos de fibrocimento reforçados com resíduos de fios de carros. Esses fatores resultaram em uma diminuição da rigidez estrutural do material, afetando sua capacidade de retornar à forma original após a aplicação de uma força externa, o que é crítico para sua resistência e durabilidade. Portanto, a otimização dessas propriedades é fundamental ao desenvolver compósitos de fibrocimento para aplicações na construção civil.

4.2.3 Tenacidade

A tenacidade é uma propriedade importante na construção civil, uma vez que permite, dentre as características, segurança estrutural e durabilidade nas construções. Isso é fundamental, pois esses materiais sofrem fortes cargas e, com alta tenacidade, são capazes de resistir à indesejáveis fraturas do material (ALMEIDA; AUAD, 2019). Na Figura 10 é possível verificar o efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a tenacidade dos fibrocimentos. Observou-se efeito significativo da porcentagem de reforço sobre a tenacidade dos compósitos. Os fibrocimentos com 1% de reforço foram os únicos que obtiveram aumento dos valores em relação ao controle. Os fibrocimentos com 4% também se destacaram em relação aos tratamentos com 2, 3 e 5% de reforço, no entanto, com valores inferiores ao observados para os materiais sem reforço e com 1% de reforço.

Figura 10 - Efeito da porcentagem de reforço com resíduos de fios de carros sobre a tenacidade dos fibrocimentos.



Fonte: Autor, 2023.

O aumento da absorção de água e o aumento da porosidade aparente afeta negativamente a tenacidade do material. A presença de espaços vazios e uma estrutura mais frágil diminui a capacidade de absorção de energia antes da falha, resultando em uma menor tenacidade geral, tornando, dessa forma, o material mais susceptível à fratura (ALMEIDA; AUAD, 2019; QUININO, 2015). O mesmo foi observado nesse estudo com os tratamentos com 1 e 4% de reforço, pois foram os fibrocimentos com menores valores de porosidade e, por consequência, obtiveram os melhores valores de tenacidade.

Al-Tulaian, Al-Shannag e Al-Hozaimy (2016) estudaram a incorporação de resíduos plásticos reciclados em compósitos cimentícios, eles relataram um aumento da tenacidade em comparação ao padrão sem reforço, com valores crescentes com o aumento da porcentagem de reforço adicionado, onde obtiveram tenacidade de 0,40, 0,45, 0,51 MPa para 0,5, 1 e 1,5% de reforço, eles também observaram que o mecanismo de falha foi dúctil e com absorção de energia.

Chen *et al.* (2019) investigaram as propriedades mecânicas do compósito cimentício reforçado com PP reciclado, eles relataram uma relação flexão-compressão, que reflete a tenacidade, de aumento quando substitui 20, 40 e 60% de areia pelo reforço em que houve aumento de tenacidade de 6,47, 12,95 e 22,57%, respectivamente.

Merlo *et al.* (2020) estudaram a introdução de resíduos de PVC de cabos e fios em compósito cimentício. Os autores relataram uma queda das propriedades mecânicas com a introdução do reforço no compósito com uma relação não linear. Segundos os autores o

aumento da porosidade do material com a incorporação do PVC afeta o comportamento mecânico de forma negativa, além disso o menor desempenho do compósito pode estar relacionado à adesão fraca entre reforço e matriz.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica de utilizar fios de carros descartados como reforço em compósitos de fibrocimento extrudado, bem como investigar o impacto de diferentes concentrações desses reforços nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

A concentração do material afetou significativamente todas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Com aumento da quantidade de reforço, houve uma tendência de aumento da porosidade, e por consequência resultou em aumento da absorção de água e redução do MOR, MOE e Tenacidade dos fibrocimentos. Apesar disso, todos os tratamentos atenderam a norma NBR 7581-1 (ABNT 2014) para a propriedade de absorção, e de acordo com a norma NBR 15498 (ABNT 2016), que determina os valores de MOR, com exceção dos fibrocimentos com 2% de reforço que atendem apenas a categoria 2, os demais tratamentos, mesmo com a redução dos valores em relação ao controle, atendem as especificações para classe 3.

Os fibrocimentos reforçados com 1% de resíduos de fios de carros se destacaram em relação aos demais tratamentos, obtendo resultados próximos ao tratamento controle de densidade, Porosidade, absorção de água, MOR e MOE, e ainda obtendo valores de tenacidade superiores. Dessa forma, o estudo contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o uso de resíduos de fios de carros na produção de materiais de construção sustentáveis, além de fornecer possibilidades para destinação adequada e agregação de valor para esse resíduo.

REFERÊNCIAS

AHMAD, S. et al. A comparative study on the effect of carbon-based and ceramic additives on the properties of fiber reinforced polymer matrix composites for high temperature applications. **Ceramics International**, v. 47, n. 24, p. 33956-33971, 2021.

ALMEIDA, P. V. S.; AUAD, S. F. D. K. A importância da estrutura metálica na construção civil/The importance of metal structure in civil construction. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 23862-23869, 2019.

AL-TULAIAN, B.C.; AL-SHANNAG, M.J.; AL-HOZAIMY, A.R. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, vol. 127, p. 102-110, 2016.

AMARAL JÚNIOR, J. C.; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Matéria**, Rio de Janeiro, n. 22, v. 1, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM International). **ASTM C 948 - 81**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2001.

ANTUNES, L. H. **Corrosão em pistões automotivos através de técnicas eletroquímicas em solução de cloreto de sódio com diferentes concentrações**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2021.

ASHORI, A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. **Bioresource technology**, v. 99, n. 11, p. 4661-4667, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15210-1**: Telhas onduladas e peças complementares de fibrocimento sem amianto Parte 1: Classificação e Requisitos. Rio de Janeiro, p. 16, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15498**: Placas de fibrocimento sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **BR 7591-1**: Telha ondulada de fibrocimento Parte 1: Classificação e Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

BALEA, A. et al. Recycled Fibers for Sustainable Hybrid Fiber Cement Based Material: A Review. **Materials**, vol. 14, p. 2408, 2021.

BARBIERI, G. H.; AQUINO, A. D. Análise de resultados de auditorias ambientais de homologação de empresas de tratamento de resíduos sólidos, provenientes de uma indústria automobilística. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 4, p. 671-685, 2021.

BARBIRATO, G. et al. Desempenho térmico de bezerreiros cobertos com telha de fibrocimento e forro ecológico de subprodutos agroindústrias associado a materiais isolantes. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 9, n. 3, p. 261-267, 2015.

BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, A. **Concrete surface engineering**. Cambridge: CRC Press, 2018.

CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARMELO, G. F. **Estudo de Adesão entre Fibras Poliméricas e Vegetais em Matriz Cimentícia**: Caracterização Físico-Química e Mecânica. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de São Paulo, Pirassununga, 2021.

CHEN, H. et al. The Influence of Nano-SiO₂ and Recycled Polypropylene Plastic Content on Physical, Mechanical, and Shrinkage Properties of Mortar. **Advances in Civil Engineering**, vol. 2019, p. 12, 2019.

COSTA, F.B.P. et al. Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 213, p. 505-513, 2019.

COSTA NETO, L. P. da et al. Avaliação da influência da oxidação do cobre no processo de soldagem por ultrassom em componentes da indústria automotiva. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e20220224, 2023.

CRUZ, E. O. **Desempenho físico e mecânico de placas planas de fibrocimento modificadas com polímeros sintéticos e submetidos a distintos processos de cura**. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de São Paulo, Pirassununga, 2020.

DANISH, A. et al. Utilization of recycled carbon fiber reinforced polymer in cementitious composites: A critical review. **Journal of Building Engineering**, vol. 53, p. 104583, 2022.

DARWEESH, H.H.M. Cement Pastes Containing Polypropylene Fibers - Part I: Physical, Chemical and Mechanical Properties. To Chemistry Journal, vol. 6, 2020.

EHRENCRING, H. Z. **Comportamento de concretos reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas.** 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2017.

EUGÊNIO, T. M. C. et al. Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Construction and Building Materials.** v.63, p.105547, 2023.

FARRAPO, C.L. et al. Cellulose Associated with Pet Bottle Waste in Cement Based Composites. *Materials Research*, vol. 20, p. 1380-1387, 2017.

FERNANDES, A. P. **Potencial de utilização de resíduos de filmes poliméricos e de fibras de vidro provenientes do processo de fabricação de pás eólicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2019.

FERREIRA, T. N. da S. **O Uso de polímeros reciclados na construção civil:** uma proposta de habitação sustentável. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias. 2023. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2023.

FIORONI, C. A. **Avaliação da influência de diferentes métodos de cura na permeabilidade e no desempenho físico-mecânico de telhas de fibrocimento reforçadas com fibras poliméricas.** Tese (Doutorado em Engenharias de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

FONSECA, R. P. da. **Influência de diferentes tipos de fibras vegetais amazônicas no desempenho de uma argamassa à base de cimento Portland e Metacaulim.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

GARCIA, R. et al. **Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso do amianto no Brasil.** Dossiê Amianto Brasil. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=6D7A48F5E37BF9E0890451F24A3A6917.node1?codteor=769516&filename=REL+1/2010+CMADS>. Acesso em: 18 de maio de 2023.

HARPER, C. A.; GROVE, D. A. **Handbook of Plastic Processes.** Maryland: Wiley Interscience - A John Wiley and Sons, Inc, Publication, 2006.

HU, F.; CUI, X.; CHEN, W. Ultralong-CNTA-supported Pd-based anodes for ethanol oxidation. **The Journal of Physical Chemistry C**, n. 114, v. 47, p. 20284-20289, 2010.

IKAI, H. *et al.* Photolysis of hydrogen peroxide, an effective disinfection system via hydroxyl radical formation. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, n. 54, v. 12, p.5086-5091, 2010.

ISLAM, T. *et al.* Mechanical Properties of PVC Fiber-Reinforced Concrete—Effects of Fiber Content and Length. **Buildings**, vol. 13, p. 2666, 2023.

JIANG, D. *et al.* Effect of flame-retardant rice straw fibers on properties of fiber cement-based composites at high temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102923, 2021.

KUDER, G. K.; SHAH, S. P. Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. **Construction and Building Materials**, n. 1, v. 24, p. 181-186, 2010.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 664-669, 2015.

LIGOWSKI, E.; SANTOS, B. C. dos; FUJIWARA, S. T. Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão. **Polímeros**, v. 25, p. 70-75, 2015.

MARTINELLI, F.R.B. A Review of the Use of Coconut Fiber in Cement Composites. **Polymers**, vol. 15, p. 1309, 2023.

MENDES, R.F. *et al.* Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 28, p. 37217-37230, 2021.

MERLO, A. *et al.* Mechanical properties of mortar containing waste plastic (PVC) as aggregate partial replacement. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 13, 2020.

MING, Y. *et al.* A Comprehensive Review on the Utilization of Recycled Waste Fibers in Cement-Based Composites. **Materials**, vol. 14, p. 3643, 2021.

MIYAMARU SEO, E. S. *et al.* Preparação e caracterização das matérias primas utilizadas na fabricação de compósito cimentício. **InterfaceEHS**, v. 16, n. 1, 2021.

NASSAR, R. et al. Evaluation of refined cement-based matrix systems for extrusion of wood fiber cement. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 15, p. e00714, 2021.

NOURI, A. et al. Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 94, p. 196-215, 2021.

NYIKA, J.; DINKA, M. Recycling plastic waste materials for building and construction Materials: A minireview. **Materialstoday: Proceedings**, vol. 62, p. 3257-3262, 2022.

OLIVEIRA, L.A.P.; CASTRO-GOMES, J.P. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, vol. 25, p. 1712-1717, 2011.

OVALI, S.; SANCAK, E. Investigation of mechanical properties of jute fiber reinforced low density polyethylene composites. **Journal of natural fibers**, v. 19, n. 8, p. 3109-3126, 2022.

PELED, A.; HAH, S. P. Processing effects in cementitious composites. **Journal of materials in Civil Engineering**, n. 2, v. 15, p. 192-199, 2003.

PERROT, A. et al. Extrusion of cement-based materials - an overview. **RILEM Technical Letters**, vol. 3, p. 91-97, 2018.

PIETRAFESA, P. A.; BUENO, E. A. C.; BUENO, L. S. **O amianto e seus impactos no município de Minaçu**. Minaçu: GeoTextos, 2018.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RAABE, J. **Compósitos de fibrocimento com fibras de polpa celulósica modificada com fibra nano sílica**. Brasília: Editora UNB, 2019.

REIS, C. Z.; COSTA, D. Y. REUTILIZAÇÃO DE EPS NA ELABORAÇÃO DA ARGAMASSA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão**, p. e28551-e28551, 2021.

RILEM. MR-3. **The Complex Workability – Consistence – Plasticity**. France, 1982.

SANTOS, C. A. F. **A gestão dos resíduos eletroeletrônicos e suas consequências para a sustentabilidade.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grandedo Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, G.Z.B. et al. Circular alternatives in the construction industry: An environmental performance assessment of sisal fiber-reinforced composites. **Journal of Building Engineering**, vol. 54, p. 104603, 2022.

SCARPITTI, N. et al. Recycling Unrecycled Plastic and Composite Wastes as Concrete Reinforcement. **Journal of Composites Science**, vol. 7, p. 11, 2023.

SELVAMONY; RAVICHANDRAN, T. **Fibre-Reinforced Cementitious Composites (FRCC) for Infrastructure Applications.** *In: Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings.* Elsevier, 2017.

SEYMOUR, L. M. et al. Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancientRoman concrete. **Science Advances**, v. 9, n. 1, p. eadd1602, 2023.

SILVA, D. J.; WANG, S. H. Determinando a distribuição de tempo de residência em extrusora através de medidas de luminância. **OPEN SCIENCE RESEARCH IV**, v. 4, n. 1,p. 1274-1288, 2022.

Sisvar®. **Software estatístico.** Disponível em: <<https://des.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 5 de junho de 2023.

SOUZA, B. A. **Análise comparativa da qualidade de água de chuva escoada por um telhado convencional e percolada por um sistema vegetado.** 109 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2020.

SOUZA, R. B. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2014.

SUKSITIPATTANAPONG, C. et al. Utilization of Recycled Plastic Waste in Fiber Reinforced Concrete for Eco-Friendly Footpath and Pavement Applications. **Sustainability**, vol. 14, p. 6839, 2022.

TEIXEIRA, J. N.; SILVA, D.W.; VILELA, A. P.; SAVASTANO JR., H.; VAZ, L.E.V.S.B.;

MENDES, R. F. Lignocellulosic Materials for Fiber Cement Production. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, p. online first, 2018.

TEIXEIRA, T. S. **Utilização de resíduos suco-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TOLÊDO FILHO, R. D. *et al.* Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites. **Cement and concrete composites**, n. 22, v. 2, p. 127-143, 2000.

VIEYRA, H. *et al.* Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review. **Polymers**, vol. 14, p. 3412, 2022.

VILLANUEVA-REY, P. *et al.* Wiring in the automobile industry: Life cycle assessment of an innovative cable solution. **Journal of Cleaner Production**, vol. 204, p. 237-246, 2018.

WIEBECK, H.; BAHIANSE NETO, M.; PIVA, A. M. A Reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 4, p. 30-30, 2013.

WIECKA, R.; DUAILIBI, J. F. Extrusão em Cerâmica Vermelha: Princípios Básicos, Problemas e Soluções. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n. 3, p. 34-42, 2013.