



JOSE DE ARIMATÉIA ALMEIDA

**OTIMIZAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA PRODUÇÃO DE
TELHAS DE CONCRETO COM RESÍDUO DE MINERAÇÃO
REFORÇADAS COM MATERIAIS POLIMÉRICOS E
LIGNOCELULÓSICOS**

LAVRAS – MG

2025

JOSE DE ARIMATÉIA ALMEIDA

**OTIMIZAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA PRODUÇÃO DE TELHAS DE
CONCRETO COM RESÍDUO DE MINERAÇÃO REFORÇADAS COM
MATERIAIS POLIMÉRICOS E LIGNOCELULÓSICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

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

Almeida, Jose de Arimatéia.

Otimização de formulações para produção de telhas de concreto com resíduo de mineração reforçadas com materiais poliméricos e lignocelulósicos. / Jose de Arimatéia Almeida. - 2024.

152 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. sustentabilidade. 2. viabilidade econômica. 3. compósitos cimentícios. I. Mendes, Rafael Farinassi. II. Título.

JOSE DE ARIMATÉIA ALMEIDA

**OTIMIZAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA PRODUÇÃO DE TELHAS DE
CONCRETO COM RESÍDUO DE MINERAÇÃO REFORÇADAS COM
MATERIAIS POLIMÉRICOS E LIGNOCELULÓSICOS**

**OPTIMIZATION OF FORMULATIONS FOR PRODUCTION OF CONCRETE
TILES WITH MINING WASTE REINFORCED WITH POLYMERIC AND
LIGNOCELLULOSIC MATERIALS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de dezembro de 2024.
Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes - UFLA
Profa. Dra. Priscilla Abreu Pereira Ribeiro - UFLA
Prof. Dr. Alan Pereira Vilela - UNILAVRAS

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

**LAVRAS - MG
2025**

AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão que reconheço todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes, pelo apoio, paciência e valiosa orientação ao longo de toda a pesquisa. À minha esposa, pelo incentivo constante e suporte incondicional, meu profundo agradecimento. Aos colegas e amigos que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado durante essa jornada, meu sincero muito obrigado. Sou grato às entidades de fomento FAPEMIG (PQ-01237-21), CNPq (305662/2021-1), FINEP e CAPES, bem como à Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e ao Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis (CIMS), pelo suporte essencial à realização deste estudo. Por fim, expresso meu reconhecimento aos membros da banca examinadora, doutores que generosamente dedicaram seu tempo, conhecimento e atenção à avaliação deste trabalho.

RESUMO

O Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo. Com o crescimento da população mundial e sua avidez por consumo aliados às necessidades crescentes das indústrias de processamento de aço, aumenta também a geração de resíduos, sendo necessárias novas técnicas para reutilização do material, evitando a disposição final em barragens de contenção, visto que o colapso dessas barragens tem causado danos ambientais e sociais ao redor do mundo nas últimas décadas. A pesquisa avaliou a substituição total do pó de pedra calcária (PPC) e parcial do cimento por resíduo de minério de ferro (RMF) em telhas de concreto reforçadas com resíduos poliméricos e lignocelulósicos. O tratamento controle utilizou 27,15% de cimento, 60,85% de areia e 12% de PPC. Outros tratamentos testaram substituições de PPC e cimento por RMF, em diferentes proporções, e o uso de resíduos de polipropileno (PP), PET e madeira de *Pinus* (0,5% de cada) como reforços. As telhas foram curadas por 28 dias e avaliadas quanto às propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e microestruturais antes e após envelhecimento acelerado. A viabilidade econômica também foi analisada. Diante dos resultados pôde-se concluir que para substituição tanto do PPC quanto do cimento por RMF em formulações distintas o RMF teve impacto positivo, principalmente no aumento da resistência mecânica após envelhecimento, além de reduzir custos de produção e manter as propriedades térmicas e acústicas. A incorporação de PP e PET elevou os custos, mas o PP melhorou as propriedades mecânicas, enquanto as fibras de *Pinus*, embora econômicas, reduziram a resistência mecânica e aumentaram a condutividade térmica. Para a substituição simultânea de PPC e cimento por RMF resultou em aumento da absorção de água e porosidade, com leve redução na densidade e peso seco. O RMF também melhorou a resistência à flexão após envelhecimento, mantendo os custos baixos. A condutividade térmica teve elevação inicial, mas reduziu após envelhecimento, enquanto o desempenho acústico apresentou leve queda. A norma ASTM C1492-3 foi plenamente atendida para todos os tratamentos. O uso de *Pinus* nas formulações com RMF destacou-se pela resistência à flexão após envelhecimento e pela redução de custos. As telhas reforçadas com PP apresentaram os melhores resultados em resistência à flexão sem RMF, seguidas pelo PET. Ambos os materiais, apesar de aumentarem os custos de produção, mostraram melhorias no isolamento acústico aos 28 dias de cura.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; viabilidade econômica; sustentabilidade; propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

Brazil has one of the largest iron ore reserves in the world. With the growth of the global population and its increasing consumption demands, combined with the growing needs of steel processing industries, there is also an increase in the generation of waste, requiring new techniques for material reuse. This helps avoid final disposal in containment dams, as the collapse of these dams has caused environmental and social damage worldwide in recent decades. The research evaluated the total replacement of limestone powder (PPC) and partial replacement of cement with iron ore waste (RMF) in concrete roof tiles reinforced with polymeric and lignocellulosic residues. The control treatment used 27.15% cement, 60.85% sand, and 12% PPC. Other treatments tested different proportions of PPC and cement replacement with RMF, and the use of polypropylene (PP), PET, and pine wood residues (0.5% each) as reinforcements. The tiles were cured for 28 days and evaluated for physical, mechanical, thermal, acoustic, and microstructural properties before and after accelerated aging. The economic viability was also analyzed. The results concluded that replacing both PPC and cement with RMF in distinct formulations had a positive impact, mainly in increasing mechanical resistance after aging, as well as reducing production costs and maintaining thermal and acoustic properties. The incorporation of PP and PET increased costs, but PP improved the mechanical properties, while pine fibers, although economical, reduced mechanical resistance and increased thermal conductivity. The simultaneous replacement of PPC and cement with RMF resulted in increased water absorption and porosity, with a slight reduction in density and dry weight. RMF also improved flexural strength after aging while maintaining low costs. Thermal conductivity increased initially but reduced after aging, while acoustic performance showed a slight decrease. The ASTM C1492-3 standard was fully met for all treatments. The use of pine in RMF formulations stood out due to the increased flexural strength after aging and cost reduction. PP-reinforced tiles showed the best flexural strength results without RMF, followed by PET. Both materials, despite increasing production costs, showed improvements in acoustic insulation at 28 days of curing.

Keywords: cementitious composites; economic viability; sustainability; physical and mechanical properties.

INDICADORES DE IMPACTO

Socialmente, a reutilização dos resíduos na produção de telhas reduz riscos ambientais e sociais como rompimentos de barragens, e fomenta empregos no setor de reciclagem. No campo tecnológico, a substituição de materiais convencionais por RMF melhora propriedades das telhas, incentivando a inovação na construção civil. Economicamente, a redução de custos com a substituição do cimento e do PPC torna os produtos mais acessíveis e diminui a extração de recursos naturais. Culturalmente, a pesquisa incentiva a economia circular e a valorização de resíduos na construção civil, reforçando a importância da inovação sustentável. Assim, os resultados desta pesquisa contribuem para soluções técnicas eficientes e promovem impactos sociais, econômicos e ambientais positivos, alinhados aos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU): ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

IMPACT INDICATORS

Socially, the reuse of waste in tile production reduces environmental risks, such as dam failures, and fosters employment in the recycling sector. Technologically, replacing conventional materials with iron ore mining waste (RMF) enhances tile properties, encouraging innovation in the construction industry. Economically, cost reduction through the substitution of cement and limestone powder (PPC) makes products more affordable and decreases the extraction of natural resources. Culturally, the research promotes a circular economy and the valorization of waste in construction, reinforcing the importance of sustainable innovation. Thus, the results of this research contribute to efficient technical solutions and generate positive social, economic, and environmental impacts, aligning with the following United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPITULO I

Figura 1 - Profundidade do perfil.	19
Figura 2 - Telha produzida pelo processo de extrusão.	20

CAPITULO II

Figura 1 - Processo para análise de aptidão.	42
Figura 2 - Processo de produção das telhas de concreto.	45
Figura 3 - Processo para ensaio térmico da telha de concreto.	48
Figura 4 - Elementos de processo utilizados para realização do ensaio acústico.	49
Figura 5 - Curvas granulométricas para o RMF, PPC e cimento Portland.	53
Figura 6 - Resistência a compressão no ensaio de pozolanicidade.	55
Figura 7 - Curva de inibição para os componentes inseridos na formulações.	59
Figura 8 - Densidade aparente aos 28 dias considerando o efeito do RMF e dos reforços.	61
Figura 9 - Difrátogramas de raio X para os componentes utilizados nas formulações.	72
Figura 10 - Difrátogramas de raio X para os tratamentos nos quais não foi inserido RMF.	74
Figura 11 - Difrátogramas de raio X para substituição de 100 % do PPC por RMF.	75
Figura 12 - Difrátogramas de raio X para substituição de 10 % do cimento por RMF.	75
Figura 13 - Carga de ruptura à flexão para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.	77
Figura 14 - Condutividade térmica após envelhecimento considerando o efeito dos reforços e do RMF nos compósitos de forma independentes.	80
Figura 15 - Barreira acústica das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado considerando o efeito dos reforços e do RMF nos compósitos de forma independentes.	82
Figura 16 - Impacto financeiro sobre as formulações avaliadas.	85

CAPÍTULO III

Figura 1 - Partículas lignocelulósicas e poliméricas para mensuração das dimensões.	105
Figura 2 - Processo de produção das telhas de concreto.	108
Figura 3 - Desenho representando a estrutura do ensaio térmico das telhas de concreto.	110
Figura 4 - Curvas granulométricas.	114
Figura 5 - Resistência a compressão no ensaio de pozolanicidade.	116
Figura 6 - Curva de inibição para os componentes inseridos na formulações.	119
Figura 7 - Porosidade aparente para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.	122
Figura 8 - Absorção de água para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.	123

Figura 9 - Micro estrutura para os tratamentos analisados.....	126
Figura 10 - Difractogramas de raio X para os componentes utilizados nas formulações.	129
Figura 11 - Difractogramas de raio X para os tratamentos com RMF.....	131
Figura 12 - Difractogramas de raio X para 10 % do cimento e 100 % do PPC por RMF.	131
Figura 13 - Condutividade térmica para telhas de concreto.	136
Figura 14 - Barreira acústica para as telhas de concreto após envelhecimento acelerado. ...	138
Figura 15 - Impacto financeiro sobre as formulações avaliadas.	142

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Classe do perfil em função da profundidade da telha e da carga de ruptura a flexão.	20
---	----

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Composição das amostras utilizadas no ensaio de aptidão.	41
Tabela 2 - Índice de inibição para classificação da compatibilidade dos materiais adicionados aos compósitos.....	43
Tabela 3 - Formulações para produção das telhas de concreto.	44
Tabela 4 - Análises físicas e metodologias utilizadas na caracterização das telhas.	46
Tabela 5 - Composição mineralógica e propriedades físico químicas do resíduo de minério de ferro.....	52
Tabela 6 - Caracterização química da madeira de <i>Pinus ssp</i>	56
Tabela 7 - Caracterização morfológica dos materiais de reforços.....	57
Tabela 8 - Densidade aparente após envelhecimento acelerado (g/cm^3).....	61
Tabela 9 - Peso seco para telhas de concreto aos 28 dias de cura (dN/m^2).	63
Tabela 10 - Peso seco para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (dN/m^2).	63
Tabela 11 - Porosidade aparente para telhas de concreto aos 28 dias de cura (%).	65
Tabela 12 - Porosidade aparente após envelhecimento acelerado (%).	66
Tabela 13 - Microestruturadas telhas de concreto aos 28 dias de cura.....	68
Tabela 14 - Microestruturadas telhas de concreto após envelhecimento acelerado.	69
Tabela 15 - Absorção de água para telhas de concreto aos 28 dias de cura(%).	70
Tabela 16 - Absorção de água para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%). .	71
Tabela 17 - Carga de ruptura à flexão após envelhecimento acelerado (kN).....	77
Tabela 18 - Condutividade térmica (λ) aos 28 dias de cura ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$).....	79

CAPÍTULO III

Tabela 1 – Referências utilizadas para análise da composição química.....	104
Tabela 2 - Formulações para produção das telhas de concreto.	107
Tabela 3 - Densidade aparente aos 28 dias (g/cm^3).....	120
Tabela 4 - Densidade aparente após envelhecimento acelerado (g/cm^3).....	120
Tabela 5 - Porosidade aparente para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%).124	
Tabela 6 - Absorção de água para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%). .	124
Tabela 7 - Peso seco para telhas de concreto aos 28 dias (dN/m^2).....	127
Tabela 8 - Peso seco para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (dN/m^2).	127

Tabela 9 - Carga de ruptura a flexão para telhas de concreto aos 28 dias (kN).....	133
Tabela 10 - Carga de ruptura a flexão após envelhecimento acelerado (kN).	133
Tabela 11 - Barreira acústica aos 28 dias de cura (dB).....	137

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Telhas de concreto	19
2.2 Materiais Compósitos.....	21
2.3 Resíduo de mineração	22
2.4 Fibras vegetais	24
2.5 Resíduos plásticos	26
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO II – ARTIGO 1.....	34
1 INTRODUÇÃO	36
2 MATERIAL E MÉTODO	39
2.1 Caracterização do resíduo de mineração	39
2.2 Ensaio de pozolanicidade.....	39
2.3 Caracterização dos materiais de reforço.....	40
2.4 Análise de aptidão	41
2.5 Produção das telhas de concreto	43
2.6 Caracterização das Telhas de Concreto	46
2.6.1 Propriedades físicas das telhas de concreto	46
2.6.2 Propriedades mecânicas das telhas de concreto	46
2.6.3 Propriedades térmicas das telhas de concreto	47
2.6.4 Propriedades acústicas das telhas de concreto	48
2.6.5 Análises microestruturais das telhas de concreto.....	49
2.6.6 Análise Difração de Raio X (DRX) das telhas de concreto.....	50
2.7 Durabilidade das Telhas de Concreto	50
2.8 Viabilidade econômica	50
2.9 Análise de dados	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1 Caracterização do resíduo de mineração	51
3.1.1 Propriedades físico-química do RMF.....	51
3.1.2 Caracterização granulométrica.....	53
3.1.3 Ensaio de pozolanicidade.....	54
3.2 Caracterização dos materiais de reforços	55
3.2.1 Caracterização química do material lignocelulósico.....	55

3.2.2	Análise morfológica e física dos materiais de reforços.	57
3.3	Análise de aptidão	58
3.4	Caracterização das Telhas de Concreto	60
3.4.1	Propriedades físicas das telhas de concreto	60
3.4.2	Difração de Raios-X (DRX) das telhas de concreto.....	72
3.4.3	Propriedades mecânicas das telhas de concreto.	76
3.4.4	Desempenho térmico das telhas de concreto.....	79
3.4.5	Desempenho acústico das telhas de concreto.	81
3.5	Viabilidade econômica	83
4	CONCLUSÃO	86
5	AGRADECIMENTOS	88
	REFERÊNCIAS	89
	CAPÍTULO III – ARTIGO 2	98
1	INTRODUÇÃO	100
2	MATERIAL E MÉTODO	103
2.1	Caracterização do resíduo de mineração	103
2.2	Ensaio de pozolanicidade.....	103
2.3	Caracterização dos materiais de reforço.....	104
2.4	Análise de aptidão	105
2.5	Produção das telhas de concreto	107
2.6	Caracterização das Telhas de Concreto	108
2.6.1	Durabilidade das Telhas de Concreto	109
2.6.2	Propriedades físicas.....	109
2.6.3	Propriedades mecânicas das telhas de concreto	109
2.6.4	Propriedades térmicas das telhas de concreto	109
2.6.5	Propriedades acústicas das telhas de concreto	110
2.6.6	Análises microestruturais das telhas de concreto.....	111
2.6.7	Análise Difração de Raio X (DRX) das telhas de concreto.....	111
2.7	Viabilidade econômica	112
2.8	Análise de dados	112
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113
3.1	Caracterização do resíduo de mineração	113
3.1.1	Propriedades físico-química do RMF.....	113
3.1.2	Caracterização granulométrica.....	114
3.1.3	Ensaio de pozolanicidade.....	115
3.2	Caracterização dos materiais de reforços	117
3.2.1	Caracterização química do material lignocelulósico.....	117

3.2.2	Análise morfológica e física dos materiais de reforços.	118
3.3	Análise de aptidão	119
3.4	Caracterização das Telhas de Concreto	120
3.4.1	Propriedades físicas das telhas de concreto	120
3.4.2	Difração de Raios-X (DRX) das telhas de concreto.....	128
3.4.3	Propriedades mecânicas das telhas de concreto.	133
3.4.4	Desempenho térmico das telhas de concreto.....	135
3.4.5	Desempenho acústico das telhas de concreto.	137
3.5	Viabilidade econômica	139
4	CONCLUSÃO	143
5	AGRADECIMENTOS.....	144
	REFERÊNCIAS	145

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

As telhas são elementos com a função de vedação da cobertura de uma obra, sendo responsáveis por abrigá-la das mais variadas intempéries como chuva, sol, vento, variação de temperatura e ruído. As telhas apresentam-se em variadas formas e dimensões e podem ser produzidas em aço, madeira, fibrocimento, cerâmica e concreto.

Telhas de concreto apresentam-se em formato retangular e no geral em um perfil ondulado. São compostas por cimento, agregados, água e aditivos (Zhao *et al.*, 2019). Apresentam maior robustez e melhor encaixe lateral entre as telhas comparadas às suas principais concorrentes que são as telhas cerâmicas. Apesar do processo de queima fazer parte da produção das telhas cerâmicas, contribuindo para o aumento do efeito estufa com a emissão de poluentes na atmosfera, essas ainda têm maior aceitação no mercado de construção devido ao seu bom isolamento térmico e menor peso específico em relação às telhas de concreto (Viana *et al.*, 2022). Diante disso, pesquisas voltadas ao melhoramento das propriedades das telhas de concreto contribuem para seu aprimoramento favorecendo seu crescimento no mercado da construção civil.

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores globais de recursos naturais, onde o concreto recebe atenção especial por ser o principal produto na área da construção e tendo o cimento como o principal componente de sua composição, com uma produção global de 4,18 bilhões de toneladas anualmente (Protasio *et al.*, 2021). A preocupação mundial com a escassez de recursos naturais, com a redução do consumo energético, com as mudanças climáticas e a responsabilidade social em todas as áreas produtivas impulsionam o setor da construção civil na busca por soluções mais eficazes e sustentáveis. O aproveitamento dos resíduos de mineração na produção de materiais para construção civil surge como uma possibilidade para mitigar a demanda por recursos naturais e os impactos associados à sua produção e extração (Carvalho *et al.*, 2019; Narciso *et al.*, 2023).

Dentre as principais substâncias metálicas produzidas no Brasil o minério de ferro desponta com representatividade de mais de 80 % da produção. A produção de minério de ferro bruto, aquele obtido diretamente da mina sem nenhum processamento, foi de quase 600 milhões de toneladas em 2021, com um teor médio de 54,60%. Já o aproveitamento do minério que vai ao processo de beneficiamento foi de 63,37%, com isso, conclui-se que a

quantidade de resíduos gerados atinge valores alarmantes (Agência Nacional de Mineração - ANM, 2023).

Para a obtenção do produto final que está em meio a solos e rochas ele precisa ser extraído do seu local de origem e processado a fim de se obter um material com menos irregularidades e menor quantidade de impurezas. Nesse processo, a indústria gera grande quantidade de resíduos, que são considerados subprodutos e atualmente não possuem nenhum valor comercial sendo geralmente descartados em barragens de contenção (Yao *et al.*, 2020).

O armazenamento desses resíduos gera grandes custos de monitoramento e manutenção das barragens de contenção. Além disso, apesar de serem raros os eventos de ruptura de barragens de contenção, nos últimos anos houve o colapso de duas barragens no estado de Minas Gerais, Brasil. Isso causou danos severos à fauna e à flora, se estendendo por centenas de quilômetros, colapsando a infraestrutura de empresas e de moradias locais, causou problemas socioeconômicos à população e a entidades, além da perda de centenas de pessoas. Isso mostra a vulnerabilidade desse sistema de contenção mesmo com o uso de toda a tecnologia disponível para monitoramento (Thompson *et al.*, 2020; Owen *et al.*, 2020).

A matriz a base de cimento apresenta comportamento frágil, baixa resistência à tração, baixa ductilidade e baixa tenacidade. Uma forma de melhorar tais propriedades das matrizes cimentícias é a inserção de pequenas porções de fibras para a absorção da energia de fratura do compósito, uma vez que sem o reforço a falha ocorre de maneira brusca após iniciada a fissuração. Além disso, atuando como elemento de preenchimento, as fibras podem vir a oferecer melhoria das propriedades térmicas e acústicas, redução do peso específico dos compósitos e quando são matérias primas provenientes de resíduos de processamento ou pós consumo podem vir a reduzir o custo de produção além de proporcionar uma destinação adequada a esses elementos que se apresentam em grande abundância em várias regiões.

O Brasil está dentre os maiores produtores de madeira do mundo, com 9 milhões de hectares plantados e dentre essas espécies o *Pinus* vem ganhando destaque representando 19,4 % da área plantada (IBÁ, 2023). Diante disso, a cadeia produtiva vem acompanhada de um significativo volume de resíduos oriundos tanto da exploração quanto do processamento madeireiro e isso pode gerar matéria prima para o uso na indústria da construção.

Do ponto de vista tecnológico e ambiental, a utilização de resíduos provenientes do setor madeireiro tem ganhado destaque, impulsionando a qualidade técnica e reduzindo os custos associados à energia e ao uso dos agregados naturais na produção de compósitos cimentícios. Além disso, essa prática contribui significativamente para a preservação do meio ambiente, mitigando potenciais danos ambientais (Marques *et al.*, 2016).

No decorrer do século XX, os plásticos emergiram como uma das inovações mais marcantes da era industrial, comumente empregados em praticamente todos os aspectos da vida moderna. No entanto, o uso intenso desses materiais também deu origem a uma crescente preocupação ambiental devido à sua difícil degradação e disposição inadequada.

Para enfrentar os impactos prejudiciais dos plásticos pós-consumo no meio ambiente, a reciclagem e a reutilização emergem como uma das estratégias mais eficazes. Nos últimos anos tem havido um aumento significativo na pesquisa sobre a integração dos resíduos plásticos na produção de argamassas e compósitos de concreto, oferecendo uma alternativa sustentável aos agregados naturais e a melhoria das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas, além da redução do custo final do produto (Ahmed *et al.*, 2021; Mendes *et al.*, 2021b; Metzker *et al.*, 2022).

Diante do exposto, essa pesquisa visou a otimização de formulações para produção de telhas de concreto com RMF (Resíduo de minério de Ferro), avaliando o efeito de diferentes combinações de substituição do pó de pedra calcária e do cimento *Portland* sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, micro estruturais e durabilidade das telhas, além dos efeitos da aplicação do reforço de resíduos de polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET) e de material lignocelulósicos sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, microestruturais e durabilidade das telhas, e com isso desenvolver uma formulação inovadora a fim de obter o melhor tratamento para ser usado em escala industrial atendendo às normas de comercialização e viabilidade econômica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

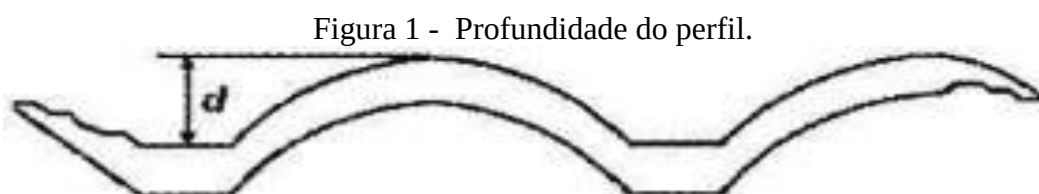
2.1 Telhas de concreto

As telhas são elementos cruciais no ambiente da construção civil, seja para cobertura de telhados de construções destinadas a indústria, ao comércio, à moradia humana e ao abrigo de animais.

As telhas de concreto foram patenteadas em meados do século XIX, na Alemanha, vinte anos após a patente do cimento portland. Em 1930, o processo de extrusão foi introduzido na fabricação das telhas que até aquele momento eram produzidas pelo sistema de prensagem. Somente em 1976 foi iniciada a produção de telhas de concreto no Brasil e sua primeira normatização foi pela NBR 13852, em 1997 (Ziegel, 2023). Atualmente as telhas seguem as diretrizes estabelecidas pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009).

De acordo com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009), as telhas de concreto são os principais elementos de proteção contra intempéries sejam chuva, sol, umidade, calor, frio e proteção acústica. Essas são em geral de formato retangular, com ondulações ao longo do corpo e de cores variadas para combinação adequada do ponto de vista arquitetônico. São formuladas a base de cimento portland, agregados miudos e graudos, aditivos e água.

Além disso, a NBR 13858-2 (ABNT, 2009) relaciona alguns termos e definições de elementos que compõem a estrutura geral das telhas de concreto como profundidade de perfil, que é responsável pela classificação das telhas influenciando no seu limite de resistência à flexão. A Figura 1 ilustra a profundidade de perfil, que é a distância entre a crista mais alta e a calha mais baixa da telha.



Fonte: NBR 13.858-2 (ABNT, 2009).

Conforme a profundidade do perfil, a telha assume uma posição na classificação e essa classe define o limite de carga de ruptura à flexão (Tabela 1).

Tabela 1 - Classe do perfil em função da profundidade da telha e da carga de ruptura a flexão.

Classe de Perfil	Profundidade de perfil "d" (mm)	Carga de ruptura à flexão (N)
A	$d \geq 50$	2400
B	$40 \leq d < 50$	2400
C	$30 \leq d < 40$	2000
D	$20 \leq d < 30$	2000
Plana	$d < 20$	1200

Fonte: NBR 13.858-2 (ABNT, 2009), tabela modificada.

Outras definições da NBR 13.858-2 (ABNT, 2009) são comprimento nominal, comprimento útil, largura nominal, largura útil, encaixe lateral, garras de fixação e nervura. ANBR 13.858-2 (ABNT, 2009) ainda dita diretrizes para ensaios físicos, ensaios mecânicos, absorção de água, carga de ruptura à flexão, peso das telhas e critérios de aceitação ou rejeição do lote.

A produção das telhas de concreto se dá pelo processo de extrusão e compactação, em que o concreto é comprimido através de rolos compactadores entre o molde móvel da telha, onde é formada a parte inferior da mesma, e o molde fixo que gera seu perfil superior. A Figura 2 apresenta a imagem de uma telha produzida pelo processo de extrusão.

Figura 2 - Telha produzida pelo processo de extrusão.



Fonte: Do Autor (2025).

Considerando a relevância das telhas de concreto no controle do ambiente interno das edificações, vários componentes são adicionados à sua formulação visando otimização de sua produção e comercialização. Isso leva a uma maior competitividade das telhas de concreto com redução do seu peso, melhoria no isolamento térmico e maior viabilidade econômica. Resíduos poliméricos, lignocelulósicos, vermiculita expandida e resíduos de mineração são exemplos de materiais estudados para serem incorporados à formulação das telhas de concreto visando não só otimização das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas mas também a destinação adequada de resíduos sólidos gerados em diversos setores da cadeia produtiva (Eugenio *et al.*, 2021; Callejas; Butinhoni, 2022; Viana *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2023).

2.2 Materiais Compósitos

O advento dos compósitos como uma nova classe de material se deu na segunda metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos. A combinação de diferentes materiais durante a fabricação os levou a serem distintos entre os metais, cerâmicos e polímeros (Levy Neto; Pardini, 2016). Os compósitos são materiais multifásicos e heterogêneos, tanto em escala microscópica quanto macroscópica. Eles resultam da combinação racional de um componente descontínuo, que fornece a principal resistência ao esforço, e outro componente contínuo, que atua como meio de transferência dos esforços (Chak; Chattopadhyay; Dora, 2020; Silva *et al.*, 2022). A qualidade da interface entre essas fases está diretamente ligada à efetiva transferência e dispersão de carga entre a matriz e o reforço, influenciando assim a resistência e a tenacidade dos compósitos (Marvila *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2022).

O concreto é um compósito formado por partículas grandes e pequenas que compõem a fase dispersa e uma fase matriz constituída pelo cimento. O concreto de cimento Portland é o material de construção mais consumido em escala mundial (Lopes; Peçanha; Castro, 2020) devido ao seu desempenho excepcional aliado ao menor custo e à disponibilidade de matérias-primas em diversas regiões do mundo. Atualmente, a produção mundial de cimento *Portland* ultrapassa 4 bilhões de toneladas por ano, e espera-se um aumento anual de até 23% até 2050, impulsionado pela urbanização acelerada e pelo crescimento da população (Protásio *et al.* 2021; Adesina; Zhang, 2024).

Diante desse volume de produção, abre-se espaço para novas pesquisas relacionadas à

matriz cimentícia, uma das técnicas é a utilização de resíduos de mineração como agregados reciclados que tem sido alvo de múltiplos estudos apontando para sua viabilidade técnica (Fontes *et al.*, 2016; Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a; Eugenio *et al.*, 2023b). Esses resíduos, predominantemente compostos por materiais finos contendo dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de cálcio, óxido de sódio e óxido férrico (Yao *et al.* 2020) revelam uma composição química similar àquela do cimento empregado na produção de concreto, o que justifica seu uso na matriz cimentícia (Eugenio *et al.*, 2021).

2.3 Resíduo de mineração

A mineração corresponde à uma atividade econômica e industrial que consiste na pesquisa, exploração, extração e beneficiamento de minérios presentes no subsolo. Ela representa uma das atividades econômicas e industriais que contribuem de forma significativa para o desenvolvimento socioeconômico do país. Dentre as substâncias metálicas exploradas no Brasil, o ferro corresponde a mais de 80% de todo o volume de produção, sendo os estados de Minas Gerais e Pará detentores de 88,1 % da produção nacional (Agência Nacional de Mineração - ANM, 2023; U.S. Geological Survey - USGS, 2022).

O minério de ferro encontra-se entre solos e rochas das quais o minério precisa ser separado. Nesse processo são geradas toneladas de materiais, os quais chamamos de resíduo. Além do solo e rochas provenientes do processo de separação, estão presentes a água e reagentes químicos. Das mais de 430 milhões de toneladas processadas em 2021, foram mais de 158 milhões de toneladas de resíduos gerados após o processo de beneficiamento. Somente no estado de Minas, Brasil, esse número foi próximo de 86 milhões de toneladas (Agência Nacional de Mineração - ANM, 2023).

Os resíduos geralmente são armazenados em barragens de contenção que são estruturas projetadas para a contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos, provenientes dos processos para beneficiamento de minérios. São comumente construídas com aterro ou com os próprios resíduos produzidos pelas atividades das minas (Owen *et al.*, 2020).

A contenção desses resíduos gera riscos de transbordo ou rompimento das barragens, ameaçando tudo que está a sua volta e podendo ser transportados por rios por centenas de quilômetros. Tal fato foi observado em 05 de novembro de 2015 com o colapso da represa do Fundão, em Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil. O colapso da represa lançou entre 50 e 60 milhões de metros cúbicos de resíduo em forma de lama no meio ambiente, tirando a vida

de 19 pessoas e causando impactos econômicos, sociais e ambientais em 39 municípios nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Esse desastre afetou o equilíbrio do ecossistema por uma vasta região, pois o resíduo foi transportado pelo Rio Doce por 650 km até o oceano atlântico (Cordeiro *et al.*, 2019; Protasio *et al.*, 2021)

Pouco mais de três anos depois, em 25 de janeiro de 2019, na cidade de Brumadinho, MG, Brasil, houve o rompimento da barragem de contenção do Córrego do Feijão, lançando no mínimo 12 milhões de metros cúbicos de resíduo no rio Paraopeba e nas áreas adjacentes. Mais de 250 pessoas perderam a vida no desastre, a contaminação do rio Paraopeba se estendeu por 464 km, o nível de mercúrio aumentou 21 vezes do valor aceitável. Foram destruídos mais de 200 hectares entre mata nativa e área de proteção ambiental na região (Thompson *et al.*, 2020).

Porém, não ficam somente restritos ao Brasil os desastres em barragens de contenção de resíduo de mineração, existem exemplos desses acontecimentos que ocorreram ao redor do mundo nos últimos anos. Podem ser citados os desastres na mina de Ajka, na Hungria, em 2010; em PhilexPadcal, nas Filipinas, em 2012; na mina Mount Polley, no Canadá, em 2014 e na mina de Cadia, na Austrália, em 2018. Entre 1960 e 2014, 63 desastres com barragens de contenção de resíduo de mineração ocorreram ao redor do mundo e entre 1961 e 2019, 2375 pessoas perderam a vida devido aos eventos de colapso das barragens (Owen *et al.*, 2020). Isso faz com que haja um senso de urgência no aumento da confiabilidade das barragens de contenção e, paralelamente a isso, o desenvolvimento de técnicas para mitigar o efeito de saturação das barragens através de rotas de reaproveitamento desses resíduos (Protasio *et al.*, 2021).

O setor de construção civil apresenta indicadores preocupantes no que diz respeito à exploração de recursos não renováveis, energia e geração de resíduos sólidos. Com isso verifica-se que há um campo aberto para uso de materiais que podem substituir, em partes, os componentes do principal elemento da construção civil que é o concreto. Um dos elementos passíveis de ser usado é o RMF, que apresenta granulometria e componentes químicos que podem interagir com o cimento (Narciso *et al.*, 2023). Esse uso oferece uma destinação ao RMF, agregando valor ao mesmo e mitigando os efeitos causados quando esse é depositado em barragens de contenção (Santos; Fontes; Lima, 2017; Eugênio *et al.*, 2021).

Eugênio *et al.* (2023b) avaliaram o uso de resíduo de mineração na substituição do calcário agrícola na produção de fibrocimento extrudado e demonstraram grande potencial de uso, pois com 25% de substituição do calcário houve melhoria da porosidade do material, o que está correlacionado às propriedades mecânicas e absorção de água. Além disso, foi

observado que o uso do RMF diminui a degradação das fibras celulósicas de reforço usadas nesse compósito.

Na produção de telhas de concreto, Eugenio *et al.* (2021) avaliaram o efeito na substituição de 25 %, 50%, 75% e de 100% do PPC pelo RMF sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos. Nesse estudo concluíram que todas as formulações atenderam às normas, contudo os melhores resultados físicos e mecânicos foram obtidos com a formulação de substituição total do PPC pelo RMF.

Também em telhas de concreto, na substituição parcial do cimento por RMF, foram avaliados os efeitos das substituições de 10%, 20%, 30% e 40 %. Nesse estudo foi concluído que a formulação de 10 % de substituição mostrou melhor desempenho das propriedades físicas e mecânicas, apresentando os menores valores de absorção de água (7,53%) e de porosidade aparente (13,03%), além do maior valor de resistência mecânica (2,184kN) dentre os tratamentos avaliados (Eugenio *et al.*, 2023a).

Esses estudos indicam a viabilidade do uso do RMF na matriz cimentícia, reduzindo o custo de produção e minimizando o efeito de saturação nas barragens de contenção com a destinação adequada do resíduo.

2.4 Fibras vegetais

De acordo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), o Brasil possui 9 milhões de hectares de *Pinus*, eucalipto e demais espécies de árvores para a produção de painéis de madeira, pisos, celulose, papel, produção energética e biomassa. Essas árvores representam 91 % de toda a madeira industrial do país, os 9 % restantes são provenientes de florestas naturais que são legalmente manejadas. A produção de *Pinus* mostra expressiva participação no mercado nacional, representando 19,4 % da área de florestas plantadas para a produção industrial em 2021. O crescimento vem evoluindo ao longo do tempo, pois entre os anos de 2013 e 2021 a área plantada passou de 1,5 milhões de hectares para 1,9 milhões de hectares e no período de 2013 a 2021 o consumo industrial passou de 40 milhões de m³ para 50 milhões de m³.

Todo esse volume de produção do setor madeireiro leva à geração de resíduos provenientes da extração e processamento, o que contribui significativamente para a contaminação do meio ambiente se não tiverem uma destinação adequada (Teixeira *et al.*, 2018). Milhares de toneladas de resíduos são gerados anualmente nas atividades florestais e operações industriais. Em 2018, o setor madeireiro gerou um total de 52,0 milhões de

toneladas de resíduos. Desse total, 15,1 milhões de toneladas foram produzidas apenas pelas operações industriais, enquanto as atividades florestais geraram 36,9 milhões de toneladas (IBÁ, 2019).

Com essa abundância de recursos, as fibras vegetais despontam como uma promissora fonte para reforços da matriz cimentícia, pois combinam resistência mecânica e baixa densidade aliadas à boa viabilidade econômica e a capacidade de isolamento térmico e acústico. Sendo grande produtor agroindustrial, o Brasil gera considerável quantidade de resíduos vegetais que são provenientes de matriz renovável além de serem biodegradáveis. Isso propicia uma solução sustentável para a destinação dos resíduos, agregação de valor aos mesmos e para o desenvolvimento de novos materiais de construção mais eficientes e competitivos (Achour; Ghomari; Belayachi, 2017; Teixeira *et al.*, 2018; Laverde *et al.*, 2022).

No entanto, há alguns pontos a serem considerados na aplicação de resíduos lignocelulósicos como reforço da matriz cimentícia, pois a interação fraca entre a fibra e a matriz é um dos principais problemas relacionados à produção e utilização de compósitos reforçados com fibras naturais (Lee; Khalina; Lee, 2021). As fibras vegetais podem sofrer degradação em sua estrutura causada pelo ambiente externo e sua interação com a matriz cimentícia pode se tornar ineficaz (Wei; Ma; D'shawn, 2016; Fokam *et al.*, 2020). Os extrativos presentes no material lignocelulósico podem interferir na temperatura de hidratação, isso afeta a cura do cimento, além da geometria que afeta a área de contato entre a fibra e a matriz levando à alterações das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos (Tomczak; Satyanarayana; Sydenstricker, 2007; Ferraz *et al.*, 2020; Eugênio *et al.*, 2023). A hemicelulose e a lignina são sensíveis à alcalinidade do cimento e podem ser degradadas (Laverde *et al.*, 2022), ressalta-se também o aspecto hidrofílico do material lignocelulósico, que causa uma baixa adesão entre a fibra e a matriz criando uma interface de má qualidade, vindo a gerar ineficácia na transferência de carga o que compromete as propriedades finais dos compósitos (Rocha *et al.*, 2022).

Apesar de não ser comum a aplicação de resíduos lignocelulósicos na produção de telhas de concreto, seu emprego na produção de outros compósitos como argamassa, concreto, fibrocimento, tijolos solo cimento e painéis de madeira tem ampla aplicação. Nesse sentido, vários materiais lignocelulósicos são pesquisados para a produção de compósitos cimentícios. Dentre eles a madeira de *Pinus* (Guo *et al.*, 2022; Narciso *et al.*, 2023; Mejia-Ballesteros, 2023), madeira de eucalipto (Behera; Noman; Petrû, 2020; Mansilla *et al.*, 2020) fibras de açaí (Azevedo *et al.*, 2020b; Marvila *et al.*, 2020), fibras de coco (Syed; Nerella; Madduru, 2020; Danso; Manu, 2020), sisal (Bello *et al.*, 2019; Sabarish *et al.*, 2020), fibras de bananeira

(Akinyemi; Dai, 2020; Poongodi; Murthi, 2020), juta (Islam; Ahmed, 2018, Sultana *et al.*, 2020), fibras de abacaxi (Marvila *et al.*, 2019; Azevedo *et al.*, 2020a).

2.5 Resíduos plásticos

Com papel fundamental dos materiais poliméricos para o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, a contribuição dos resíduos plásticos para a contaminação do meio ambiente se desenvolveu na mesma proporção por ter uma degradação lenta e agredir cursos de rios, águas do subsolo, solo, animais aquáticos, terrestres e plantas. Com o objetivo de mitigar os efeitos da contaminação, agregar valor aos resíduos plásticos e desenvolver produtos mais competitivos com melhores propriedades físicas e mecânicas, a utilização de resíduos plásticos vem se destacando nos últimos anos na substituição dos componentes da matriz cimentícia (Ahmed *et al.*, 2021; Mendes *et al.*, 2021b; Metzker *et al.*, 2022).

Dentre inúmeras vantagens, o plástico é um material versátil, moldável, flexível, acessível, reciclável e resistente, que pode ser usado em diversas aplicações, trazendo praticidade para a sociedade e competitividade para as indústrias. De acordo com as estimativas atuais, globalmente 330 milhões de toneladas de plásticos são produzidas todos os anos. Após consumo, aproximadamente 70% desse volume de produção está sendo destinado a aterros sanitários ocupando grandes áreas, ou estão sendo descartados incorretamente no meio ambiente (Goli; Mohamed; Singh, 2020), acarretando uma série de problemas ambientais e sociais, como inundações e propagação de doenças (Metzker *et al.*, 2022).

Além disso, os resíduos plásticos podem ser transportados pelos rios e correntes marinhas, causando contaminação no sistema de água doce e em oceanos de todo o mundo. De acordo com Borrelle *et al.*, (2020), estima-se que de 19 a 23 milhões de toneladas de todo o plástico produzido em 2016 foram dispersos no ambiente marinho, e a estimativa é que a partir de 2030 esse número chegue a 53 milhões de toneladas anualmente, caso medidas que visem mitigar tal efeito não sejam tomadas.

O PP é considerado um dos produtos mais promissores graças às suas propriedades físicas, baixo custo, resistência ao fogo, solidez dimensional e histórico ecologicamente correto por poder ser aquecido, resfriado e reaquecido novamente sem causar degradação significativa em suas propriedades básicas. É um plástico amplamente utilizado na produção de embalagens, brinquedos, copos plásticos, tampas de garrafas, seringas de injeção e produtos para o mercado automobilístico. Com esse leque de aplicação, esse polímero representa 16 % do mercado mundial de plásticos (Bora; Wang; You, 2020; Alsabri; Tahir;

Al-Ghamdi, 2022).

O PET tem se destacado no mercado de polímeros devido à sua transparência, leveza, propriedades de barreira contra gases e água, resistência ao impacto, resistência aos raios UV e inquebrabilidade ao ser comparado com embalagens de vidro. Esse polímero é amplamente empregado na produção de garrafas e recipientes para bebidas, sendo utilizado principalmente para água, refrigerantes carbonatados e outras bebidas como sucos em geral. Além disso, o PET é utilizado na forma de folhas e filmes para embalagens, tem aplicação na indústria alimentícia e em produtos não alimentares, como cosméticos em geral. Em embalagens para bebidas de dose única, é responsável por 47 % do volume consumido e isso implica em ser responsável por 12 % dos resíduos sólidos globais gerados (Nisticò, 2020; Benyathiar *et al.*, 2022).

No Brasil, a produção de plásticos em 2022 foi de 6,7 milhões de toneladas, sendo a reciclagem de plásticos pós consumo de 1,0 milhão de toneladas. A região sudeste é responsável pela reciclagem de 544,5 mil toneladas, que também é a região com maior produção e consumo desses insumos. O PET foi o produto mais reciclado atingindo um índice de 54,4 %, a quarta posição é ocupada pelo PP com 20,3 % (Abiplast, 2023).

Diante disso, pode-se observar que existe um campo amplo para aumento do índice de reciclagem desses polímeros, principalmente na utilização na matriz cimentícia, observando que o uso desses resíduos em telhas de concreto não ser tão comum.

Callejas e Butinhoni (2022), ao avaliarem a incorporação de resíduo de PET em telhas de concreto, concluíram que há viabilidade na aplicação sob o enfoque da sustentabilidade, visto que, mesmo com a redução das propriedades físicas e mecânicas, essas permanecem dentro dos limites normativos. Correa *et al.* (2021) avaliaram a substituição parcial da areia do concreto em 10 % por PP e PET, evidenciando que houve uma redução da resistência à compressão em 20 % devido ao aumento da absorção de água causada pelo aumento do teor de vazios na interação da fibra com a matriz. Com relação à morfologia dos polímeros, foi observada uma melhor adesão interfacial do PET à matriz em relação ao PP. Mendes *et al.* (2021b), avaliaram o uso de PET como reforço da matriz cimentícia na produção de fibrocimento extrudado e concluíram que pode ser usado como reforço até a quantidade de 5 % para uma otimização das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e durabilidade do material. Mohammed e Rahim, (2020) avaliaram o comportamento experimental e análise de vigas de concreto de alta resistência reforçado com resíduos de fibra de PET. Ahmed *et al.* (2022), concluíram que a condutividade térmica reduziu em 49,1% para a formulação com 40% de resíduos de PP na incorporação desse resíduo na produção de concreto e atendeu à

normatização com relação ao limite inferior de resistência para fins estruturais.

Perante o exposto, o emprego de resíduos poliméricos influenciam nas propriedades dos compósitos cimentícios, resultando em novas formulações para aprimoramento dos produtos e componentes utilizados na construção civil. Além disso, tais técnicas fornecem destinação adequada aos resíduos, contribuindo para mitigação dos seus efeitos nocivos ao meio ambiente (Mohan; Jayanarayanan; Mini, 2021).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O minério de ferro, os materiais poliméricos e os lignocelulósicos desempenham um papel crucial no desenvolvimento econômico e social de uma nação. Contudo, a exploração desses recursos gera uma quantidade significativa de rejeitos que causam danos catastróficos ao meio ambiente. A pesquisa com a incorporação de três tipos distintos de resíduos em um único material da construção civil contribui para a mitigação eficaz e em larga escala dos impactos ambientais e gera uma nova concepção nas formulações para a produção de telhas de concreto.

Além da destinação adequada do resíduo de mineração, dos resíduos poliméricos e lignocelulósicos, essa pesquisa contribui para a redução da exploração da matéria prima não renovável usada da matriz cimentícia. A redução do custo de produção, a sustentabilidade de processos e produtos, a oferta de produtos com melhor qualidade e com preços mais competitivos são fatores de relevância também a serem considerados. Com esse intuito, as pesquisas têm se voltado cada vez mais para procurar suprir essa demanda na construção civil com produtos que se enquadrem em tais requisitos de forma sustentável, valorizando o meio ambiente, a sociedade e o desenvolvimento de tecnologia e inovação.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST - Associação brasileira da indústria de plásticos - PANORAMA GERAL DA TRANSFORMAÇÃO E RECICLAGEM DE PLÁSTICO NO BRASIL, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br>. Acesso em 23/04/2023
- ACHOUR, A.; GHOMARI, F.; BELAYACHI, N. Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. **Journal of adhesion science and Technology**, v. 31, n. 17, p. 1938-1962, 2017.
- ADESINA, A.; ZHANG, J. Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. **Next Sustainability**, p. 100025, 2024.
- Agência Nacional de Mineração; Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas / coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília: ANM, 2023. 23 p.; il. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: 31/03/2023
- AHMED, H. U. et al. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. **Composites Part B: Engineering**, v.215, artigo 108769, 2021
- AHMED, S. N. et al. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 818-823, 2022.
- AKINYEMI, B. A.; DAI, C. Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118041, 2020.
- ALSABRI, A.; TAHIR, F.; AL-GHAMDI, S. G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 2245-2251, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1492-03**: Standard Specification for Concrete Roof Tiles, 2009. West Conshohocken, 2001. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13858-2**: Telha de concreto – Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 32 p.
- AZEVEDO, A. R. et al. Development of mortar for laying and coating with pineapple fibers. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 187-193, 2020.
- AZEVEDO, A. R. G. et al. Technological performance of açaí natural fibre reinforced cement-based mortars. **J Build Eng** 33: 101675. 2020.
- BELLO, C. B. C. et al. Experimental tests for the characterization of sisal fiber reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. **Construction and Building Materials**, v. 219, p. 44-55, 2019.
- BENYATHIAR, P. et al. Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: a review. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2366, 2022.

BORA, R. R.; WANG, R.; YOU, F. Waste polypropylene plastic recycling toward climate change mitigation and circular economy: energy, environmental, and technoeconomic perspectives. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 43, p. 16350-16363, 2020.

BORRELLE, S. B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1515-1518, 2020

CALLEJAS, I. J. A. BUTINHONI, G.F. Desempenho físico e mecânico de telhas cimentícias produzidas com incorporação de resíduo de polietileno tereftalato. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 6, p. 1145-1153, 2022.

CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397-409, 2019.

CHAK, V.; CHATTOPADHYAY, H.; DORA, T. L. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites. **Journal of manufacturing processes**, v. 56, p. 1059-1074, 2020.

CORDEIRO, M. C. et al. 2019. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the World's largest mining disaster. **Sci. Total Environ.** 654, 1209–1217

CORREA, P. M. et al. Potential use of PET and PP as partial replacement of sand in structural concrete **RevistaMatéria- Rio de Janeiro** 26(03) 2021.

DANSO, H.; MANU, D. Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00316, 2020.

EUGÊNIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of partial replacement of cement with IOT in extruded concrete roof tiles production. **Construction and Building Materials**, v. 393, p. 132129, 2023.

EUGÊNIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, 2021.

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

FERRAZ, P. F. P. et al. Agricultural residues of lignocellulosic materials in cement composites. **Applied Sciences**, v. 10, n. 22, p. 8019, 2020.

FOKAM, C. B. et al. Cement Mortar Reinforced with Palm Nuts Natural Fibers: Study of the Mechanical Properties. **Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des MatériauxAvancés**, v. 30, n. 1, 2020.

FONTES, W. C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988-995, 2016.

GOLI, V. S. N. S.; MOHAMMAD, A.; SINGH, D. N. Application of municipal plastic waste as a manmade neo-construction material: issues & way forward. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 105008, 2020.

GUO, H. et al. Properties of light cementitious composite materials with waste wood chips. **Materials**, v. 15, n. 23, p. 8669, 2022.

ISLAM, M. S.; AHMED, S.J. Influence of jute fiber on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 768-776, 2018.

LAIBLOVÁ, L. et al. Environmental Impact of Textile Reinforced Concrete Facades Compared to Conventional Solutions—LCA Case Study. **Materials** 2019, 12, 3194.

LAVERDE, V. et al. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127729, 2022.

LEE, C. H.; KHALINA, A.; LEE, S. H. Importance of interfacial adhesion condition on characterization of plant-fiber-reinforced polymer composites: A review. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 438, 2021.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A.C.C.; CASTRO, A.L.D. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n.1, 2020.

MANSILLA, C. et al. Evaluation of mechanical properties of concrete reinforced with eucalyptus globulus bark fibres. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 10026, 2020.

MARQUES, M. L. et al. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 466-472, 2016.

MARVILA, M. T. et al. Durability of coating mortars containing açai fibers. Case studies in **construction materials**, v. 13, p. e00406, 2020.

MARVILA, M. T. et al. Mortars with Pineapple Fibers for Use in Structural Reinforcement. In: **Characterization of Minerals, Metals, and Materials** 2019. Springer International Publishing, 2019. p. 721-728.

MARVILA, M. T. et al. Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, p. 1-24, 2021.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E. et al. Effect of activated coal waste and treated Pinus fibers on the physico-mechanical properties and durability of fibercement composites. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 132038, 2023.

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

MENDES, R. F. et al. Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 42737-42749, 2021.

METZKER, S. L. O. et al. Soil-Cement bricks development using polymeric waste. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-15, 2022.

MOHAMMED, A. A.; RAHIM, A. A. F. Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118350, 2020.

MOHAN, H. T.; JAYANARAYANAN, K.; MINI, K. M. Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121520, 2021.

NARCISO, C. R. P. et al; Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 54, p. 115381-115395, 26 out. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-30602-9>.

NETO, F. L.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2021.

NISTICÒ, R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. **Polymer Testing**, v. 90, p. 106707, 2020.

OWEN, J. R. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International journal of disaster risk reduction**, v. 42, p. 101361, 2020.

PARHI, S. K.; PATRO, S. K. Application of R-curve, ANCOVA, and RSM techniques on fracture toughness enhancement in PET fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134644, 2024.

POONGODI, K.; MURTHI, P. J. M. T. P. Impact strength enhancement of banana fibre reinforced lightweight self-compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1203-1209, 2020.

PROTASIO, F. N. M. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of cleaner production**, v. 278, p. 123929, 2021.

ROCHA, D. L. et al. A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. **Polymers**, v. 14, n. 10, p. 2043, 2022.

RODRIGUES, P. F.; RIBEIRO, T. P.; JUNIOR, A. N. Caracterização mecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de politereftalato de etileno espiraladas. **E&S Engineering and Science**, v. 6, n. 1, p. 29-37, 2017.

SABARISH, K. V. et al. An experimental investigation on properties of sisal fiber used in the concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 439-443, 2020.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, e11801, 2017.

SILVA, R. V.; CASCUDO, O.; BACARJI, E. Compósitos cimentícios com fibras de polipropileno: avaliações no estado fresco e endurecido. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13190, 2022.

SULTANA, N. et al. An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118216, 2020.

SYED, H.; NERELLA, R.; MADDURU, S. R. C. Role of coconut coir fiber in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1104-1110, 2020.

TEIXEIRA, J. N. et al. Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 2193-2200, 2020.

THOMPSON, F. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135914, 2020.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III–Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 10, p. 2227-2236, 2007.

US GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2020. **US Geological Survey**, p. 200, 2020.

VIANA, Q. S. et al. Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 32, p. 48964-48974, 2022.

WEI, J.; MA, S.; D'SHAWN, G. T. Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites. **Corrosion Science**, v. 106, p. 1-15, 2016.

YAO, G. et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings. **Minerals Engineering**, v. 145, p. 106068, 1 jan. 2020.

ZHAO, R. et al. Radiant heating utilizing conductive concrete tiles. **Building and Environment**, v. 148, p. 82-95, 2019.

ZHENG, H. et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 233, p. 109639, 2022.

ZIEGEL: **História da telha de concreto**. Disponível em: <https://ziegel.com.br/historia-da-telha-de-concreto>. Acesso em: 03/04/2023.

CAPÍTULO II – ARTIGO 1

USO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE TELHAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS E LIGNOCELULÓSICO

RESUMO

O Brasil, um dos líderes mundiais na produção de minério de ferro, enfrenta o desafio de lidar com os resíduos gerados na cadeia produtiva do aço. Tais resíduos precisam de uma destinação adequada, evitando impactos ambientais e sociais e agregando valor aos mesmos. A proposta dessa pesquisa é substituir o pó de pedra calcária (PPC) e parte do cimento por resíduo de minério de ferro (RMF) na produção de telhas de concreto reforçadas com resíduos poliméricos e lignocelulósicos. O traço controle foi de 27,15 % de cimento CPV-ARI, 60,85 % de areia e 12% de PPC. Para os demais tratamentos foram avaliadas a substituições de 100% de PPC e 10% de cimento por RMF em formulações distintas para modificação da matriz cimentícia. Também foram avaliados os efeitos da utilização de reforços com resíduos de polipropileno (PP), Polietileno tereftalato (PET) e resíduo da madeira de *Pinus*, na porcentagem de 0,5%. As telhas foram produzidas por processo de extrusão, sendo avaliadas após 28 dias de cura e envelhecimento acelerado. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e a viabilidade econômica. Os resultados indicaram que o uso de RMF nas telhas de concreto não alterou a densidade. Houve aumento no peso seco, mas dentro dos limites da NBR 13858-2 (ABNT, 2009). A absorção de água foi compatível com essa norma após envelhecimento acelerado e com a ASTM C1492-3 (ASTM, 2009) em ambos os processos de cura. A resistência mecânica aumentou após envelhecimento acelerado. Todos os tratamentos atenderam aos critérios da ASTM C1492-3. A condutividade térmica e a barreira acústica mantiveram-se estáveis com uma redução de custo de 1,83% na substituição parcial do cimento. O reforço com PP melhorou a resistência à flexão, sem alterar o peso seco. O PET reduziu a densidade e a absorção de água, mantendo a resistência mecânica e a barreira acústica, embora eleve a condutividade térmica. O *Pinus*, apesar de menor custo, houve redução na resistência mecânica e aumento na condutividade térmica.

Palavras-chave: minério de ferro; valor agregado; reutilização; madeira; resíduos poliméricos; matriz cimentícia; barragens de rejeito.

USE OF WASTE FROM THE MINING INDUSTRY FOR THE PRODUCTION OF CONCRETE TILES REINFORCED WITH PLASTIC AND LIGNOCELLULOSIC WASTE

ABSTRACT

Brazil, one of the world's leaders in iron ore production, faces the challenge of dealing with waste generated in the steel production chain. Such waste needs to be appropriately disposed of, avoiding environmental and social impacts, and adding value to the waste. The purpose of this research is to replace limestone powder (PPC) and part of the cement with iron ore residue (RMF) in the production of concrete tiles reinforced with polymeric and lignocellulosic waste. The control mix was 27.15% CPV-ARI cement, 60.85% sand and 12% PPC. For the other treatments, the replacement of 100% PPC and 10% of cement with RMF was evaluated in distinct formulations for modifying the cementitious matrix. Additionally, the effects of reinforcement using polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and *Pinus* wood waste, at a percentage of 0.5%, were assessed. The concrete tiles were produced through an extrusion process and evaluated after 28 days of curing and accelerated aging. Physical, mechanical, thermal, and acoustic properties, as well as economic and financial feasibility, were analyzed. The results indicated that the use of RMF in concrete tiles did not alter density. There was an increase in dry weight, but it remained within the limits of NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Water absorption was consistent with this standard after accelerated aging and with ASTM C1492-3 (ASTM, 2009) under both curing processes. Mechanical strength increased after accelerated aging. All treatments met the criteria of ASTM C1492-3. Thermal conductivity and acoustic barrier properties remained stable, and a cost reduction of 1.83% was observed with partial cement replacement. Reinforcement with PP improved flexural strength without altering dry weight. PET, on the other hand, reduced density and water absorption while maintaining mechanical strength and acoustic barrier properties, although it increased thermal conductivity. *Pinus*, despite its lower cost, showed a reduction in mechanical strength and an increase in thermal conductivity.

Keywords: iron ore; added value; reuse; wood; polymeric waste; cementitious matrix; tailings dam.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil destaca-se como um dos maiores consumidores de recursos naturais em escala global, sendo o concreto o principal material utilizado em suas atividades (Laiblová *et al.*, 2019). O cimento desempenha um papel central nesse processo com uma produção global de 4,00 bilhões de toneladas anualmente (Sharma; Goyal, 2024), o que evidencia sua importância e os impactos do setor na utilização de recursos naturais (Ghalehnovi *et al.*, 2019; de Magalhaes *et al.*, 2020). Além disso, estima-se que a produção de cimento contribui com uma parcela de 5% a 8% na emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Scrivener, 2014; Díaz *et al.*, 2017; Skibsted, Snellings, 2019).

As crescentes emissões de CO₂ provenientes da produção de cimento têm gerado preocupações globais devido ao aumento no consumo desse material. Uma estratégia para mitigar esse impacto é a inclusão de materiais que otimizem a produção do clínquer ou então sejam aplicados diretamente nas formulações do concreto (Schneider, 2019; Mendes *et al.*, 2020; Eugenio *et al.*, 2023a) reduzindo os custos de produção e os impactos ambientais (Vilela *et al.*, 2020).

Dentre os componentes passíveis de serem usados como substituição ao agregado ou ao cimento na produção de argamassas e concreto destaca-se o resíduo de minério de ferro (RMF). Esse material possui granulometria fina, é denso, cristalino e majoritariamente composto por óxido de ferro, sílica e alumina que são componentes similares aos encontrados no cimento (Galvão *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2019; Yao *et al.*, 2020a; Eugenio *et al.*, 2021; Narciso *et al.*, 2023). Algumas pesquisas realizadas com o RMF na matriz cimentícia demonstraram seu potencial de utilização, destacando seu uso na produção de concreto (Shettima *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2021), tijolos (Weishi *et al.*, 2018; Vilela *et al.*, 2020) e telhas (Fontes *et al.*, 2019; Eugênio *et al.*, 2021; Viana *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2023a).

O RMF é atualmente depositado em barragens de contenção (Yao *et al.*, 2020b; Garcia *et al.*, 2024). Essas barragens são estruturas projetadas para a contenção dos resíduos provenientes dos processos para beneficiamento de minérios (Owen *et al.*, 2020; Otieno; Shukla, 2023). Somente no Brasil, nos últimos anos, houve dois eventos envolvendo rompimento de barragens causando danos ambientais, sociais e econômicos de grande magnitude. Em 2015, com o colapso da represa do Fundão, em Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil (Cordeiro *et al.*, 2019; Galvão *et al.*, 2020; Protasio *et al.*, 2021) e em 2019, na cidade de Brumadinho, MG, Brasil, com o rompimento da barragem de contenção do Córrego

do Feijão (Thompson *et al.*, 2020; Siqueira *et al.*, 2022). Dessa forma, os cenários apresentados geram um senso de urgência para desenvolver técnicas para mitigar os efeitos da saturação dessas estruturas com a adoção de rotas de reaproveitamento dos resíduos acumulados (Protasio *et al.*, 2021).

Outro setor de fundamental importância no desenvolvimento tecnológico e socioeconômico mundial é o de materiais poliméricos termoplásticos. Por serem moldáveis, resistentes, duráveis, leves e de baixo custo de produção são aplicáveis em diversos setores da cadeia produtiva (Sagatov, 2023; Mohammed; Karim, 2023). A produção global de plásticos atinge anualmente 330 milhões de toneladas. Cerca de 70% desse volume acaba sendo destinado a aterros sanitários, onde ocupa vastas áreas, ou é descartado de forma inadequada no meio ambiente vindo a contaminar ambientes terrestres e aquáticos (Lebreton *et al.*, 2017; Mohan; Jayanarayanan; Mini, 2021; Tejaswini; Pathak.; Gupta, 2022).

Dentre os polímeros mais utilizados, o maior volume de produção e utilização concentra-se no polietileno (PE), polipropileno (PP) e politereftalato de etileno (PET), devido às suas propriedades versáteis, como alta resistência mecânica, durabilidade e ampla aplicabilidade em embalagens e produtos industriais (Chu *et al.*, 2021; Chu *et al.*, 2023).

O setor florestal também contribui de forma acentuada na economia. O Brasil possui uma área expressiva de 9 milhões de hectares de florestas plantadas. Essas áreas florestais são fundamentais para a produção industrial, desempenhando um papel crucial em diversas áreas da cadeia produtiva. A produção de *Pinus* desempenha um papel significativo no mercado nacional, consolidando-se como uma das principais culturas florestais do país que em 2021 representou 19,4% da área total de florestas plantadas destinadas à produção industrial (IBÁ, 2021). Isso mostra a relevância econômica e ambiental do *Pinus* dentro do setor florestal brasileiro.

A intensa atividade do setor madeireiro no Brasil gera uma quantidade significativa de resíduos provenientes tanto da extração quanto do processamento da madeira. Esses resíduos, se não forem geridos de maneira adequada, podem contribuir de forma expressiva para a contaminação do meio ambiente (de La Gree *et al.*, 2014; de Lima *et al.*, 2020; Amin *et al.*, 2022; Laverde *et al.*, 2022).

Nesse sentido, uma das estratégias para o reaproveitamento de resíduos plásticos e lignocelulósicos é sua aplicação como agregados na matriz cimentícia. Essa abordagem não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais, mas também impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias no setor da construção civil (Mohammed; Rahim, 2020; Ahmed *et al.*, 2022). Os produtos resultantes dessa inovação tendem a apresentar

melhores propriedades e a oferecer soluções mais econômicas e eficazes para o mercado da construção civil (Hamada *et al.*, 2024).

Alguns estudos foram conduzidos sobre a incorporação de reforços poliméricos e lignocelulósicos em materiais de matrizes cimentícias. Como, por exemplo, a incorporação de PET na produção de fibrocimento extrudado (Mendes *et al.*, 2021a), o uso de resíduo de madeira de *pinus*, casca de arroz, casca de café e PET na produção de painel cimento madeira (Mendes *et al.*, 2021b), a aplicação de resíduos de PET como reforços em concreto (Parhi; Patro, 2024). Esses estudos demonstram melhorias nas propriedades dos compósitos, incluindo a redução da densidade do material, o aprimoramento do isolamento térmico, a diminuição dos custos de produção, além da manutenção das propriedades mecânicas.

Estudos conduzidos por Eugenio *et al.*, (2021) e Eugenio *et al.*, (2023a) na produção de telhas de concreto com RMF demonstraram grande potencial de utilização desse resíduo nas formulações. Contudo, observou-se que à medida que se aumenta a quantidade de RMF nas formulações, seja na substituição do PPC tanto do cimento, há um aumento da condutividade térmica dos compósitos. Além disso, com o aumento do RMF na substituição do cimento, há uma redução da resistência mecânica. Perante isso, a adição de fibras neste estudo pode vir a favorecer as propriedades dos compósitos, podendo permitir, inclusive, o aumento da proporção de RMF utilizado nas formulações.

Diante desse contexto, esse estudo teve como objetivo avaliar o efeito do uso de resíduos de minério de ferro, madeireiro e polimérico sobre as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais, térmicas e acústicas, além da viabilidade econômica aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Visando a otimização das propriedades dos compósitos, a destinação adequada e agregação de valores a diferentes resíduos, possibilitando aumentar a sustentabilidade e aprimorar novas tecnologias na produção dos materiais de construção.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Caracterização do resíduo de mineração

O RMF proveniente das operações da Samarco Mineração S.A., localizada no estado de Minas Gerais foi caracterizado em relação à sua composição mineralógica. Foram determinados os teores de Al_2O_3 (Óxido de alumínio), SiO_2 (dióxido de silício) e Fe (Ferro) por fluorescência de raios x (XRF), mediante o equipamento TRACER 5 G (Bruker, Alemanha).

Para análise granulométrica foram utilizadas peneiras com as aberturas de 4,260 mm, 2,360 mm, 1,180 mm, 0,600 mm; 0,300 mm e 0,150 mm. Com isso pôde-se determinar a porcentagem média retida e a porcentagem média retida acumulada em cada peneira, a dimensão máxima característica e o módulo de finura em conformidade com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Uma apuração mais detalhada das curvas granulométricas para o RMF e para o cimento Portland foi obtida por meio de uma série de peneiras com aberturas menores (0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm, 0,075 mm, 0,053 mm, 0,045 mm e 0,038 mm), conforme metodologia descrita em Eugenio *et al.* (2023a) e Narciso *et al.* (2023). Além disso, o RMF foi caracterizado em relação ao seu teor de areia, silte e argila conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016) e com relação à sua densidade conforme a norma NBR NM 52 (ABNT, 2019).

2.2 Ensaio de pozolanicidade

Foi realizado o ensaio de pozolanicidade de acordo com a norma NBR 5752 (ABNT, 2014) para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. Para esse ensaio, foram utilizados o cimento CII F 32, areia normalizada, resíduo de mineração e água, em que foram confeccionadas duas argamassas (A e B), tendo à argamassa A em sua composição cimento, areia normalizada e água e a argamassa B, cimento, areia normalizada, resíduo de mineração e água. Na argamassa B o cimento foi substituído em 25% pelo resíduo de mineração.

Em concordância com a NBR 7215 (ABNT, 1996), após a confecção dos corpos de prova as amostras permaneceram por 24 horas nos moldes em câmara úmida e após esse tempo foram retiradas dos moldes e ficaram imersas em uma solução de água e cal virgem pelo período de 27 dias. Transcorrido esse tempo, foram feitos os testes de ruptura dos corpos

de prova em uma máquina universal de ensaio modelo WDW 300-E (Arotec, Brasil) a uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

O índice de desempenho do resíduo de mineração com o cimento portland aos 28 dias foi calculado pela Equação 1.

$$I_{\text{cimento}} = \left(\frac{F_{CB}}{F_{CA}} \right) * 100 \quad (01)$$

Em que:

I_{cimento} - Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

F_{CB} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B;

F_{CA} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa A.

A classificação do resíduo de mineração como material pozolânico foi realizada mediante a utilização das normas NBR 12653 (ABNT, 2015) e ASTM C 618-19 (ASTM, 2019).

2.3 Caracterização dos materiais de reforço

O material lignocelulósico utilizado como reforço foi o resíduo de maravalhas proveniente do processo de desengrosso da madeira de *Pinus spp.* processada na marcenaria da Universidade Federal de Lavras. Posteriormente, no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis (CIMS –UFLA), o material passou pelos processos de moagem, secagem e separação granulométrica. A moagem foi feita, inicialmente, em moinho de facas da marca TRAPP, modelo TRF 650 com peneira de 0,8 mm, afim de ser executada uma primeira redução das partículas do *Pinus spp.*. A secagem foi feita em estufa da marca SOLAB, modelo SL – 102, a uma temperatura de 105 ° C por 3 horas.

Para análise dos constituintes químicos do material lignocelulósico o mesmo foi processado em moinho Willey. O material utilizado foi aquele cuja granulometria ficou entre 40 e 60 mesh. Após o material ser acondicionado a temperatura de 20 ±2 °C e umidade relativa de 65 ±5 %, até a obtenção de massa constante, foram determinados seus teores de lignina pela norma NBR7989 (ABNT, 2010), extrativos totais pela norma NBR14853 (ABNT, 2010), cinzas pela norma NBR13999 (ABNT, 2003), celulose pela metodologia adotada por Kennedy, Phillips e Willians (1987)) e hemicelulose (Holocelulose – celulose).

O PET foi adquirido da empresa *GLOBAL PET RECICLAGE*, localizada em São Carlos, São Paulo, Brasil, em partículas já processadas para uso. O PP, que foi adquirido na forma de tampas de garrafas, foi processado em moinho de facas da marca TRAPP, modelo TRF 650 com peneira de 0,8 mm, de modo a se obter partículas menores para a produção.

Na mensuração das partículas dos materiais de reforços foram obtidas informações relativas ao seu comprimento, diâmetro e índice de esbeltez. Essas informações foram obtidas mediante a utilização do software *ImageJ* com a mensuração do comprimento e espessura de 30 partículas (Narciso *et al.* 2023). Para a caracterização física foram realizadas as análises de densidade de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

2.4 Análise de aptidão

Este ensaio avaliou a evolução da temperatura de hidratação do cimento. Consistiu em mensurar a evolução da temperatura, separadamente, da mistura das partículas da madeira de *Pinus spp.*, das partículas de PP, das partículas de PET e do RMF com o cimento durante um período de 24 horas. O monitoramento dessa temperatura de reação é utilizado como parâmetro para se determinar o índice de inibição do processo de hidratação do cimento (Hofstrand *et al.*, 1984).

O sistema consistiu em conjunto de sensores que monitoram a temperatura da mistura em uma caixa termicamente isolada. A Tabela 1 apresenta a composição das amostras utilizadas no ensaio de aptidão.

Tabela 1 - Composição das amostras utilizadas no ensaio de aptidão.

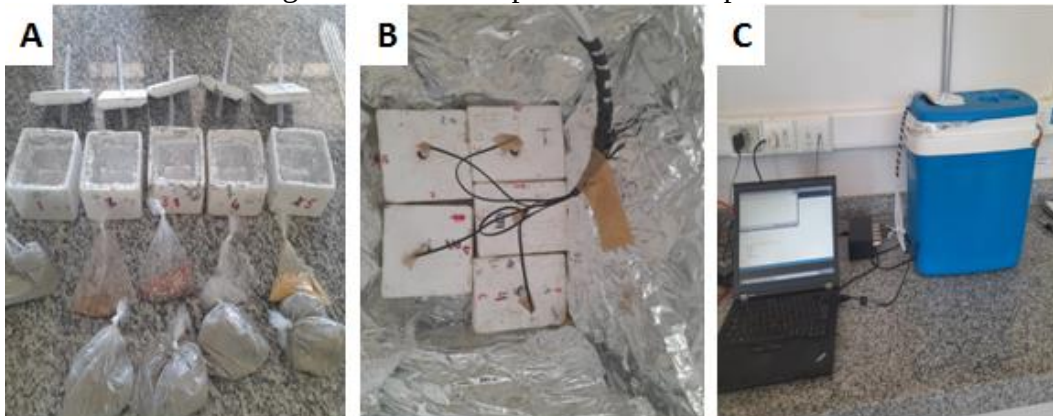
Pasta	Cimento CPV-ARI (g)	Água (g)	RMF (g)	Pinus (g)	PP (g)	PET (g)
P01	200	90	-	-	-	-
P02	200	90	15	-	-	-
P03	200	90	-	15	-	-
P04	200	90	-	-	15	-
P05	200	90	-	-	-	15

Fonte: Do autor (2025).

Cada uma dessas pastas foi preparada em um béquer e transferida para um recipiente de isopor forrado com papel alumínio e conduzidos para uma caixa térmica onde foram inseridos os sensores de temperatura nas pastas produzidas (Figura 1). A temperatura foi registrada a cada 60 segundos em um sistema computadorizado. Os dados foram armazenados

e após serem processados foi analisado o comportamento da cura dos tratamentos com os materiais avaliados em relação à pasta controle.

Figura 1 - Processo para análise de aptidão.



Legenda: (A) Insumos utilizados no ensaio; (B) Pasta com sensores inseridos; (C) Sistema de monitoramento e registro da temperatura.

Fonte: Do autor (2025).

Os índices de inibição foram calculados de acordo com a equação 2 de Hofstrand *et al.* (1984), utilizada por Narciso *et al.* (2023). Além do tempo de hidratação, na equação também foi considerada a temperatura máxima alcançada durante o processo de hidratação.

$$I = 100 \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) * \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) * \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2} \right) \right] \quad (02)$$

$$S'_2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2} \quad (03)$$

$$S_2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2} \quad (04)$$

Em que:

t_2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t'_2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-adição de material;

T_2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T'_2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-adição de material;

S_2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'_2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-adição de material.

Para se classificar a compatibilidade do material adicionado com o cimento foi utilizada a classificação de Okino *et al.* (2004), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Índice de inibição para classificação da compatibilidade dos materiais adicionados aos compósitos.

Índice de inibição	Classificação
$I < 10$	Baixa
$10 < I < 50$	Intermediária
$50 < I < 100$	Alta
$I > 100$	Muito alta

Fonte: Okino *et al.*, (2004).

A classificação do índice de inibição permite avaliar o nível de influência de cada material sobre a cura do cimento e isso visa elucidar os efeitos sobre as propriedades dos compósitos.

2.5 Produção das telhas de concreto

As telhas de concreto foram produzidas conforme as diretrizes especificadas pela norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), nas dimensões médias de 420 mm x 320 mm x 13,6 mm (comprimento x largura x espessura), peso nominal médio aos 28 dias de 4,32 Kg e peso no telhado após montagem de 32,78 kgf/m². O delineamento experimental para a produção das telhas consistiu na substituição do pó de pedra calcária e do cimento pelo RMF em associação com o material de reforço. A Tabela 3 apresenta as formulações que foram utilizadas na produção das telhas de concreto.

Tabela 3 - Formulações para produção das telhas de concreto.

Tratamento	Substituição PPC (%)	Substituição do cimento (%)	Reforços (0,5%)
T01	-	-	-
T02	-	-	PP
T03	-	-	PET
T04	-	-	<i>Pinus spp.</i>
T05	100	-	-
T06	100	-	PP
T07	100	-	PET
T08	100	-	<i>Pinus spp.</i>
T09	-	10	-
T10	-	10	PP
T11	-	10	PET
T12	-	10	<i>Pinus spp.</i>

Fonte: Do autor (2025).

O traço base, em massa, utilizado foi de 1: 2,24 : 0,44 (cimento, areia natural média e pó de pedra calcária), traço definido através de ensaios realizados no CIMS para otimização da formulação e tomando como referência os traços utilizados por Eugenio *et al.* (2021) e Eugenio *et al.* (2023a).

O cimento utilizado foi o CPV-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial) que devido à ausência de pozolana e/ou demais aditivos permite uma avaliação mais eficaz da interação com o resíduo de minério de ferro. Além disso, a finura de seus grãos e o balanço ideal entre a argila e calcário na produção do clínquer proporcionam uma alta resistência inicial (Protasio *et al.*, 2021).

O RMF das formulações foi proveniente da Samarco Mineradora S.A., empresa localizada na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil. Foi utilizado no processo de fabricação das telhas o aditivo *Hangen Block R*, plastificante e densificador de concreto, na proporção de 1% em relação à massa do cimento (Eugênio *et al.*, 2021). O desmoldante para concreto VEDACIT foi aplicado nos moldes a fim de facilitar a remoção das telhas. Os agregados empregados foram a areia natural média e o pó de pedra calcária, que são usualmente utilizados na fabricação de telhas de concreto no sul do estado de Minas Gerais, Brasil.

As matérias-primas foram devidamente pesadas em suas proporções definidas nas formulações (Tabela 3) e inseridos em uma betoneira do fabricante SORRAG DO BRASIL

com capacidade para 400 litros.

Iniciamente, foi feita uma mistura seca para homogeneização dos componentes e posteriormente adicionada água em pequenas proporções até chegar no limite de 11 % da massa total da mistura. Quando a mistura atingiu a textura adequada, a matéria prima foi levada para a máquina de produção de telhas da marca NOWO (Santa Catarina, Brasil), onde as telhas foram produzidas pelo processo de extrusão e compactação. Seguindo as diretrizes da norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), nesse processo foram produzidas 18 telhas por tratamento, sendo 6 corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos aos 28 dias de cura, 6 corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos após envelhecimento acelerado. Além de 3 corpos de prova para ensaios acústicos e térmicos aos 28 dias de cura e 3 corpos de provas para ensaios acústicos e térmicos após envelhecimento acelerado.

Após 24 horas, de cura as telhas foram retiradas dos moldes e armazenadas em temperatura ambiente, onde permaneceram por 28 dias contabilizados a partir do dia da produção em processo de cura. A Figura 2 ilustra o processo de produção das telhas de concreto.

Figura 2 - Processo de produção das telhas de concreto.



Legenda: (A) Matérias-primas para produção das telhas; (B) Homogenização dos componentes; (C) Concreto pronto para produção; (D) Telha de concreto recém produzida; (E) Telha após 24 horas; (F) Telhas em processo de cura.

Fonte: Do autor (2025).

2.6 Caracterização das Telhas de Concreto

As telhas produzidas aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado foram caracterizadas de acordo com suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, microestruturais, além da viabilidade econômica.

2.6.1 Propriedades físicas das telhas de concreto

Passado o período de cura de 28 dias, as telhas foram direcionadas para caracterização das propriedades físicas. As telhas foram imersas em água por 24 horas antes dos ensaios. Para esse ensaio foram utilizados 6 telhas por tratamento, conforme a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Foram coletados os valores de massa seca, massa úmida e massa imersa para definição do seu peso seco, absorção de água e porosidade aparente. A Tabela 4 apresenta os testes realizados e a metodologia aplicada para avaliação das propriedades físicas das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado.

Tabela 4 - Análises físicas e metodologias utilizadas na caracterização das telhas.

Análise	Metodologias
Peso Seco das Amostras	NBR 13858-2 (ABNT, 2009)
Absorção de Água	NBR 13858-2 (ABNT, 2009)
Porosidade Aparente	ASTM C 948-81 (ASTM, 2001)

Fonte: Do autor (2025).

2.6.2 Propriedades mecânicas das telhas de concreto

Seguindo as recomendações da norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a carga de ruptura à flexão foi avaliada com as mesmas 6 telhas utilizadas para a caracterização das propriedades físicas. Foi utilizada uma máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo EMIC 23/100 (Massachusetts, Estados Unidos), com célula de carga de 10 KN. A força aplicada foi distribuída uniformemente e de modo progressivo na seção transversal da telha a uma velocidade 0,10kN/s. Quando ocorreu a ruptura do corpo de provas o valor da carga máxima suportada pela telha foi registrado na interface do equipamento.

2.6.3 Propriedades térmicas das telhas de concreto

Para a avaliação das propriedades térmicas foi realizado o ensaio de transmissão térmica. As análises foram realizadas conforme metodologia descrita por Gandia *et al.* (2019), Vilela *et al.* (2020), Eugênio *et al.* (2021) e Eugênio *et al.* (2023a), além da norma NBR 15220 (ABNT, 2005), que trata do desempenho térmico em edificações.

Dois compartimentos compõem as câmaras emissora e receptora, as quais são devidamente isoladas para evitar interferências do ambiente externo ao ensaio. Dentro da câmara emissora tem uma fonte de calor controlada para manter a temperatura dentro dos padrões do ensaio térmico e dois sensores de temperatura que monitoram a temperatura na emissão e a temperatura na recepção.

As telhas foram posicionadas no equipamento e o ensaio foi realizado simulando a exposição do material a uma temperatura de 50 ° C, com razão de aquecimento de 1° C/ min. com ciclo de ensaio para cada tratamento de 3,5 horas.

O material ensaiado foi inserido entre as duas câmaras de forma a ser a única área de transmissão térmica entre elas. Um dos sensores de temperatura foi fixado na face superior da telha que está voltada para a câmara emissora e o segundo sensor foi fixado na face inferior da telha que está voltada para a câmara receptora. A diferença de temperatura entre esses dois pontos combinados com a espessura do compósito definiu os parâmetros para o cálculo da condutividade térmica das telhas de concreto. Na Figura 3 pode ser observado o processo para ensaio térmico.

Figura 3 - Processo para ensaio térmico da telha de concreto.



Legenda: (A) Visão geral do processo para ensaio térmico; (B) Divisão entre as câmaras de emissão e recepção; (C) Inserção da amostra de telha a ser ensaiada no receptáculo; (D) Sistema eletônico de controle e registro das temperaturas.

Fonte: Do autor (2025)

2.6.4 Propriedades acústicas das telhas de concreto

Para determinação das propriedades acústicas foi utilizado um método alternativo fundamentado em diferentes normas, como a NBR 15575 (ABNT, 2021), que trata do desempenho em edificações habitacionais, a ISO 717 (ABNT, 2013) relativa à classificação dos isolamentos acústicos nos edifícios e ISO 10847 (1997) que trata de barreiras externas ao ruído. O dispositivo é composto por duas caixas isoladas acusticamente entre si e entre o ambiente externo que compõem as câmaras emissora e receptora de ruído. Dentro da câmara emissora foi inserido um calibrador acústico da marca Instrutherm, modelo CAL 5000 o qual foi ajustado para gerar um nível de sinal de 94 decibéis. Na câmara receptora foi instalado um medidor / registrador de nível de som da marca AKROM, modelo KR853, afim de receber e registrar os níveis de sinais que transpuseram os corpos de provas inseridos entre as câmaras emissora e receptora. A partir deste ensaio foi possível calcular a barreira acústica das telhas de concreto, através da Equação 05:

$$BA = 94 - X \quad (05)$$

Onde:

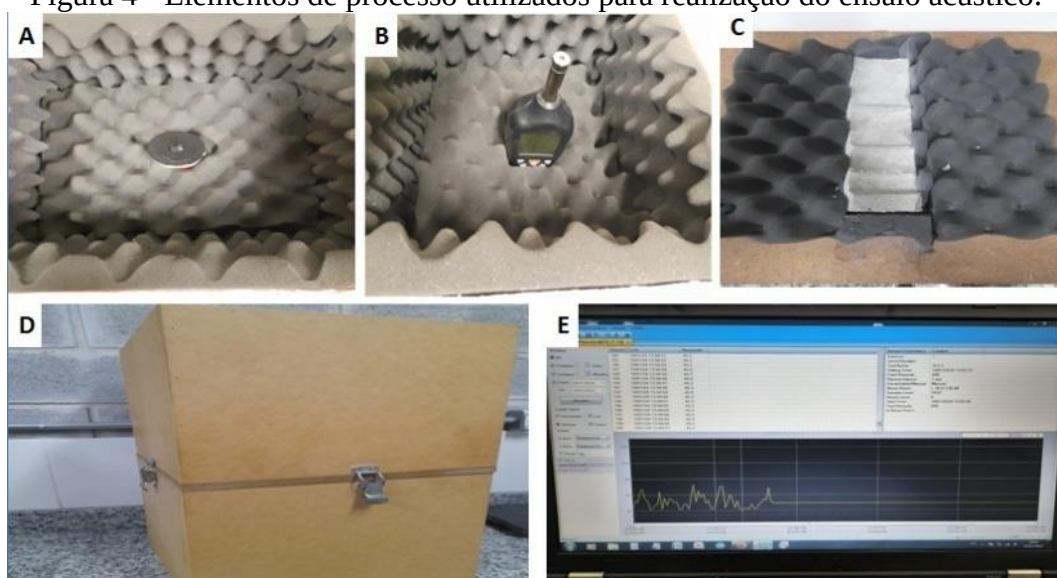
BA: Barreira acústica (dB);

94: Valor do calibrador acústico (dB);

X: Valor resultante em cada ensaio (dB).

A Figura 4 apresenta os elementos de processo utilizados para realização do ensaio acústico.

Figura 4 - Elementos de processo utilizados para realização do ensaio acústico.



Legenda: (A) Instrumento emissor de ruído; (B) Instrumento receptor de ruído; (C) Inserção da amostra de telha a ser ensaiada; (D) Câmaras de emissão e recepção; (E) Software para registro do nível de ruído.

Fonte: Do autor (2025)

2.6.5 Análises microestruturais das telhas de concreto

A caracterização das propriedades microestruturais foi realizada na superfície de ruptura das telhas que foram ensaiadas por flexão estática. Essa observação visa associar o efeito do resíduo de mineração em conjunto com os materiais de reforços sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas dos compósitos, tanto antes quanto após o envelhecimento acelerado. Isso permite o entendimento do efeito de cada tratamento sobre a qualidade do produto.

A análise microestrutural foi realizada mediante a utilização de um microscópio

óptico. Essa análise contribuiu para identificar e elucidar os mecanismos de degradação que ocorreram na microestrutura do compósito.

2.6.6 Análise Difração de Raio X (DRX) das telhas de concreto

Os elementos cristalinos presentes nas matérias-primas (cimento, calcário, RMF, resíduo de *Pinus*, Polipropileno - PP e Politereftalato de etileno - PET) e nos compósitos aos 28 dias e após envelhecimento acelerado foram identificados pela técnica de difração de raio X (DRX). Para a realização da análise foi utilizado o equipamento difratômetro de Raio-X Shimadzu modelo XRD 6100, com radiação de cobre (Cu), 40 kV, 30 mA, faixa de varredura de 20° a 70 °, resolução de 0,02 ° e taxa de varredura de 2 ° min⁻¹.

2.7 Durabilidade das Telhas de Concreto

O envelhecimento das telhas foi baseado no método de envelhecimento acelerado, segundo os procedimentos descritos na norma NBR 13554 (ABNT, 2012) por meio da imersão e secagem dos compósitos. As telhas foram submetidas a seis ciclos de molhagem e secagem, sendo cada ciclo composto por imersão em água por cinco horas e posterior secagem em temperatura de 71 ± 2 ° C por um período de 42 horas. Após o envelhecimento as telhas foram levadas para caracterização física, mecânica, térmica, acústica e microestrutural.

2.8 Viabilidade econômica

Foi avaliada a viabilidade econômica na produção das telhas de concreto para as novas formulações propostas no estudo. Este estudo utilizou da pesquisa quantitativa, com fontes de dados primários obtidos por meio da estratificação dos valores coletados em empresas dos setores e também através de pesquisa de mercado, onde foram coletados os valores das matérias primas utilizadas nas formulações.

As atribuições de custos variáveis aos itens fabricados podem ser efetuadas por meio de fichas técnicas ou lista de componentes que compõem o produto, dessa forma os custos foram analisados comparando a ficha técnica do produto controle com a ficha técnica dos demais tratamentos. Foram coletados valores do custo direto das matérias primas utilizadas na produção das telhas de concreto relacionada ao volume de produção. Não foram considerados os salários e encargos, a depreciação dos equipamentos, a energia elétrica, o aluguel e os

custos de telecomunicações visto que esses não apresentaram variação após a modificação das formulações avaliadas (Wernke, 2015; Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a).

2.9 Análise de dados

As propriedades das telhas foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado (DIC). O software de análise estatística Sisvar foi utilizado para realizar uma análise de variância com fatorial 3x4, considerando 3 tipos de matrizes (controle, substituição de 100% do pó de pedra e substituição de 10% do cimento) e 4 tipos de material de reforço (controle, *pinus*, PP e PET), conforme mostrado na Tabela 4, ambos com nível de significância de 5%. Quando houve interação significativa ou então efeito do fator matriz ou do reforço foi utilizada a análise de teste de média de Scott-Knott, também a 5 % de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do resíduo de mineração

3.1.1 Propriedades físico-química do RMF

A Tabela 5 apresenta a composição química e as propriedades físicas do RMF.

Tabela 5 - Composição mineralógica e propriedades físico químicas do resíduo de minério de ferro.

Composição Química	Teor (%)
Fe	10,86
SiO ₂	71,46
Al ₂ O ₃	0,83
Cl	0,66
Sn	0,03
K ₂ O	0,01
Mn	0,01
Propriedades	Valores
Densidade	3,10 (g/cm ³)
pH	6,8
Argila	52 (dag/Kg)
Silte	16 (dag/Kg)
Areia	32 (dag/Kg)
Classificação do material	Tipo 3 - Textura argilosa

Legenda: Fe = Ferro; SiO₂ = Dióxido de silício; Al₂O₃ = Óxido de alumínio; Cl = Cloro; Sn = Estanho; K₂O = Óxido de potássio; Mn = Manganês.

Fonte: Do autor (2025).

Altas concentrações de Fe (Ferro) e Al₂O₃ (óxido de alumínio) podem afetar positivamente a resistência do material e acelerar o processo de hidratação, pois são componentes que fazem parte da composição química do cimento, formando o ferro aluminato tetracálcio (C4AF) (Shettima *et al.*, 2018; Yao *et al.*, 2020a; Eugenio *et al.*, 2023b). Os altos teores de SiO₂ (dióxido de silício) também contribuem para a hidratação do compósito e ganho de resistência, pois quando em contato com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) liberado durante a hidratação do cimento, auxilia na formação de silicatos de cálcio mono-hidratados (Xu, Zhang, Liu., 2020; Narciso *et al.*, 2023).

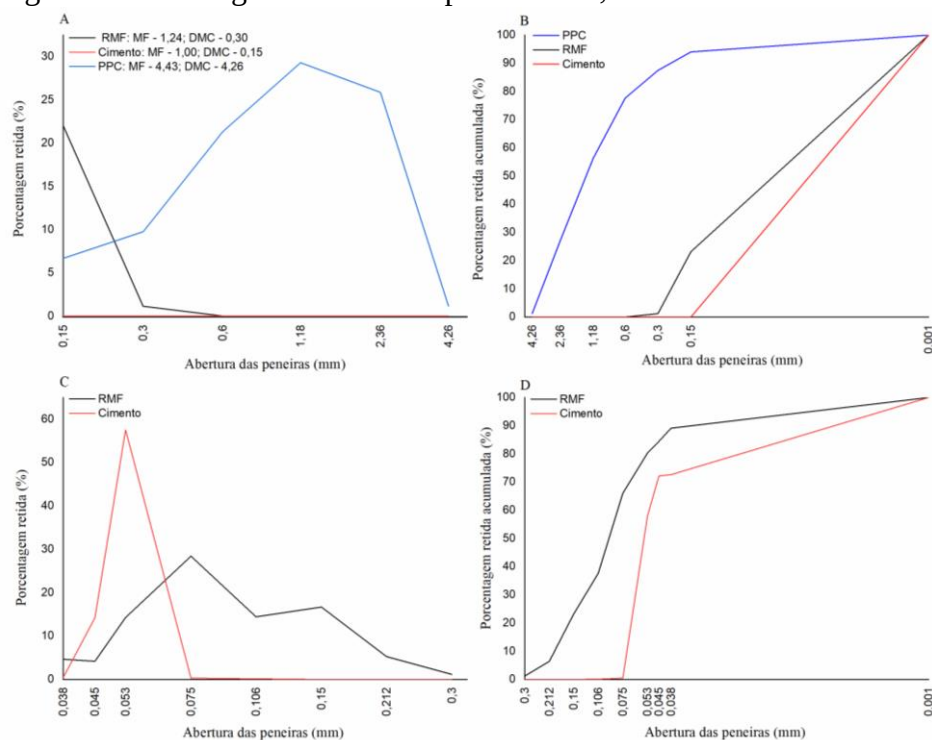
Segundo a ASTM C 618-19 (ASTM, 2019), o RMF apresentou propriedades que o classificam como pozolânico devido à sua composição química, já que a soma das quantidades de dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e ferro (Fe) foi maior que 70 %, sendo uma das premissas dessa norma. Além disso, o RMF apresenta uma alta concentração de argila (Tabela 5). A incorporação de argila em matrizes cimentícias tem se mostrado vantajosa, uma vez que as partículas cerâmicas possuem um tamanho menor em comparação com aquelas do cimento. Essa característica resulta em uma menor quantidade de poros e uma estrutura granular mais compacta, conforme observado por Li *et al.* (2020). As faixas de massa específica dos rejeitos de minério de ferro variam entre 2,34 g/cm³ e 3,49 g/cm³, dependendo do tipo de minério, da localização geológica e do método de

processamento empregado (Alhassan *et al.*, 2022). A densidade do cimento *Portland* é de 3,15 g/cm³, valor muito próximo ao valor da densidade apresentada pelo RMF que foi de 3,10 g/cm³, o que propicia melhor interação entre o RMF e o cimento (Consoli *et al.*, 2022).

3.1.2 Caracterização granulométrica

As porcentagens retidas e retidas acumuladas para os RMF, PPC (pó de pedra calcária) e para o cimento *Portland* são apresentadas na Figura 5. Além do módulo de Finura (MF) e dimensão máxima característica (DMC) que são apresentadas na Figura 5A. As curvas granulométricas para o RMF e para o cimento *Portland* foram obtidas por meio de uma série de peneiras com aberturas menores (0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm, 0,075 mm, 0,053 mm, 0,045 mm e 0,038 mm) que são apresentadas na Figura 5C e 5D. O objetivo foi identificar melhor as partículas mais finas, já que o RMF apresentou 76,86% e o cimento 100% das partículas abaixo da menor abertura da última peneira (0,150 mm) no ensaio feito com peneiras recomendadas pela norma NBR NM 248 (ABNT,2003).

Figura 5 - Curvas granulométricas para o RMF, PPC e cimento *Portland*.



Legenda: A – Porcentagem retida conforme série regular de peneiras recomendadas pela norma NBR NM 248 (ABNT,2003). B - Porcentagem retida acumulada conforme série regular de peneiras recomendadas pela norma NBR NM 248 (ABNT,2003). C - Porcentagem retida conforme peneiras com aberturas menores D - Porcentagem retida acumulada conforme peneiras com aberturas menores.

Fonte: Do autor (2025).

A curva granulométrica da porcentagem retida (Figura 5A), mostrou que o PPC apresentou maiores quantidades de partículas retidas nas peneiras de 2,36 mm e 1,18 mm, com valores de 25,85% e 29,29%, respectivamente, resultando em um módulo de finura de 4,45 e uma dimensão máxima característica de 4,26 mm.

O cimento *Portland* apresentou um módulo de finura de 1,00 e dimensões máximas característica um valor de 0,150 mm. Além disso, a maior concentração de suas partículas foi verificada na peneira de 0,053 mm (Figura 5C).

O RMF apresentou um módulo de finura de 1,24 e dimensão máxima característica um valor de 0,30 mm. A Figura 5C demonstra que a maior quantidade de material retido foi verificada na peneira de 0,075mm (28,38%), o que mostra que a maior proporção de partículas desse material está representada na fração areia muito fina (0,053 a 0,125 mm) (Silva *et al.*, 2002).

Partículas finas desempenham um papel importante no aprimoramento das propriedades dos compósitos por serem capazes de preencher os espaços vazios formados entre as partículas de areia e PPC. Esse processo de preenchimento resulta em um empacotamento mais eficiente das partículas e conseqüentemente reduz a porosidade (Amaral *et al.*, 2020; OREN *et al.*, 2020), o que contribui para o aumento da resistência mecânica além de poder vir a influenciar nas propriedades térmicas e acústicas das telhas de concreto (Laidani *et al.*, 2020; Eugenio *et al.*, 2023a).

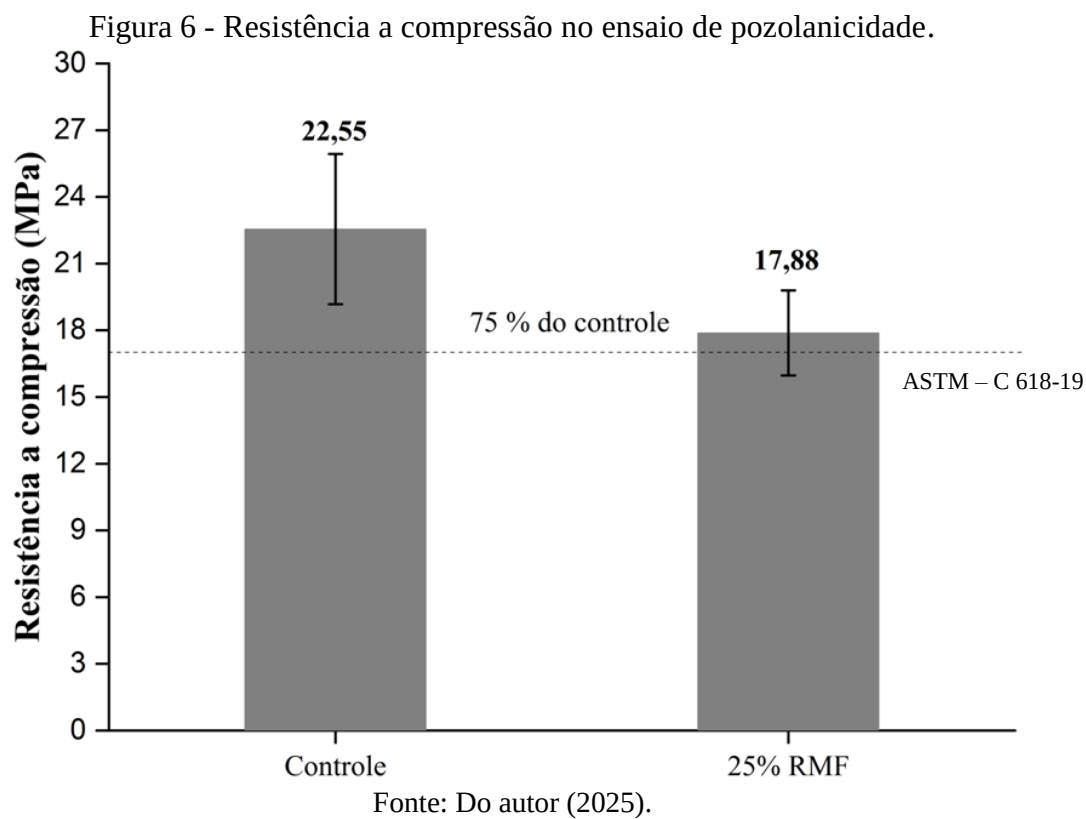
3.1.3 Ensaio de pozolanicidade

O resultado obtido no ensaio de pozolanicidade foi de 79,32 % de resistência à compressão para o tratamento com RMF em relação ao tratamento controle. Para a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) o índice de determinação de pozolanicidade deve ser no mínimo de 90% e por essa determinação o RMF não se enquadra como material pozolânico, podendo o mesmo ser usado como agregado.

Contudo, conforme as diretrizes da norma ASTM C 618-19 (ASTM, 2019), para que os corpos de prova produzidos com RMF sejam considerados pozolânicos devem apresentar índice de pozolanicidade acima de 75%. De acordo com essa norma, pode-se constatar que o RMF obteve um bom desempenho mecânico e é considerado um material pozolânico, podendo o mesmo ser usado como substituto ao cimento. Além do mais, por ter a maior parte de sua porção granulométrica em 0,075 mm (Figura 5C), possui alta área superficial e isso favorece uma boa interação com a matriz cimentícia, o que pode gerar

menos poros e proporcionar uma melhor compactação (Saeli *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2020).

A Figura 6 apresenta os valores médios da resistência à compressão para os corpos de prova controle e daqueles com substituição de 25 % do cimento portland por RMF.



3.2 Caracterização dos materiais de reforços

3.2.1 Caracterização química do material lignocelulósico

Os valores médios para os componentes químicos das partículas de madeira de *Pinus* ssp. estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização química da madeira de *Pinus ssp.*.

Componentes	Média	Desviopadrão
Cinzas	0,25%	0,04
Extrativos	2,83%	0,27
Lignina	24,62%	0,61
Holocelulose	76,47%	4,53
Celulose	49,12%	1,19
Hemicelulose	27,35%	1,19

Fonte: Do autor (2025).

O baixo teor de extrativos (2,83%) da madeira de *pinus* utilizada no experimento confere vantagens significativas para sua aplicação. A presença de altos níveis de extrativos é um fator desfavorável que reduz a compatibilidade dos materiais lignocelulósicos com a matriz cimentícia. Isso ocorre devido ao efeito negativo que a presença de extrativos exerce sobre o processo de cura do cimento, prejudicando a interação entre as partículas de madeira e a matriz cimentícia (Jiang *et al.*, 2015; Narciso *et al.*, 2023).

Ardanuy, Claramunt, Toledo Filho (2015) afirmam que a celulose e a lignina desempenham um papel crucial nos compósitos, especialmente na função de reforço, contribuindo para uma maior resistência mecânica. Os resultados da análise química em questão indicam teores elevados tanto de celulose (49,12%) quanto de lignina (24,62%).

Os resultados da análise apresentam semelhanças com os dados encontrados na literatura para o *Pinus oocarpa*. Teodoro *et al.* (2016) relataram uma composição de 5,20% de extrativos, 59,05% de celulose, 21,22% de hemicelulose e 28,30% de lignina. Narciso *et al.* (2023), também encontraram valores semelhantes para extrativos, com 5,43%, além de 47,24% de celulose, 21,00 % de hemicelulose, 26,07% de lignina e 0,26 % de cinzas.

A variação na composição do *Pinus* é atribuída à disparidades de idade entre os indivíduos avaliados, bem como à sua procedência, local de origem, espécie, região da árvore em estudo, espaçamento e taxa de crescimento distinta entre os diferentes gêneros. Assim, os valores encontrados na análise química podem apresentar pequenas variações entre os estudos analisados (Gbadegesin *et al.*, 1993; Valério *et al.*, 2008; Luostarinen; Hakkarainen, 2019).

3.2.2 Análise morfológica e física dos materiais de reforços.

A Tabela 7 apresenta os valores referentes à caracterização morfológica dos materiais de reforços utilizados. A relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro, é um parâmetro crítico que define o índice de esbeltez de uma material na composição de misturas de concreto. O índice de esbeltez dos reforços exerce influência direta na resistência à fissuração do concreto, atuando por meio do mecanismo de ponte entre fissuras. Além disso, a fração volumétrica e o comprimento das fibras afetam o comportamento do concreto após a fissuração, contribuindo para o aumento da ductilidade e da capacidade de absorção de energia (Parhi; Patro,2024).

Tabela 7 – Caracterização morfológica dos materiais de reforços.

Variável	Reforço		
	PP	PET	Pinus
Comprimento (mm)	2,44 (0,77)	4,84 (2,10)	0,82 (0,20)
Diâmetro (mm)	1,20 (0,36)	2,15 (0,53)	0,31 (0,07)
Índice de esbeltez	1,13 (0,77)	2,36 (1,14)	2,83(1,10)

Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão da amostragem.

Fonte: Do autor (2025).

Reforços com menor diâmetro tendem a impactar positivamente o desempenho mecânico, enquanto reforços com diâmetros maiores apresentam menor eficácia nesse aspecto, visto que reforços com diâmetros menores ocupam os vazios gerados na matriz, promovendo uma interface mais eficiente (Kerni *et al.*, 2020). Nas figuras 5A e 5C podem ser percebidas as diferenciações granulométricas dos componentes das formulações, em que os vazios gerados entre as diferentes granulometrias podem ser preechidos pelos reforços. Além disso, quando o comprimento da fibra é inferior ao comprimento mínimo necessário para que as fibras desenvolvam tensões equivalentes à sua resistência, a eficiência na transferência de tensão entre a fibra e a matriz é reduzida comprometendo as propriedades mecânicas do compósito (de Klerk *et al.*, 2020; Marvilla *et al.*, 2021).

O PP apresentou o menor índice de esbeltez, seguido pelo PET e *Pinus*. Partículas com menor índice de esbeltez possuem um formato mais esférico, podendo ocupar os vazios da matriz e reduzir a porosidade. Partículas mais alongadas se orientam melhor no momento da extrusão das telhas, mas podem se entrelaçar e aumentar a porosidade. Em estudo sobre reforços poliméricos em fibrocimento extrudado, Mendes *et al.*(2021a) observaram que as

fibras de PET com menor índice de esbeltez proporcionaram uma menor porosidade após o envelhecimento acelerado dos compósitos. Fato devido à geometria das partículas comparadas a fibras mais alongadas de pneu, que apresentaram maior índice de esbeltez.

Quando o valor do índice de esbeltez aumenta, isso indica um aumento no comprimento da fibra ou uma redução em seu diâmetro. Esse parâmetro é essencial porque permite a padronização das dimensões geométricas dos reforços, pois em vez de variar diâmetro e comprimento separadamente, ambos podem ser ajustados simultaneamente com base no valor do índice de esbeltez (Marvilla *et al.*, 2021).

Os reforços com resíduos de PP, PET e *Pinus* apresentaram índices variados de comprimento, diâmetro e esbeltez (Tabela 7), o que influencia diretamente seu comportamento ao serem incorporados na matriz cimentícia. Essas diferenças geométricas definem o papel de cada componenete como agente de preenchimento ou de reforço da matriz (Bzeni,2024).

As partículas de *Pinus* apresentaram densidade de $0,530 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$, valor próximo ao registrado por César *et al.* (2014), que obteve o valor médio de $0,456 \text{ g/cm}^3$. Em estudos adicionais sobre a densidade da madeira de *Pinus*, observou-se que os valores variaram entre $0,556 \text{ g/cm}^3$ e $0,597 \text{ g/cm}^3$, dependendo do tipo de solo de origem da madeira (Kozakiewics *et al.*, 2020). Madeiras com densidade básica superior a $0,50 \text{ g/cm}^3$ são classificadas como de densidade média (Narciso *et al.*, 2023).

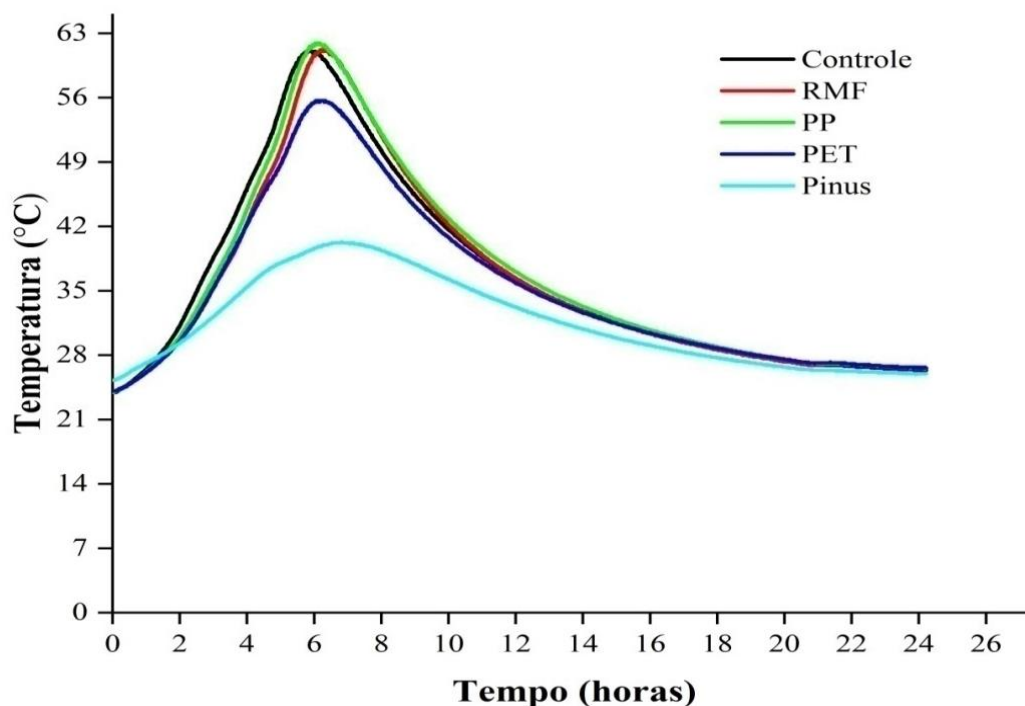
A densidade do resíduo PP foi de $1,17 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$, valor ligeiramente superior ao encontrado na literatura em análise do PP virgem que foi de $0,90 \text{ g/cm}^3$ (Alsabri,Tahir, Al-Ghamdi, 2022) e para o PP reciclado de $0,95 \text{ g/cm}^3$ (Faraj; Sherwani; Daraei, 2019). O resíduo PET apresentou densidade de $1,35 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$, segundo a literatura o valor da densidade do PET está entre $1,3 \text{ g/cm}^3$ a $1,4 \text{ g/cm}^3$ (Stride *et al.*,2024). A densidade dos materiais de reforço podem influenciar diretamente na densidade final dos compósitos produzidos, impactando significativamente em suas propriedades físicas e mecânicas (Kerni *et al.*, 2020).

3.3 Análise de aptidão

As curvas de inibição são de suma importância para entendimento dos efeitos da utilização das matérias primas sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos (Eugenio *et al.*,2023a). A Figura 7 exibe as curvas de hidratação para o tratamento controle, formulada com água e cimento, e para os tratamentos formulados com os

componentes inseridos nas formulações das telhas de concreto (RMF, PP, PET e *Pinus*).

Figura 7 – Curva de inibição para os componentes inseridos nas formulações.



Fonte: Do Autor (2025).

Os tratamentos controle, RMF e PP atingiram as temperaturas máximas próximas a 61° C em um tempo aproximado de 6 horas. O PET atingiu a temperatura máxima de 55°C , também em um período de tempo de aproximado de 6 horas. Uma possível contaminação do resíduo de PET, por esse ser proveniente de embalagens alimentícias em geral, pode ter influência na redução da temperatura máxima atingida. Contudo, a pasta contendo partículas de *pinus* atingiu a temperatura máxima de 40,31°C em um período de tempo de 6,82 horas .

Diante desses valores, o índice de inibição para o RMF (0,01), para o PP (0,00), e para o PET (0,08) ficaram abaixo de 10, os classificando como materiais de baixo índice de inibição. Vale ressaltar que não foi considerado somente a temperatura máxima atingida, mas também o tempo necessário para tal. Relativo à madeira de *pinus*, seu nível de classificação foi de 18,13 e é dado como intermediário, pois está entre os limites de 10 e 50 (Okino *et al.*, 2004). Essa discreta elevação do índice de inibição para a pasta contendo partículas de *pinus* está relacionada à presença de extrativos da madeira, que diminuem a temperatura máxima e aumentam o tempo para atingí-la (Narciso *et al.*, 2023).

Em estudo realizado com resíduo de minério de ferro aplicado em fibrocimento extrudado, Eugenio *et al.* (2023b), obtiveram o valor de 0,05 % de índice de inibição para

RMF. Esse resultado vem de encontro ao valor obtido no presente estudo com o valor de 0,01% de índice de inibição. Dessa forma, o RMF não apresenta interferência significativa no processo de cura do cimento.

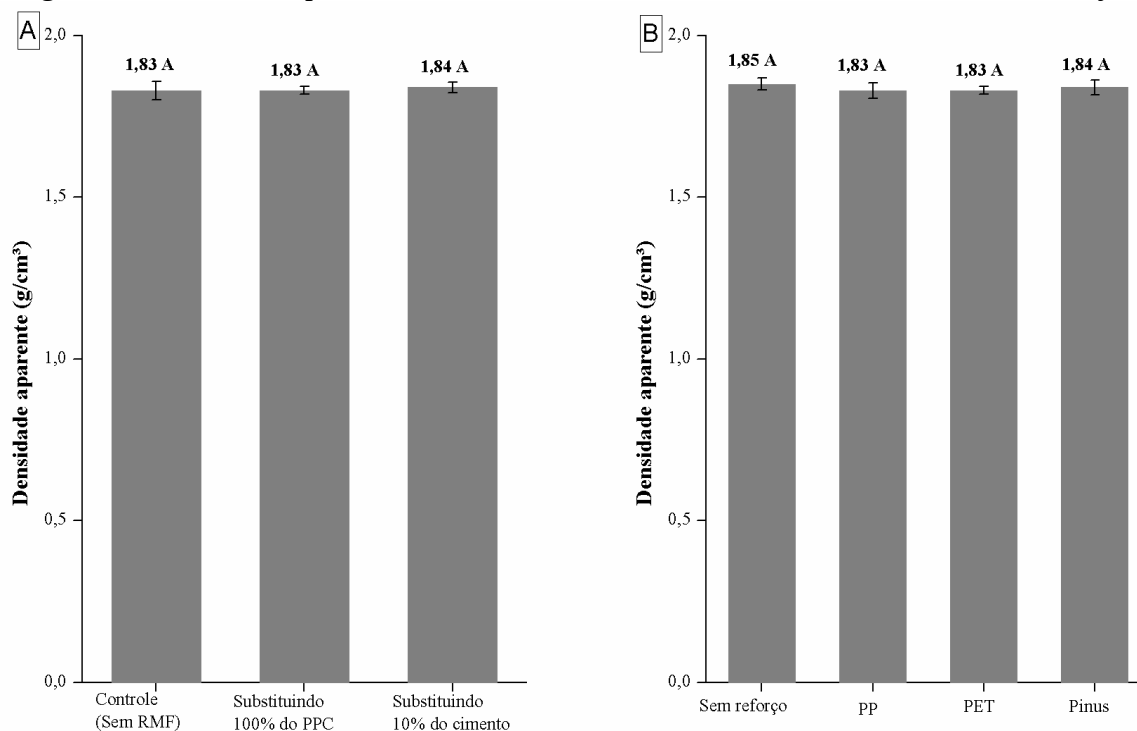
Para o resíduo de *pinus*, o valor de 18,13 % obtido para o índice de inibição também está em consonância com a literatura. Estudo realizado por Marques *et al.* (2016) obteve um índice de 23,71 % para resíduo de eucalipto, o que leva a valores semelhantes para resíduos do setor madeireiro.

3.4 Caracterização das Telhas de Concreto

3.4.1 Propriedades físicas das telhas de concreto

Na Figura 8 pode-se observar os valores médios para a densidade aparente das telhas de concreto aos 28 dias de cura. Não houve interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços. Ao analisar a utilização do RMF e dos tipos de reforços de forma independente, também não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre a densidade das telhas.

Figura 8 - Densidade aparente aos 28 dias considerando o efeito do RMF e dos reforços.



Legenda: A – Considerando o efeito do RMF. B - Considerando o efeito dos Reforços. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Contudo, após a realização do envelhecimento acelerado, foi observado efeito de interação significativo entre os fatores avaliados (Tabela 8).

Tabela 8 - Densidade aparente após envelhecimento acelerado (g/cm³).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	1,90(0,05) Ba	1,85(0,05) Aa	1,85(0,04) Aa
PP	1,81(0,04) Aa	1,84(0,02) Aa	1,96(0,08) Bb
PET	1,93(0,04) Bb	1,82(0,05) Aa	1,94(0,08) Bb
Pinus	1,90(0,08) Bb	1,83(0,03) Aa	1,92(0,04) Bb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se que para as telhas com 100% de substituição de PPC por RMF foi a única situação que não houve diferenciação entre os tipos de reforços, isso se deve à uma menor granulometria do RMF em relação ao PPC (Figura 5A) que padroniza a

densificação da matriz e não permite que o efeito dos reforços seja evidenciado. Enquanto para o controle (sem utilização de RMF) apenas o reforço de PP se diferenciou dos demais tratamentos sendo obtido a menor densidade. O PP apresentou o menor índice de esbeltez dentre os reforços (Tabela 7) e sua geometria permite a formação de mais vazios na matriz, reduzindo a densidade dos compósitos. Para os tratamentos com 10% de substituição de cimento por RMF, o uso dos três tipos de reforço promoveu aumento significativo da densidade das telhas.

Ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica controle dentro de cada tipo de reforço, observou-se que o RMF não tem efeito algum na densidade das telhas de concreto, seja substituindo o PPC ou 10% do cimento. Em relação ao reforço com PP, a interação do PP com a substituição do cimento promoveu aumento significativo da densidade das telhas, o que pode estar associado ao reduzido tamanho das partículas do RMF e PP, vindo a promover uma melhor composição granulométrica entre as matérias-primas. Esse efeito não foi observado na substituição do pó de pedra por resíduo de mineração quando em associação com o reforço de PP.

Para os reforços com *Pinus* e PET houve diferenciação estatística em relação à matriz controle apenas quando houve a substituição total do PPC, promovendo a redução da densidade das telhas, o que pode estar associado ao tamanho das partículas de PPC, que detêm um valor superior às partículas de RMF (Figura 5C), pelo qual o PPC foi substituído. Isso levou a um menor recobrimento pelo cimento das partículas de RMF, o que pode estar associado ao maior índice de esbeltez do *Pinus* e PET em relação ao PP (Tabela 7), gerando menor compactação da matriz e consequentemente menor densidade.

Ao comparar os valores médios de densidade das telhas aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, verificou-se um aumento na densidade dos compósitos após o envelhecimento acelerado, isso é devido à redução dos poros após o período de cura resultante da constante hidratação dos compósitos através dos ciclos de molhagem e secagem. A reprecipitação da fase cimentícia menos estável e a dissolução de íons provenientes de grãos anidros promovem uma melhoria na adesão do material, além disso, o desenvolvimento do silicato de cálcio hidratado contribui para a densificação do compósito (Farrapo *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2021a).

Em estudos realizados em telhas de concreto, Eugenio *et al.* (2023a) e Eugenio *et al.* (2021) evidenciaram que o uso do RMF em substituição de 10 % do cimento e em 100% do PPC também não afetou a densidade dos compósitos. Mendes *et al.* (2021) não observaram efeito significativo na densidade de fibrocimentos ao se adicionar partículas de PET até a

concentração de 3%.

Nas Tabelas 09 e 10 pode-se observar os valores médios para o peso seco das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, repectivamente. Em ambas as situações foram observadas interações estatísticas significativas entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 9 – Peso seco para telhas de concreto aos 28 dias de cura (dN/m²).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	31,61(0,89) Aa	32,07(0,71) Aa	32,70(1,14) Ba
PP	33,58(0,82) Ba	33,58(0,68) Ba	32,82(0,73) Ba
PET	32,27(1,05) Aa	32,24(0,44) Aa	32,79(0,77) Ba
<i>Pinus</i>	31,08(0,91) Aa	32,29(0,70) Ab	30,68(0,50) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Tabela 10 – Peso seco para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (dN/m²).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	30,27(0,76) Aa	32,99(0,45) Ab	33,88(1,48) Bb
PP	33,73(0,99) Bb	34,25(0,78) Bb	32,86(0,78) Ba
PET	33,07(0,74) Ba	33,12(0,80) Aa	33,26(1,07) Ba
<i>Pinus</i>	29,97(0,76) Aa	33,00(1,10) Ac	31,61(0,57) Ab

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura (Tabela 09), ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se que tanto para o controle (sem utilização de RMF) quanto para as telhas com 100% de substituição de PPC por RMF apenas o reforço de PP se diferenciou dos demais tratamentos sendo obtido o maior peso seco. Para os tratamentos com 10% de substituição de cimento por RMF o reforço com *Pinus* se diferenciou dos demais, apresentando o menor peso seco. Isso se deve à menor densidade do *Pinus* ($0,530 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$) em relação aos demais reforços aliado a uma menor quantidade de cimento que diminui a intensidade das reações de cura. Ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica dentro de cada tipo de reforço, observou-se que somente o reforço com resíduo de *Pinus* e com 100% de substituição de PPC

por RMF promoveu aumento significativo do peso seco. Isso pode estar relacionado ao tamanho das partículas de *Pinus* (Tabela 7) que se interagem com a menor granulometria do RMF (Figura 5A).

Considerando os resultados após o envelhecimento acelerado (Tabela 10), ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para o controle houve um aumento do peso seco ao adicionar RMF na composição das telhas de concreto. Essa tendência se mostra condizente na avaliação aos 28 dias de cura (Tabela 09). O reforço com PET não demonstrou diferença estatística entre as variações de inclusão de RMF na matriz, já o PP apresenta uma redução do peso seco ao substituir 10 % do cimento por RMF. Com relação ao *pinus* apresenta uma redução mais acentuada na substituição de 10% do cimento por RMF. Esse fato pode estar associado à uma menor quantidade de cimento que diminui a intensidade das reações de cura.

Analisando o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se que os reforços de PP e PET apresentaram maior peso seco, devido às suas maiores densidades. Para a substituição de 100 % do PPC apenas o PP demonstrou diferença estatística com o maior valor de peso seco (34,25 dN/m²). Já na substituição de 10 % de cimento por RMF o *pinus* apresentou o menor valor (31,61 dN/m²). Isso pode estar associado à menor densidade do *pinus* ($0,530 \pm 0,002$ g/cm³) em relação aos demais reforços, aliado à uma menor quantidade de cimento que diminui a intensidade das reações de cura.

Há um ligeiro aumento após o envelhecimento acelerado para o peso seco dos compósitos, isso é devido a uma maior densificação da matriz causada pela redução de poros (Teixeira *et al.*, 2020). Além disso, todos os tratamentos estão de acordo com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a qual limita o peso seco em 48 dN/m².

Nas Tabelas 11 e 12, respectivamente, pode-se observar os valores médios para a porosidade aparente das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Para os dois períodos de cura foi observada interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 11 - Porosidade aparente para telhas de concreto aos 28 dias de cura (%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	18,26(0,37) Aa	19,64(1,04) Aa	19,63(1,93) Aa
PP	18,66(0,87) Aa	18,73(0,74) Aa	21,26(1,41) Ab
PET	19,81(1,52) Aa	20,74(1,31) Ba	19,60(1,44) Aa
<i>Pinus</i>	21,53(2,44) Ba	22,08(1,57) Ba	26,19(1,21) Bb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura (Tabela 11), ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que o reforço com *Pinus* apresentou a maior índice de porosidade para as telhas sem RMF e com substituição do PPC e cimento. Esse evento pode estar associado ao seu índice de inibição (18,13) que é dado como intermediário. Isso está relacionado à presença de extrativos da madeira, que afetam as reações de cura do cimento aumentando o número de poros (Narciso *et al.*, 2023).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz, observou-se que não há efeito significativo na substituição tanto do PPC quanto do cimento na produção de telhas de concreto seja em telhas sem reforço ou naquelas produzidas com reforços de PET. Para o reforço com PP e *Pinus* observou-se um aumento da porosidade na substituição de 10% do cimento por RMF. Esses resultados estão associados à redução do material ligante, o que reduz o recobrimento e junção das demais matérias-primas, assim como também aos menores índices de esbeltez dos dois tipos de reforços, reduzindo a compactação e alinhamento do material de reforço.

Considerando os resultados após o envelhecimento acelerado (Tabela 12), e analisando o efeito de cada tipo de matriz dentro de cada tipo de reforço, observou-se que também não há efeito significativo na substituição tanto do PPC quanto do cimento na produção de telhas de concreto seja em telhas sem reforço ou naquelas produzidas com reforços de PET. Já para o PP observou-se um aumento significativo da porosidade na substituição de 10% do cimento por RMF. A redução da quantidade de material ligante aliada ao baixo índice de esbeltez do PP (1,13) pode contribuir para aumento do teor de vazios. O reforço com *pinus* apresentou menor valor de porosidade quando na formulação com substituição do PPC por RMF, esse fato pode estar associado à diferença de granulometria

entre o PPC e o RMF (Figura 5A), em que o RMF ocupa melhor os espaços na matriz, atuando como preenchimento e reduzindo o número de poros (Narciso *et al.*, 2023).

Tabela 12 - Porosidade aparente após envelhecimento acelerado (%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	18,64(1,42) Ba	18,00(0,63) Aa	17,52(1,22) Aa
PP	16,21(0,65) Aa	16,73(1,08) Aa	19,52(1,63) Bb
PET	17,50(1,34) Ba	18,05(0,66) Aa	19,11(2,12) Ba
<i>Pinus</i>	22,87(1,36) Cb	19,91(0,90) Ba	23,93(0,97) Cb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz, observou-se que as combinações de adição de RMF (0% , 100% do PPC e 10 % do cimento), o reforço com *pinus* apresentou a maior índice de porosidade. Isso está relacionado à presença de extrativos da madeira, que afetam as reações de cura do cimento, aumentando o número de poros (Narciso *et al.*, 2023). As imagens apresentadas na Tabela 14 evidenciam as alterações do teor de vazios nos compósitos.

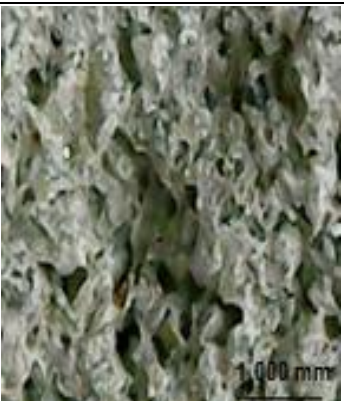
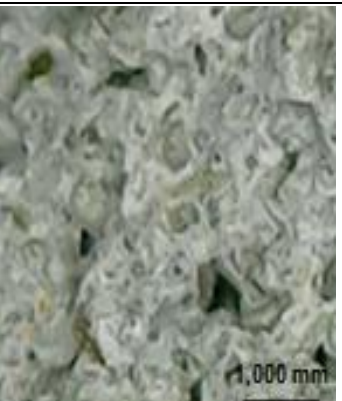
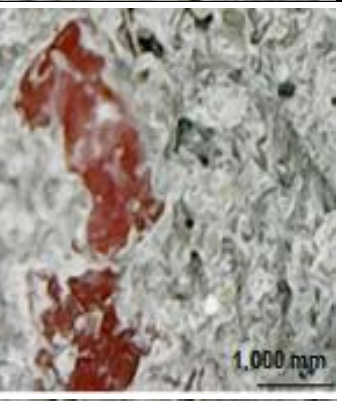
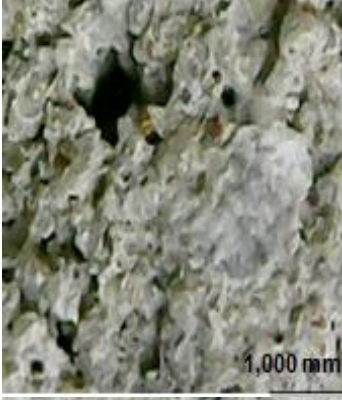
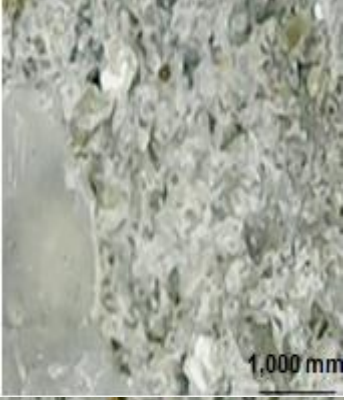
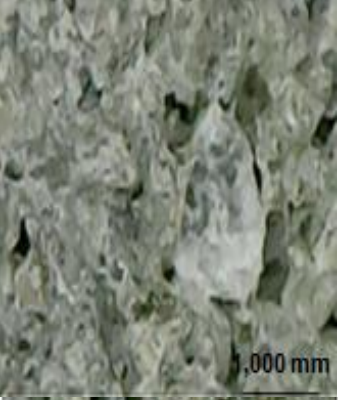
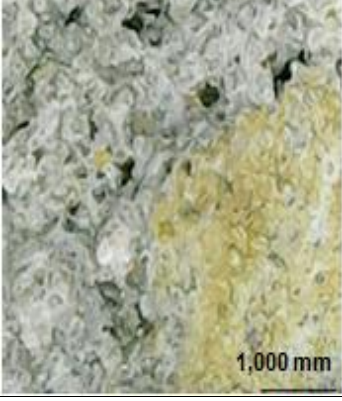
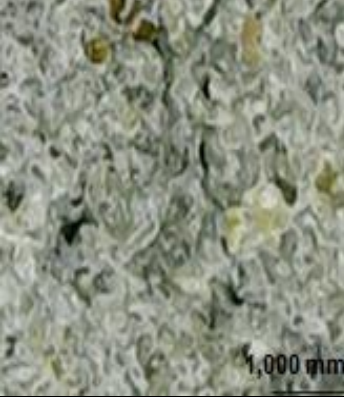
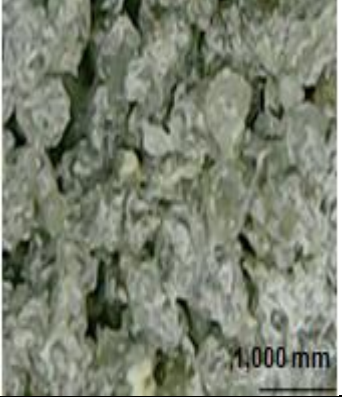
O componente das formulações mais efetivo no aumento da porosidade foi a utilização do reforço com o *Pinus*. Devido aos seus constituintes químicos, há um retardo na cura do cimento favorecendo o aumento dos poros. Fato evidenciado pelo seu índice de inibição (18,13) que foi o maior dentre os reforços utilizados. Outro fator relevante é a substituição do cimento pelo RMF. A diminuição do cimento diminui a quantidade de material ligante, criando ligações mais fracas e gerando mais vazios (Eugênio *et al.*, 2023a). Ressalta-se que a combinação com maior porosidade (26,19 %) é dada pela substituição de 10 % do cimento combinada com a adição do reforço de material lignocelulósico.

Nas Tabelas 13 e 14, respectivamente, pode-se observar as imagens microestruturais para as telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Destacam-se nas imagens apresentadas nas tabelas a diminuição do número de poros dos compósitos após o envelhecimento acelerado. Isso é devido ao processo de molhagem e secagem dos compósitos durante o envelhecimento acelerado, quando a constante hidratação favorece o processo de cura reduzindo o número de vazios melhorando a qualidade da zona de transição interfacial (Eugenio *et al.*, 2023). Esses resultados seguem alinhados com o aumento da densidade aparente devido à redução dos poros após o período de cura com a constante

hidratação dos compósitos através dos ciclos de molhagem e secagem. Choi *et al.*(2016) e Teixeira *et al.* (2020) também observaram diminuição nos valores de porosidade aparente com o aumento da densidade aparente dos compósitos.

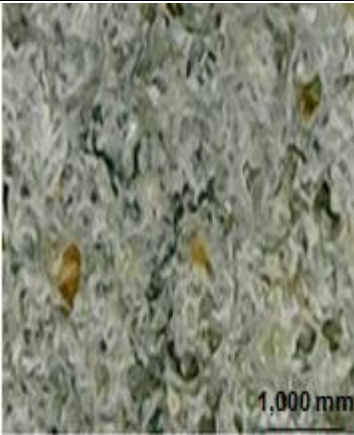
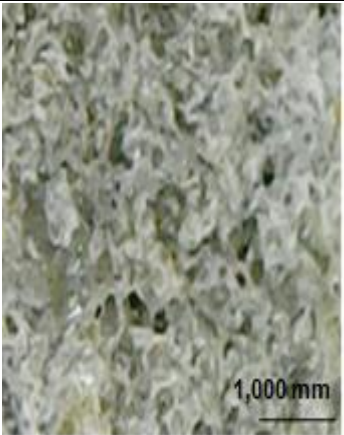
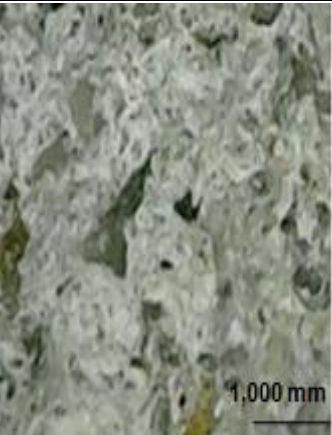
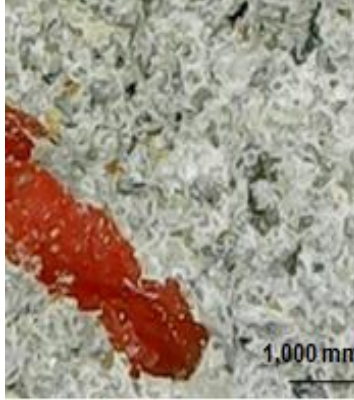
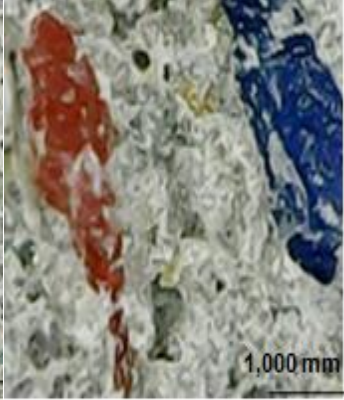
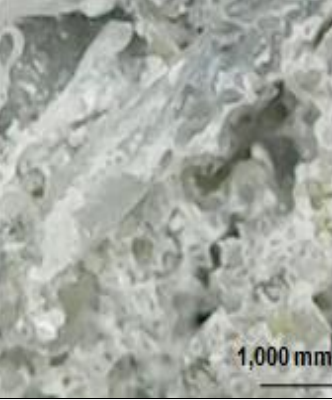
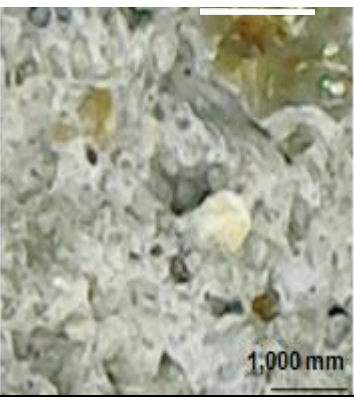
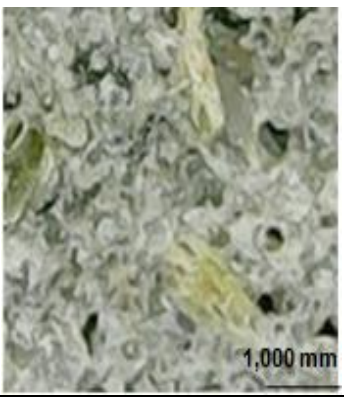
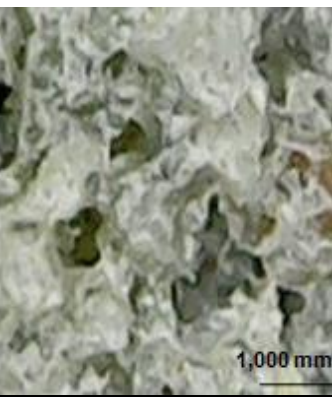
Além disso, pôde-se observar o aumento do número de poros na combinação de substituição de 10% do cimento com reforços de resíduos de *Pinus* e também um recobrimento intenso das partículas de PP, apresentando baixo teor de vazios tanto no controle quanto com adição de RMF (Tabela 14).

Tabela 13 – Microestrutura das telhas de concreto aos 28 dias de cura.

Reforço	Substituição por RMF		
	0%	100 % PPC	10 % cimento
Sem reforço			
PP			
PET			
<i>Pinus</i>			

Fonte: Do autor (2025).

Tabela 14 – Microestrutura das telhas de concreto após envelhecimento acelerado.

Reforço	Substituição por RMF		
	0%	100 % do pó de pedra	10 % do cimento
Sem reforço			
PP			
PET			
<i>Pinus</i>			

Fonte: Do autor (2025).

As Tabelas 15 e 16, respectivamente, apresentam os valores médios para a absorção de água das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Para ambos períodos de cura foram observadas interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 15 - Absorção de água para telhas de concreto aos 28 dias de cura(%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	9,77 (0,13) Aa	10,68 (0,41) Ab	10,67 (0,73) Ab
PP	10,35 (0,47) Ba	10,20 (0,42) Aa	11,54 (0,79) Bb
PET	10,81 (0,95) Ba	11,23 (0,29) Ba	10,75 (0,60) Aa
<i>Pinus</i>	11,76 (1,24) Ca	12,15 (0,56) Ca	14,15 (0,60) Cb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que em todos os casos, o reforço com *pinus* apresentou o maior índice de absorção de água (11,76% ; 12,15% e 14,15%). Esse efeito também foi observado após o envelhecimento acelerado (Tabela 16) ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se também que em todos os casos, o reforço com *Pinus* apresentou a maior índice de absorção de água (12,05% ; 10,87% e 12,48%)

Esses resultados podem estar associados ao índice de inibição do *Pinus*(18,13), que é dado como intermediário. Os extrativos da madeira afetam as reações químicas do cimento aumentando o teor de vazios (Narciso *et al.*, 2023). Além disso, os resultados seguem proporcionalmente condizentes com os valores da porosidade aparente dos compósitos (Tabela 12). Na substituição do PPC, o reforço com PET apresentou a segunda maior absorção de água (11,23%), esse resultado segue alinhado com o valor de sua porosidade aparente que também foi a segunda maior (20,74%) nessa formulação, conforme apresentado na Tabela 12 e pode ser verificado nas imagens da Tabela 14.

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF) observou-se que para os tratamentos sem reforço um aumento da absorção de água tanto para substituição do PPC quanto para substituição de 10 % do cimento, efeito associado ao aumento da porosidade para ambos os casos (Tabela 11). Já para o PP observou-se um aumento da absorção de água somente na substituição de 10% do cimento por RMF,

aumento também evidenciado na porosidade aparente dessa formulação, conforme demonstrado na Tabela 11. Para o PET não houve variação significativa das formulações com esse reforço, tão quanto na porosidade aparente dos compósitos (Tabela 11). A combinação com maior absorção de água (14,15%) é dada pela substituição parcial do cimento combinada com a adição do reforço de material lignocelulósico. Essa formulação também apresenta o maior valor de porosidade aparente (26,19%), conforme apresentado na Tabela 11, atestando a relação direta entre a porosidade e a absorção de água.

Tabela 16 - Absorção de água para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	9,80(0,70) Ba	9,74(0,27) Ba	9,46 (0,49) Aa
PP	8,97(0,28) Aa	9,10 (0,52) Aa	9,97 (0,71) Ab
PET	9,05(0,63) Aa	9,92 (0,24) Bb	9,82 (0,66) Ab
<i>Pinus</i>	12,05(0,80) Cb	10,87 (0,60) Ca	12,48 (0,72) Cb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados após envelhecimento acelerado, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para o controle não há efeito com adição de RMF na matriz. Para o PP houve elevação significativa com a substituição de 10% do cimento e para o PET na substituição tanto do PPC quanto de 10% do cimento. Para o reforço com *Pinus*, houve uma redução da absorção de água com a substituição do PPC.

Ao analisar o efeito de cada tipo de reforço dentro da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF), observou-se que para o controle houve uma redução da absorção de água tanto para o PP quanto para o PET, seguido de um aumento com a adição de resíduo de *Pinus*. Para a substituição do PPC por RMF houve redução da absorção de água para o PP e um aumento para o resíduo de *Pinus*. Já para a matriz com substituição de 10% do cimento por RMF, somente o resíduo do *Pinus* se diferenciou estatisticamente apresentando o maior valor de absorção de água.

Em ambos os casos, seja ao analisar o efeito da matriz nos reforços ou dos reforços na matriz, observa-se que a relação entre a absorção de água e a porosidade aparente é diretamente proporcional. Eugenio *et al.* (2023a), em estudo sobre a substituição de cimento

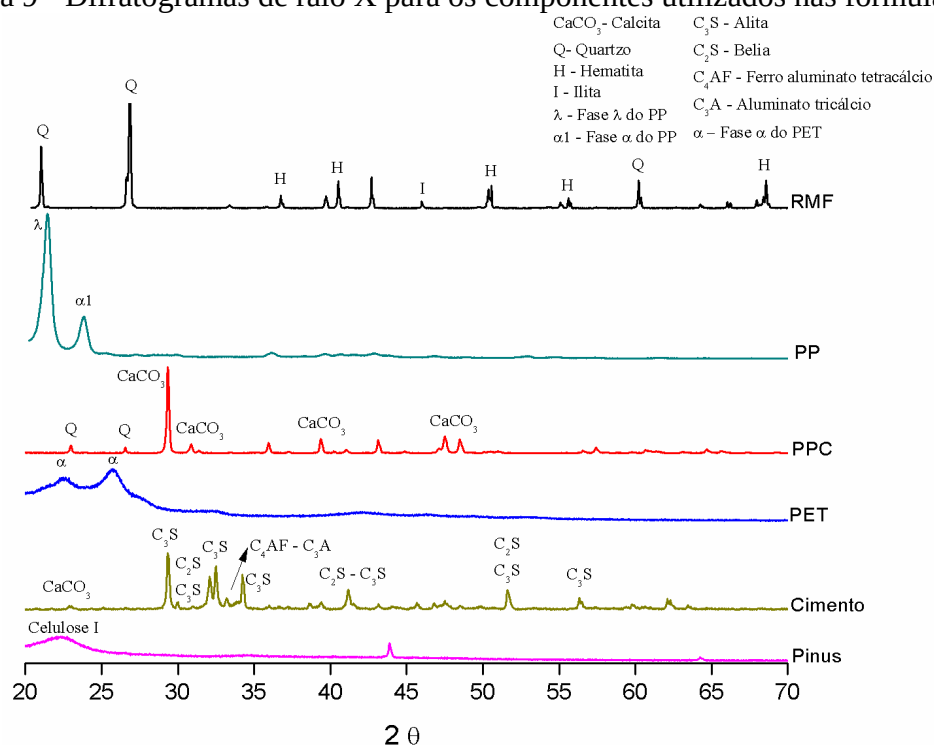
por RMF em telhas de concreto, também identificaram essa tendência proporcional entre a porosidade e a absorção de água nos compósitos produzidos.

Seguindo as diretrizes da norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), que limita a absorção de água para telhas de concreto em 10%, verificou-se que somente o tratamento controle para os ensaios aos 28 dias de cura atendeu a essa especificação. Apesar disso, os tratamentos com substituição de 100% de PPC e 10% de cimento, ambos sem a adição de reforço, apresentarem valores muito próximos para atendimento do valor máximo. Para os ensaios com os compósitos envelhecidos, os tratamentos que receberam o reforço com partículas de *pinus* não atenderam à norma, enquanto os demais tratamentos estão com valores dentro do especificado. No entanto, segundo a norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009), que estipula uma absorção máxima de água em 14,5% para telhas de concreto com densidades entre 1682 kg/m³ a 2002 kg/m³, todos os tratamentos, após 28 dias de cura e envelhecidos, satisfazem os requisitos exigidos para o produto.

3.4.2 Difração de Raios-X (DRX) das telhas de concreto.

Na Figura 9 estão apresentados os difratogramas oriundos das análises de Difração de Raios-X do Cimento, RMF, PPC, PET, PP e *Pinus*..

Figura 9 - Difratogramas de raio X para os componentes utilizados nas formulações.



Fonte: Do autor (2025).

Os principais componentes do cimento Portland incluem alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), responsável pela cura do cimento nos primeiros dias, além do ferro aluminato tetracálcio (C_4AF). A alita representa a maior composição do cimento (50 % a 70%) enquanto a belita é responsável por 20 % a 30%. Quando essas fases reagem com a água, geram de 20% a 30% de portlandita ($Ca(OH)_2$) e de 60 a 70% de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A presença dessas fases cristalinas é destacada na Figura 9 e também foram observadas por Dunuweer e Rajapakse (2018), Eugenio *et al.* (2021) e Fanna *et al.* (2023).

Além disso, a presença de calcita ($CaCO_3$) identificada no pico correspondente à posição 2θ de 23° deve-se à sua incorporação como material carbonático. Para o cimento Portland do tipo CP V-ARI, essa adição é permitida em proporções de até 10% em massa como adição mineral à composição do cimento (Nobre *et al.* 2022).

Além do Quartzo, que apresenta-se de forma abundante no RMF, pode-se perceber a presença de hematita, a qual é composta primordialmente por óxido de ferro (Fe_2O_3), dessa forma, todo o ferro do RMF está presente no mineral hematita. Também está presente, com menor intensidade a ilita, que é um mineral do grupo das argilas. A presença de argila em matrizes cimentícias é vantajosa, pois suas partículas sendo menores que as do cimento reduzem a quantidade de poros e promovem uma estrutura mais compacta, conforme observado por Li *et al.* (2020). Em estudos com RMF, Thejas; Hossiney (2022) e Santos *et al.* (2024) também notificaram a presença desses minerais nas posições destacadas, conforme Figura 9.

O difratograma para o PPC apresentado na Figura 9 revela uma predominância significativa de $CaCO_3$ (carbonato de cálcio, calcita), acompanhado por uma menor intensidade de Quartzo. Estes compostos são fundamentais nos processos de hidratação e endurecimento do cimento, atuando na formação de fases cristalinas essenciais como o silicato de cálcio hidratado (CSH). Estudos realizados por Eugenio *et al.* (2021) e Salman *et al.* (2023) identificaram as mesmas fases cristalinas nas respectivas posições.

O PET apresentou picos bem definidos em $2\theta = 22,5^\circ$ e $2\theta = 26,2^\circ$. Esses picos são característicos da fase cristalina α do PET, que possui estrutura triclínica, conforme relatado em estudos realizados por Barros *et al.* (2020) e Eiogu; Ibeneme; Aiyejagbara, (2020), na identificação das fases cristalinas do PET.

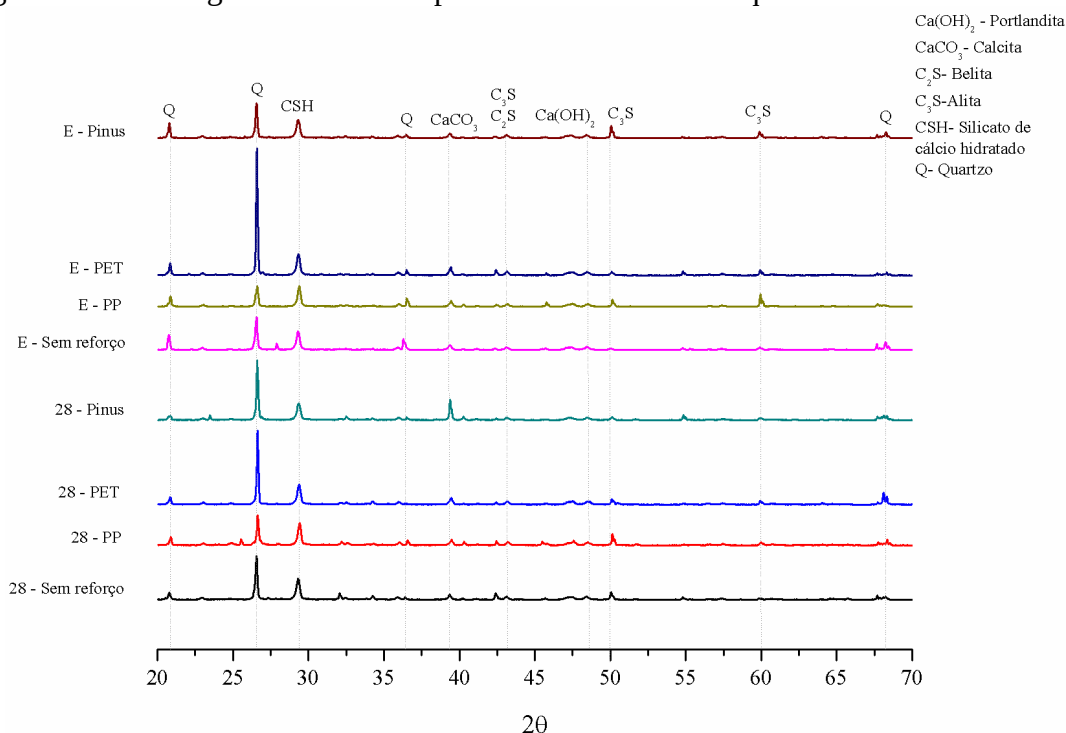
O resultado do difratograma do PP evidencia picos característicos nas posições de 20° e 23° . Apesar da simplicidade de seu componente químico, o PP apresenta uma notável complexidade de estruturas cristalinas (fases), que incluem as fases α e γ . A formação da fase

γ se da a uma taxa de resfriamento mais lenta, e é responsável por oferecer mais flexibilidade ao polímero. Cada uma das formas cristalinas tem seus próprios picos distintos nos padrões de difração de Raios-X. A fase γ é geralmente determinada a partir do pico na posição de $20,07^\circ$ e o pico a partir de $21,86^\circ$ corresponde à fase α do PP (Zhu *et al.*, 2011; Zacccone *et al.*, 2020; Banerjee *et al.*, 2021).

De todos os componentes da madeira, apenas a celulose é parcialmente cristalina, e o padrão de um difratograma de Raios X apresenta as bandas cristalinas na posição de $22,5^\circ$, conforme pode ser observado na Figura 9. Esse pico cristalino é atribuído ao plano cristalográfico 200 da celulose I o que indica a estrutura tridimensional altamente ordenada das fibras de celulose (Broda; Popescu, 2019; García-Iruela *et al.*, 2021; Broda *et al.*, 2022).

Nas Figuras 10, 11 e 12 estão apresentados os difratogramas para os compósitos, em função do tipo de matriz cerâmica utilizada (controle, substituição do PPC por RMF e substituição do cimento por RMF), aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.

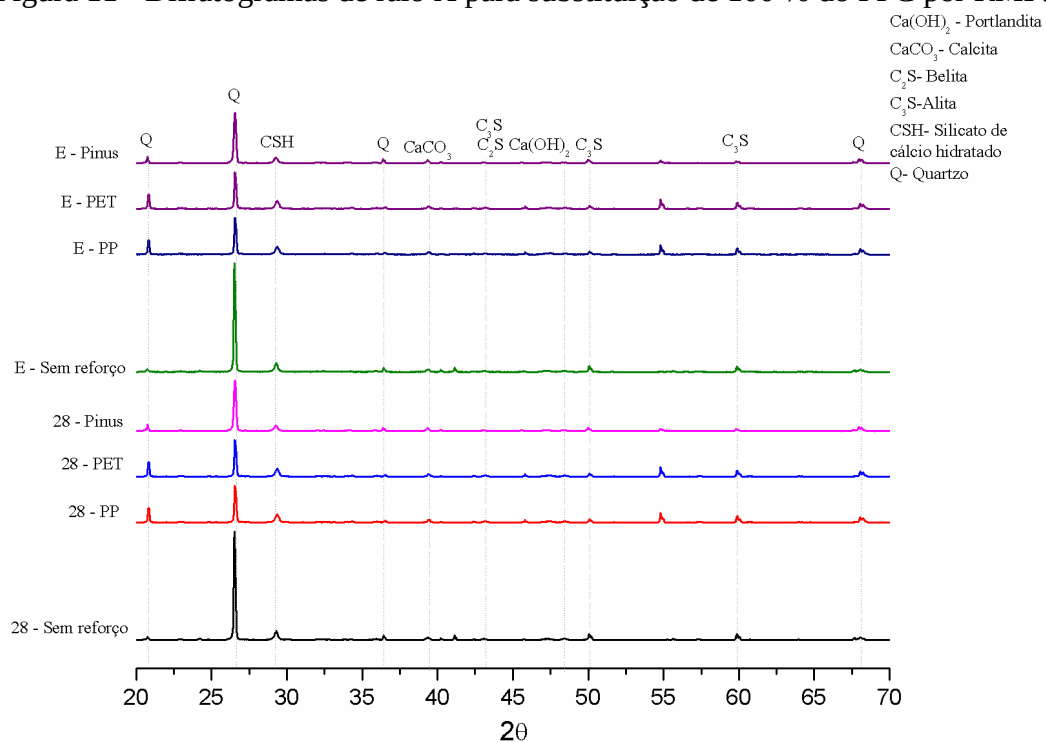
Figura 10 - Difratogramas de raio X para os tratamentos nos quais não foi inserido RMF.



Legenda: 28 – Aos 28 dias de cura. E - Após envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2025).

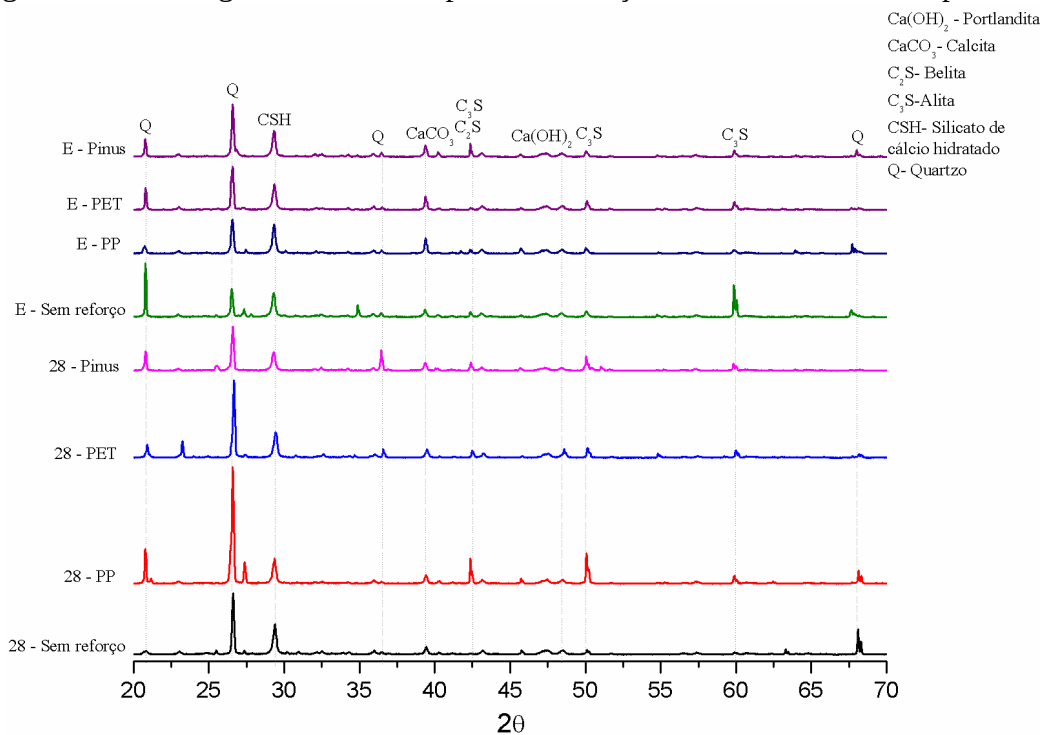
Figura 11 - Difratomogramas de raio X para substituição de 100 % do PPC por RMF.



Legenda: 28 – Aos 28 dias de cura. E - Após envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2025).

Figura 12 - Difratomogramas de raio X para substituição de 10 % do cimento por RMF.



Legenda: 28 – Aos 28 dias de cura. E - Após envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2025).

O Quartzo é o mineral que compõe o maior volume de matéria prima empregado nas

formulações, conforme traço base utilizado no presente estudo. Diante disso, os picos característicos do quartzo se destacam em todos os tratamentos (Figuras 10,11 e 12). A maior intensidade do Quartzo pode ser observada na posição 26° . Contudo destacam-se picos menos intensos nas posições 21° , 36° e 68° , além disso observa-se que o SiO_2 é o principal constituinte do RMF (79,6%), conforme pode ser observado na Tabela 6. As posições desses picos foram destacadas também por outros autores em pesquisas com a matriz cimentícia, conforme estudos realizados por Burduhos Nergis *et al.* (2020) e Atyia; Mahdy; Abd Elrahman (2021).

Os componentes minerais do cimento como C_3S (Silicato tricálcio ou alita) e C_2S (silicato bicálcio ou belita) podem ser observados em todos os tratamentos mesmo após o envelhecimento acelerado (Figuras 10,11e 12), demonstrando contínuo processo de hidratação (Narciso *et al.*, 2023). Os picos são observados nos ângulos de $43,5^\circ$ para ambos os componentes e em 50° e 60° para o C_3S (Atyia;Mahdy; Abd Elrahman, 2021). Contudo, revelou-se uma menor presença dos elementos comparados ao difratograma apresentado apenas para o cimento (Figura 9), indício da formação do silicato de cálcio hidratado (CSH) no processo de hidratação do cimento.

Os componentes do cimento Portland interagem com a água, resultando em produtos fundamentais oriundos do processo de hidratação. Dentre os produtos formados, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) destaca-se como o principal produto gerado. Este composto é essencial para a resistência do concreto, contribuindo significativamente para sua durabilidade e impermeabilidade. Os picos de C-S-H podem ser observados nos ângulos de 29° (Figuras 10,11 e 12), conforme destacado também por Eugenio *et al.* (2021) e Narciso *et al.* (2023).

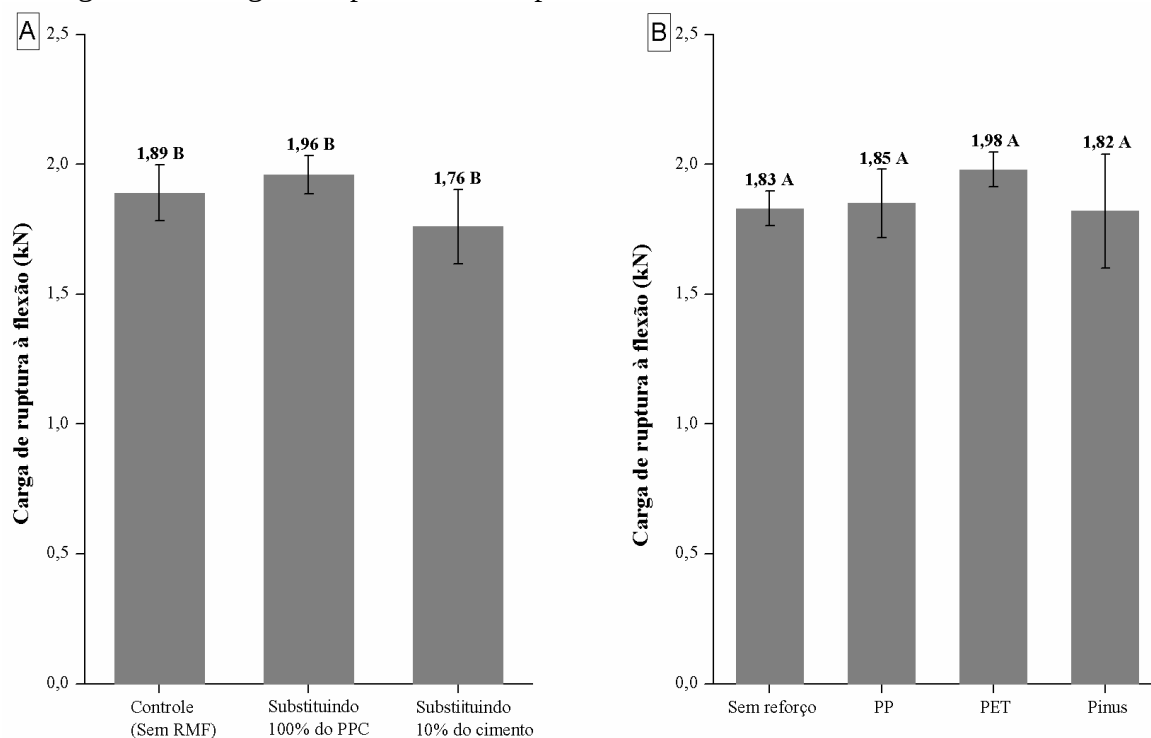
O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de cálcio) é apresentado no ângulo de 48° . Tal componente contribui para a alcalinidade do concreto. Contudo, possui baixa resistência e pode ser lixiviado ao longo do tempo, provocando perda de massa e afetando a durabilidade no concreto. Dentro desse contexto, ainda há a presença do principal produto da reação de carbonatação que é o CaCO_3 (Carbonato de cálcio) que seprecipita predominantemente na forma de calcita e pode ser percebido na posição 39° (Von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020; Zhang; Gan; Xue, 2024).

3.4.3 Propriedades Mecânicas das telhas de concreto.

Na Figura 13 pode-se observar os valores médios para a carga de ruptura à flexão das telhas de concreto aos 28 dias de cura. Não houve interação estatística significativa entre a

utilização de RMF e os tipos de reforços. Ao analisar a utilização do RMF e dos tipos de reforços de forma separada, também não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre a carga de ruptura.

Figura 13 - Carga de ruptura à flexão para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.



Legenda: A – Considerando o efeito do RMF. B - Considerando o efeito dos Reforços. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Contudo, após a realização do envelhecimento acelerado foi observado efeito de interação significativo entre os fatores avaliados (Tabela 17).

Tabela 17 – Carga de ruptura à flexão após envelhecimento acelerado (kN).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	2,14(0,18) Aa	2,21(0,16) Aa	2,90(0,45) Cb
PP	2,63(0,23) Ba	2,39(0,19) Aa	2,62(0,25) Ba
PET	2,31(0,19) Aa	2,34(0,20) Aa	2,41(0,25) Ba
Pinus	2,04(0,21) Aa	2,27(0,23) Aa	1,88(0,15) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se que para as telhas com 100% de substituição de PPC por RMF foi a única situação que não houve diferenciação entre os tipos de reforços, isso se deve à uma menor granulometria do RMF em relação ao PPC (Figura 5A) que preenche os poros da matriz e não permite que o efeito dos reforços sejam evidenciados. Para a formulação controle (sem utilização de RMF) apenas o reforço de PP se diferenciou dos demais tratamentos sendo obtida a maior resistência à flexão. De acordo com a Tabela 16, a formulação reforçada com PP apresentou a menor absorção de água dentre os reforços (8,97%), além disso, conforme a Tabela 12, a formulação reforçada com PP apresentou a menor porosidade aparente dentre os reforços (16,21%). A análise de DRX (Figura 9) revelou a presença da fase γ no PP que contribui para maior flexibilidade do polímero e a combinação desses fatores podem favorecer a resistência à flexão dos compósitos reforçados com PP. Para as formulações com 10% de substituição de cimento por RMF se destacam os tratamentos sem reforço e reforçado com *pinus*. A formulação sem reforço apresentou a menor porosidade aparente (Tabelas 12 e 14), vindo a apresentar a maior resistência à flexão. Além disso, a formulação com *pinus* apresentou os maiores valores de porosidade aparente (Tabelas 12 e 14) e apresentou a menor resistência à flexão.

Ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica dentro de cada tipo de reforço, observou-se que somente a formulação sem reforço e com substituição do cimento por RMF apresentou valor estatisticamente maior em relação às demais formulações. Isso está também vinculado aos valores de porosidade aparente para a formulação apresentadas na Tabela 12 e evidenciadas nas imagens da microestrutura do compósito apresentadas na Tabela 14. Além disso, esse aumento da carga de ruptura, observado mesmo com a remoção de 10% de cimento, está associado a dois fatores principais: a natureza química do resíduo e suas reações pozolânicas que atuam de forma a acelerar o processo de hidratação, promovendo uma interação entre o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), liberado durante a hidratação do cimento, e a sílica presente no RMF. Isso resulta na formação de silicatos de cálcio hidratados, que contribuem para a formação de uma microestrutura mais densa, firme e resistente. Esse processo reduz o tamanho dos poros, promovendo uma estrutura interna mais compacta e aprimorando a qualidade da cristalização do cimento, o que reflete em melhorias nas propriedades mecânicas (Eugenio *et al.* 2023a). Por outro lado, nas formulações com reforços há uma maior presença de poros que inibem um ganho estatisticamente maior de resistência.

Analizando de forma independente os efeitos do RMF e dos reforços, verificou-se que os tratamentos aos 28 dias de cura não estão em concordância com a norma NBR 13858-

2 (ABNT, 2009) que estipula a carga mínima de ruptura à flexão para telhas classe “C” em 2,0 kN. Contudo, após envelhecimento acelerado, com exceção do tratamento com substituição de 10% de cimento utilizando o reforço de resíduo de madeira de *pinus*, que somadas as influências da redução de cimento e consequente redução do elemento ligante, com a inserção de componente lignocelulósico com presença de extrativos que afeta a cura do cimento, todos os demais tratamentos estão em consonância com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009). A constante hidratação dos compósitos nos ciclos de molhagem e secagem favoreceram a cura do concreto preenchendo os poros da matriz e por consequência aumentando a resistência à flexão (Niu *et al.* 2019).

Para a ASTM C1492-3 (ASTM, 2009), que determina a carga mínima de ruptura à flexão acima de 1334 N para telhas que atendam à classificação normativa como “Tipo 1” (densidade entre 1682 kg/m³ e 2.002 kg/m³), todos os tratamentos, aos 28 dias de cura e envelhecidos, atendem aos requisitos necessários para comercialização.

3.4.4 Desempenho térmico das telhas de concreto

A Tabela 18 apresenta os valores médios para a condutividade térmica das telhas de concreto aos 28 dias de cura, onde foi observada interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 18 - Condutividade térmica (λ) aos 28 dias de cura (W/(m.°C)).

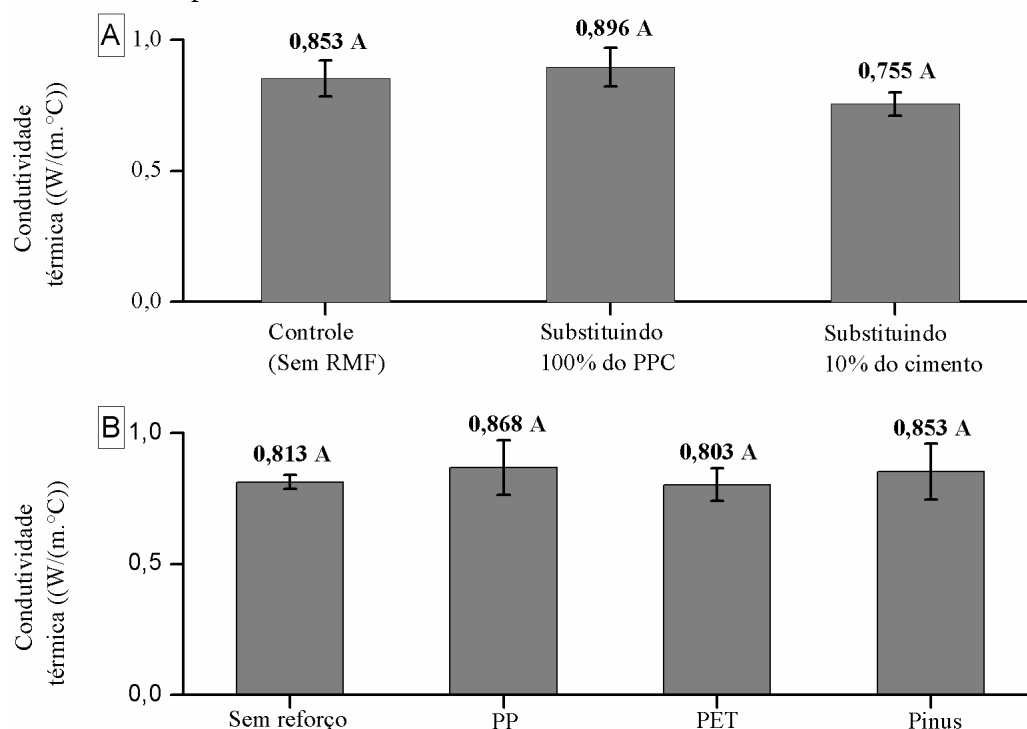
Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro		
	0%	PPC (100%)	Cimento (10%)
Sem reforço	0,570(0,070) Aa	0,645(0,031)Aa	0,735(0,008) Ba
PP	0,590(0,042) Aa	0,630(0,013) Aa	0,820(0,066) Bb
PET	0,555(0,008) Aa	0,708 (0,024) Ab	0,709(0,044) Bb
Pinus	0,540(0,067) Aa	0,885(0,065) Bb	0,590(0,115) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Na Figura 14 pode-se observar os valores médios para condutividade térmica das telhas de concreto após envelhecimento acelerado. Não houve interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços. Ao analisar a utilização do RMF e dos tipos de reforços de forma separada, também não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre a condutividade térmica das telhas.

Figura 14 – Condutividade térmica para as telhas de concreto após envelhecimento considerando o efeito dos reforços e do RMF nos compósitos de forma independentes.



Legenda: A – Condutividade térmica após envelhecimento acelerado considerando o efeito do RMF. B- Condutividade térmica após envelhecimento acelerado considerando o efeito dos reforços. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Para os ensaios realizados aos 28 dias de cura, ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF), observou-se que para as formulações sem adição de RMF não houve efeito significativo com o uso dos reforços comparados à formulação sem reforço. Para a matriz onde foi substituído o PPC, o reforço com *pinus* apresentou diferença significativa dentre os demais tratamentos com o maior valor de condutividade térmica. A razão disso pode ser a menor dimensão das partículas de pinus (Tabela 8), que facilita a interação entre suas partículas e as do RMF. Isso permite uma distribuição mais eficiente do RMF na matriz, o que pode aumentar a condutividade térmica do composto, já que uma melhor distribuição melhora a transferência de calor.

É válido considerar o efeito do RMF na condutividade térmica dos compósitos devido à presença de hematita que tem o valor de condutividade térmica de 11.3W/mK (Mendes *et al.*, 2019) e a análise de DRX do RMF evidenciou a presença intensa de hematita no material (Figura 9), além da composição química do RMF, que apresenta 10,86 % de ferro, conforme demonstrado da tabela 6. Isso contribui para o aumento da condutividade térmica em

compósitos onde são empregados RMF na formulação (Eugênio *et al.*, 2023a).

Por outro lado, na substituição de 10 % do cimento por RMF esse efeito não é tão evidente devido à menor concentração de RMF na formulação e à redução do elemento ligante que é o cimento, aliados à presença dos extrativos do *pinus*. A maior porosidade da formulação com *Pinus* (26,19%), conforme indicado na Tabela 12 e evidenciada nas imagens da Tabela 14, implica numa menor condutividade térmica (0,590 W/(m.°C)). Nesse caso, com o aumento do número de poros dos compósitos há uma redução da transmissão térmica, visto que a condutividade térmica do ar é de 0.025 W/(m.°C), valor muito inferior ao valor de um material sólido (Zhang *et al.*, 2014; Mendes *et al.*, 2019). Uma relação inversamente proporcional entre a porosidade e a condutividade térmica foi evidenciada também por Eugenio *et al.* (2023a) em estudos com telhas de concreto.

Ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica dentro de cada tipo de reforço, observou-se que, para as formulações sem reforço, a adição de RMF não tem efeito significativo na condutividade térmica dos compósitos. O reforço com PP apresentou um valor significativamente maior de condutividade térmica (0,820 W/(m.°C)) apenas na matriz com 10% de substituição de cimento, em comparação com as demais matrizes. Já para o reforço com *pinus* a substituição do PPC por RMF apresentou diferença estatística comparado às formulações sem adição de RMF e com substituição de 10 % do cimento com o maior valor (0,885 W/(m.°C)). O PET apresentou valores maiores (0,710 W/(m.°C)) comparados à formulação sem adição de RMF tanto para a substituição do PPC quanto para substituição de 10% do cimento por RMF. Em ambos os casos, este fato pode estar relacionado a presença de RMF e consequentemente maior concentração de hematita (Figura 9) que possui o valor de condutividade térmica de 11.3 W/(m.°C) (Zhang *et al.*, 2014).

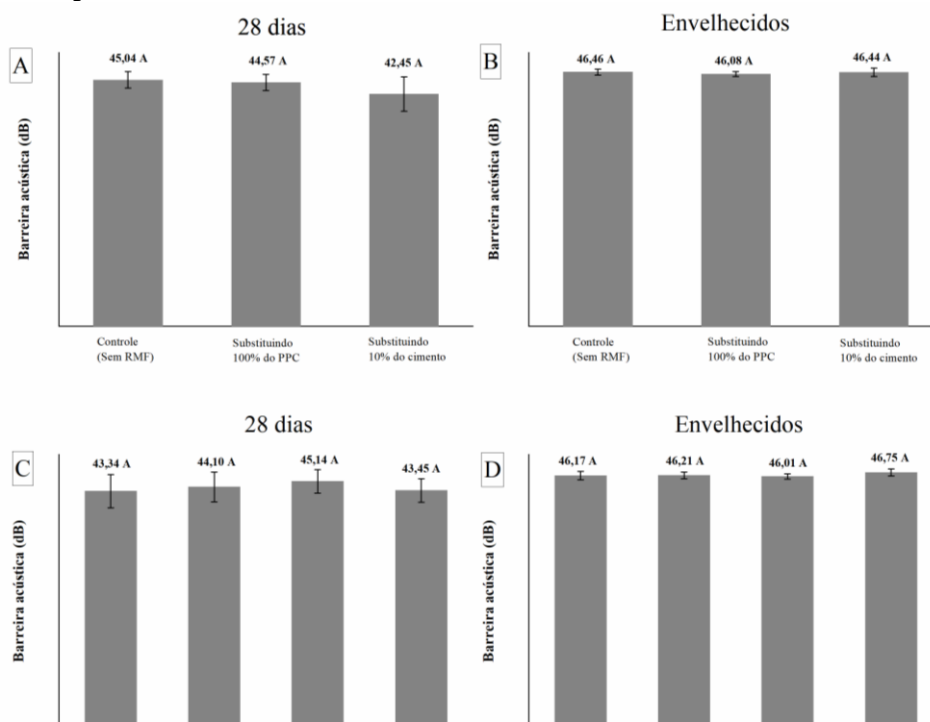
A norma NBR 15220-2 (ABNT, 2022) estipula como referência a condutividade térmica de alguns materiais de construção. A telha cerâmica tem como referência o valor de 1,05 W/(m.°C) para telhas com densidade entre 1,8 g/cm³ e 2,0 g/cm³. Considerando esses valores, todas as telhas de concreto apresentam valores abaixo dos limites de referência estipulados pela norma.

3.4.5 Desempenho acústico das telhas de concreto.

A Figura 15 apresenta os valores médios para a barreira acústica das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Não foram observadas interações estatísticas significativas entre a utilização de RMF e os tipos de reforços para ambos os

períodos de cura. Também não foi observado efeito significativo da substituição dos componentes de matriz por RMF e do tipo de reforço sobre as propriedades acústicas das telhas de concreto.

Figura 15 - Barreira acústica das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado considerando o efeito dos reforços e do RMF nos compósitos de forma independentes.



Legenda: A - Barreira acústica aos 28 dias de cura considerando o efeito do RMF. B - Barreira acústica após envelhecimento acelerado considerando o efeito do RMF. C - Barreira acústica aos 28 dias de cura considerando o efeito dos reforços. D - Barreira acústica após envelhecimento acelerado considerando o efeito dos reforços. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025)

Observou-se que após o envelhecimento houve um ligeiro aumento da barreira acústica dos compósitos. O que está associado à continuidade da cura e fechamento dos poros, tendo mais material densificado.

No caso de compósitos é difícil prever fenômenos visco-inerciais, esse fenômeno refere-se à interação entre os efeitos de viscosidade (resistência ao fluxo de fluidos) e inércia (resistência das partículas a mudanças de movimento), especialmente em meios porosos. Estes fenômenos são particularmente importantes no comportamento de materiais porosos em resposta às ondas ou fluxos que governam a dissipação acústica, pois dependem da distribuição do tamanho dos poros e da conectividade das redes entre vários poros

(Belakroum *et al.*, 2017; Di Giulio *et al.*, 2024). Dependendo do tamanho dos poros, uma onda sonora pode penetrar menos ou mais profundamente no material. Quando os poros são muito pequenos, o material tende a atuar como uma barreira acústica, bloqueando mais o som e favorecendo o isolamento acústico (Tao *et al.*, 2021).

Em estudo conduzido por Lahouioui *et al.* (2020), sobre barreiras acústicas em compósitos cimentícios reforçados com fibras de palmeira, observou-se que a capacidade de isolamento acústico variou entre os tratamentos controle e os reforçados com fibras de palmeira. Essa variação foi influenciada tanto pela quantidade de fibras incorporadas quanto pela frequência do som aplicado, mesmo em formulações com maior absorção de água e, consequentemente, maior quantidade de poros foi observada menor capacidade de isolamento acústico.

3.5 Viabilidade econômica

A análise da viabilidade econômica para as telhas foi realizada com base no custo das matérias-primas utilizadas na produção de telhas de concreto em uma fábrica de telhas localizada em Candeias, Minas Gerais, Brasil.

O estudo foi baseado no custo do Cimento *Portland* CPV-ARI e do PPC, que foram as matérias-primas que sofreram alterações nas formulações, considerando que as demais matérias-primas para a produção de telhas como custos de mão-de-obra, energia, depreciação e demais insumos foram mantidos constantes, uma vez que não foram afetadas pelas formulações avaliadas. A análise econômica assumiu uma produção mensal de 60.000 telhas, por ser a quantidade de telhas produzidas mensalmente na empresa em questão (Eugenio *et al.*, 2021). Também foi avaliado o custo com a inserção dos reforços utilizados na matriz cimentícia.

Considerando o traço proposto (1: 2,24 : 0,44 - cimento, areia natural média e pó de pedra calcária), e a massa unitária das telhas produzidas no presente estudo (4,32 Kg), para a produção mensal de 60 mil telhas foram consumidas 69,984 toneladas de cimento *Portland* e 31,104 toneladas de PPC na formulação de controle. O custo por tonelada de cimento foi de R\$ 446,57 e do PPC foi de R\$ 46,86 (Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a). Dessa forma, para a produção mensal de 60 mil telhas de concreto houve um custo de R\$ 31.253,03 em cimento e R\$ 1.457,68 em PPC.

Em estudo sobre viabilidade econômica na produção de telhas de concreto realizados por Eugenio *et al.* (2021) e Eugenio *et al.* (2023a) foi exposto que o custo unitário de uma

telha de concreto é de R\$ 2,43. Diante disso, obtém-se um custo mensal de produção de R\$ 145.800,00 para uma produção de 60.000 telhas. O cimento corresponde a 21,40 % do custo final do produto e o PPC corresponde a aproximadamente 1,00 %. Na análise da substituição desses insumos por RMF não serão considerados os custos com o resíduo, visto que o mesmo será descartado em barragens de contenção pela empresa de processamento do minério. Contudo, será considerado o custo de transporte do RMF da fonte geradora até a empresa produtora de telhas. Considerando a cidade de Brumadinho, Minas Geras, Brasil, onde ocorreu o último evento de ruptura de barragem em 25 de janeiro de 2019, e a unidade produtora de telhas em Candeias, Minas Gerais, Brasil, a distância entre as cidades é em torno de 200 Km e o preço médio do frete para transporte é de R\$ 55,00 a tonelada (Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a).

Na substituição de 10 % do cimento por RMF serão consumidos mensalmente 6,99 toneladas de RMF em substituição ao cimento a um custo de transporte de R\$ 384,45. O custo mensal com cimento na produção das telhas é de R\$ 31.253,03 e com a substituição de 10 % por RMF haveria uma redução do custo de R\$ 3.125,3 com uma economia de R\$ 2.740,85 mensais considerando o frete do RMF, isso traria uma redução de 1,88 % do custo mensal de produção. Contudo, na substituição de 100% do PPC pelo RMF haveria um custo com transporte de R\$ 1710,70. Esse valor é superior ao custo do PPC utilizado na fábrica que é de R\$ 1.457,68, visto que a fonte de fornecimento do PPC fica a 12 km de Candeias, tendo um valor de frete de R\$ 107,00, dezesseis vezes menor comparado ao frete do RMF. Isso aumenta o custo em R\$ 146,02 mensais com uma representatividade de 0,1 % no custo total de produção. Valor facilmente diluído na produção mensal de 60.000 telhas.

A adoção de uma parceria entre a empresa geradora de RMF e a fábrica de telhas para compartilhamento do custo com o transporte do RMF vem a melhorar o desempenho do custo de produção, visto que também é de interesse da mineradora a destinação ecologicamente correta de seus resíduos minimizando os impactos ambientais e os custos de manutenção com as barragens de contenção (Eugenio *et al.*, 2023a; Xu *et al.*, 2021). Além disso, se a produção das telhas for esbabelecida nas proximidades da mineradora, é possível obter uma diminuição substancial nos custos logísticos e gerar uma redução dos custos de produção.

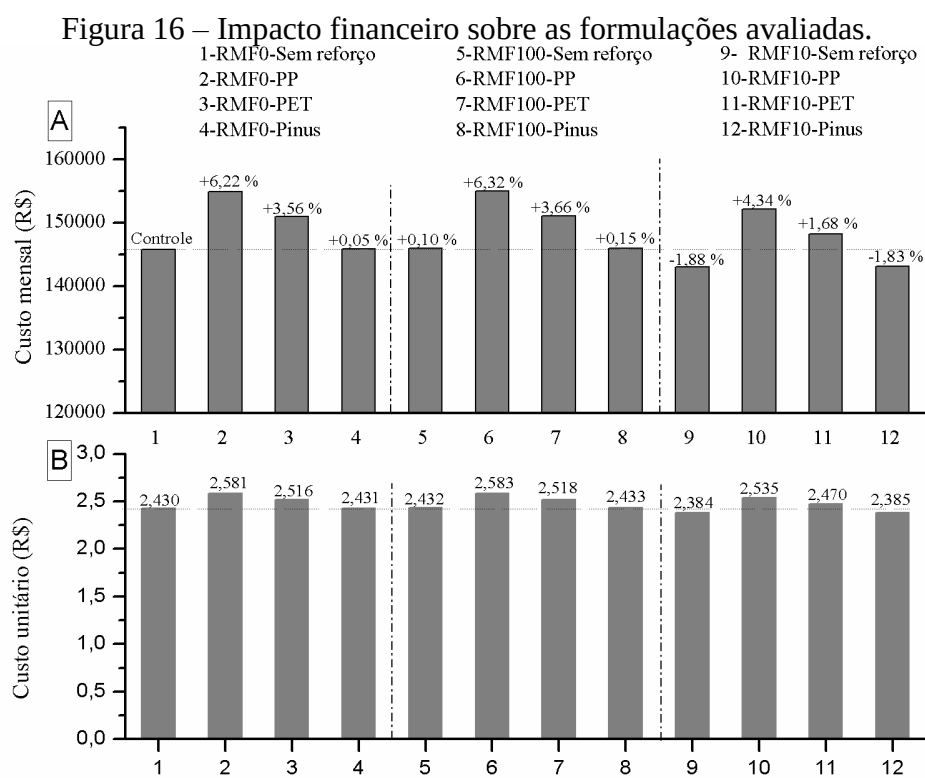
Conforme as formulações do presente estudo, serão utilizados 0,5 % de reforço com relação à massa total da formulação e para uma produção mensal de 60 mil telhas temos uma massa total processada de 259,200 toneladas de material, onde os reforços utilizados correspondem a 1,296 toneladas.

Não será considerado o custo do resíduo de *pinus*, visto que será descartado pela

empresa geradora. Contudo, o frete também deve ser computado no custo de produção. Considerando a coleta do resíduo em um raio não superior a 200 km, haveria um custo de R\$ 78,2, representando 0,05 % no custo final de produção.

O custo do PP reciclado é em torno de R\$ 7.000 por tonelada, acarretando em um acréscimo de R\$ 9.072 no custo da produção mensal e vindo a projetar um custo correspondente a 6,22 % do custo total de produção. Já o custo do PET é de R\$ 4.000 a tonelada, acarretando em um acréscimo de R\$ 5.184 na produção mensal com uma representatividade de 3,55 % no custo total de produção.

A Figura 16 apresenta o impacto do custo total e do custo unitário na produção das telhas de concreto.



Legenda: A - Custo mensal de produção B – Custo unitário de produção

Fonte: Do autor (2025).

Dentre os reforços avaliados, os resíduos de PP e de PET são aqueles que mais elevaram o custo de produção, fato associado não só aos seus altos custos de coleta e processamento, mas também pela demanda do mercado. Uma alternativa para mitigar esses custos seria empregar resíduos poliméricos provenientes diretamente de associações de catadores de materiais reciclados. Embora necessitem de beneficiamento prévio, esses materiais poderiam proporcionar uma significativa redução nos custos de produção para as

formulações que resultassem de melhorias das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas das telhas.

O resíduo de *Pinus*, por ser descartado após o processamento da madeira, tem o menor impacto financeiro nas formulações entre os reforços utilizados. Com relação ao RMF, a sua substituição ao cimento representa redução do custo de produção devido ao alto custo do cimento. Já com relação à substituição do PPC, esse representa uma elevação pouco significativa no custo de produção devido ao volume de telhas produzidas que dilui o custo associado. Todavia, a incorporação dos resíduos no processo produtivo de telhas de concreto minimiza os impactos ambientais e impulsionam as indústrias de reciclagem. Além disso, são incorporadas novas tecnologias para a indústria da construção civil.

4 CONCLUSÃO

Com o estudo foi possível entender o efeito da utilização do RMF e dos diferentes tipos resíduos poliméricos e lignocelulósico como material de reforço sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, durabilidade das telhas de concreto e viabilidade econômica.

O RMF mostrou características pozolânicas, com composição química e granulometria adequadas para matrizes cimentícias. O resíduo de *Pinus*, possui baixo teor de extrativos e alto teor de celulose e lignina. Os reforços poliméricos, lignocelulósico e o RMF não possuem altos índices de inibição. Essas propriedades apresentam os componentes utilizados nas formulações com bom potencial para uso na matriz cimentícia.

A adição de RMF nas telhas de concreto não comprometeu suas propriedades, atendendo às recomendações da norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009). A carga de ruptura se manteve estável aos 28 dias, com aumento após envelhecimento. A condutividade térmica e a barreira acústica foram preservadas, e a substituição parcial do cimento gerou uma redução de custo, comprovando a viabilidade técnica e econômica do uso de RMF em substituição total do PPC e de 10% do cimento.

O reforço com PP nas formulações, com 10% de substituição do cimento, aumentou a densidade, a absorção de água e a porosidade das telhas após envelhecimento acelerado, sem alterar o peso seco e aumentando a resistência à flexão. Não houve variação na condutividade térmica nem na barreira acústica. O custo de produção subiu, mas a melhora na resistência mecânica pode compensar esse aumento.

O reforço com PET reduziu a densidade ao substituir o PPC após envelhecimento

acelerado. Não houve variações na porosidade, mas o peso seco aumentou e a absorção de água diminuiu em relação ao controle sem RMF. A carga de ruptura à flexão não foi influenciada. A condutividade térmica aumentou com RMF aos 28 dias, mas não impactou a barreira acústica. O custo de produção aumentou em 3,66% com a utilização do reforço.

A adição do reforço com *pinus* reduziu a densidade na substituição do PPC após envelhecimento acelerado. O peso seco diminuiu e tanto a porosidade quanto a absorção de água aumentaram com adição de *Pinus*. A resistência diminuiu na substituição de 10% do cimento juntamente com a condutividade térmica. Não houve efeito da barreira acústica e houve uma elevação muito discreta no custo de produção.

Em síntese, a utilização do RMF destacou-se por melhorar a resistência mecânica após o envelhecimento, além de reduzir custos e preservar as propriedades térmicas e acústicas. A adição de PP e PET aumentam os custos de produção, em contrapartida o reforço com PP melhora as propriedades mecânicas. Apesar de menor custo, o reforço com *Pinus* diminui a resistência mecânica, não afeta a propriedade acústica e aumenta a condutividade térmica aos 28 dias de cura.

O uso de RMF e PP em telhas de concreto une sustentabilidade, economia e desempenho técnico. Reaproveita resíduos e preserva recursos naturais, além de diminuir custos com RMF e melhorar a resistência mecânica com PP.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às entidades de fomento FAPEMIG - PQ-01237-21, CNPq - 305662/2021-1, FINEP e CAPES; à Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e ao Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. N. et al. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 818-823, 2022.
- ALHASSAN, A. et al. Iron Ore Tailings as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete Production–Review. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 12, n. 4, p. 64-71, 2022.
- ALSABRI, A.; TAHIR, F.; AL-GHAMDI, S.G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 2245-2251, 2022.
- AMARAL, L.F. et al. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste-A mathematical model approach for granulometric optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119283.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1492-03**: Standard Specification for Concrete Roof Tiles, 2009. West Conshohocken, 2001. 2 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618-19**: Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 948-81**: Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, 2001. 2 p.
- AMIN, M. N. et al. A comprehensive review of types, properties, treatment methods and application of plant fibers in construction and building materials. **Materials**, v. 15, n. 12, p. 4362, 2022.
- ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R.D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and building materials**, v. 79, p. 115-128, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro, 6 p. julho, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13858-2**: Telha de concreto – Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 32 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de

Janeiro, 4 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 3 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacitância térmica, da resistência térmica e da absorptância térmica. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4 p. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 8 p. dez, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 6 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6 p. jul, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6 p. jul, 2003.

ATYIA, M. M.; MAHDY, M. G.; ABD ELRAHMAN, M. Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124655, 2021.

BANERJEE, J. et al. Carbon nanotubes interaction with amorphous and semi-crystalline domains of polypropylene in melt mixed composites: Influence of multiwall carbon nanotubes agglomerate and their modifications. **SPE Polymers**, v. 2, n. 4, p. 257-275, 2021.

BARROS, A. B. S. et al. The effect of ZnO on the failure of PET by environmental stress cracking. **Materials**, v. 13, n. 12, p. 2844, 2020.

BELAKROUM, R. et al. Hygric buffer and acoustic absorption of new building insulation materials based on date palm fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 12, p. 132-139, 2017.

BRODA, M. et al. Effects of biological and chemical degradation on the properties of scots pine wood—part I: chemical composition and microstructure of the cell wall. **Materials**, v. 15, n. 7, p. 2348, 2022.

BRODA, M.; POPESCU, C. M. Natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes—An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 209, p. 280-287, 2019.

BURDUHOS NERGIS, D. D. et al. XRD and TG-DTA study of new alkali activated materials based on fly ash with sand and glass powder. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 343, 2020.

BZENI, D. K. Investigating the Influence of Fiber Content and Geometry on the Flexural Response of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 9, p. 347, 2024.

CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397-409, 2019.

CHOI, J. et al. Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites. **Composite Structures**, v. 138, p. 116-121, 2016.

CHU, J. et al. Flows and waste reduction strategies of PE, PP, and PET plastics under plastic limit order in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 188, p. 106668, 2023.

CHU, J. et al. Substance flow analysis and environmental release of antimony in the life cycle of polyethylene terephthalate products. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p. 125252, 2021.

CONSOLI, N. C. et al. Behaviour of compacted filtered iron ore tailings–Portland cement blends: New Brazilian trend for tailings disposal by stacking. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 836, 2022.

CORDEIRO, M. C. et al. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 1209-1217, 2019.

DE KLERK, M. D. et al. Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 117835, 2020.

DE LA GREE, G. C. H. D.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Wood-wool cement board: Utilization of a porous binder. In: **Proceedings of the 14th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (IIBCC), 15-19 September 2014, Da Nang, Vietnam**. IIBCC, 2014. p. 177-188.

DE LIMA, A. J. et al. Studies on the durability of wood-cement particleboards produced with residues of pinus spp., silica fume, and rice husk ash. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3064, 2020.

DE MAGALHAES, L. F. et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of cleaner production**, v. 274, p. 123260, 2020.

DÍAZ, Y. C. et al. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet

expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, v. 2, p. 82-91, 2017.

DI GIULIO, E. et al. Three-dimensional cellular structures for viscous and thermal energy control in acoustic and thermoacoustic applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 234, p. 126076, 2024.

DUNUWEERA, S. P.; RAJAPAKSE, R. M. G. Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, n. 1, p. 4158682, 2018.

EIOGU, I. K.; IBENEME, U.; AIYEJAGBARA, O. M. Identification of polyethylene terephthalate (PET) polymer using X-ray diffractogram method: part 1. **NANO**, v. 8, p. 58-62, 2020.

EUGENIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of partial replacement of cement with IOT in extruded concrete roof tiles production. **Construction and Building Materials**, v. 393, p. 132129, 2023.

EUGÊNIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, 2021.

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

FANNA, D. J. et al. Long-term in situ X-ray Diffraction Studies on Ordinary Portland Cement Hydration with Correlative X-Ray Mapping. 2023.

FARAJ, R. H.; SHERWANI, A. F. H.; DARAEI, A. Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 100808, 2019.

FARRAPO, C. L. et al. Cellulose associated with pet bottle waste in cementbased composites. **Materials Research**, v. 20, n. 5, p. 1380-1387, 2017.

FONTES, W. C. et al. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 111-121, 2019.

GALVÃO, E. S. et al. Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. **Chemosphere**, v. 257, p. 127184, 2020.

GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412-422, 2018.

GARCIA, F. F. et al. Mine tailings dams' failures: Serious environmental impacts, remote solutions. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-23, 2024.

GARCÍA-IRUELA, A. et al. Changes in cell wall components and hygroscopic properties of

Pinus radiata caused by heat treatment. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, p. 851-861, 2021.

GBADEGESIN, R. A.; ADESIYAN, S. O.; KHAN, F. A. Effects of seasonal changes on the population levels of some plant-parasitic nematodes in the plantations of *Pinus caribaea* and *P. oocarpa* in the savanna areas of Nigeria. **Forest ecology and management**, v. 60, n. 3-4, p. 346-353, 1993.

GHALEHNOVI, M. et al. Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118213, 2019.

HAMADA, H. M. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 40, p. e00877, 2024.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. 1984.

IBÁ [Indústria Brasileira de Árvores] **Histórico do Desempenho do Setor, 2021**. Disponível em :< <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/historico-dodesempenho-do-setor> >. Acesso em abr/2023.

JIANG, D. et al. Impact of leaf fibre modification methods on compatibility between leaf fibres and cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 502-512, 2015.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. **Chichester: E. Horwood**, 1130 p. 1987.

KERNI, L. et al. A review on natural fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 1616-1621, 2020.

KOZAKIEWICZ, P. et al. The wood of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from post-agricultural lands has suitable properties for the timber industry. **Forests**, v. 11, n. 10, p. 1033, 2020.

LAHOUIOUI, M. et al. Investigation of fiber surface treatment effect on thermal, mechanical and acoustical properties of date palm fiber-reinforced cementitious composites. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 4441-4455, 2020.

LAIBLOVÁ, L. et al. Environmental impact of textile reinforced concrete facades compared to conventional solutions—LCA case study. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 3194, 2019.

LAIDANI, Z. E. A., et al. Experimental investigation on effects of calcined bentonite on fresh, strength and durability properties of sustainable self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 2020, 230: 117062.

LAVERDE, V. et al. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127729, 2022.

LEBRETON, L. C. M et al. River plastic emissions to the world's oceans. **Nature**

communications, v. 8, n. 1, p. 15611, 2017.

LI, L. et al. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120853, 2020.

LUOSTARINEN, K.; HAKKARAINEN, K. Chemical composition of wood and its connection with wood anatomy in *Betula pubescens*. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 7, p. 577-584, 2019.

MARQUES, M. L. et al. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 466-472, 2016.

MARVILA, M. T. et al. Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, p. 1-24, 2021.

MENDES, J. C et al. Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117597, 2020.

MENDES, J. C. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103365, 2019.

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

MENDES, R. F. et al. Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 42737-42749, 2021.

MOHAMMED, A. A.; KARIM, S. H. Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106195, 2023.

MOHAMMED, A. A.; RAHIM, A. A. F. Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118350, 2020.

MOHAN, H. T.; JAYANARAYANAN, K.; MINI, K. M. Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121520, 2021.

NARCISO, C. R. P. et al. Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 54, p. 115381-115395, 2023.

NIU, Y. et al. Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under bending by digital image correlation technique. **Cement and Concrete Research**, v. 125, p. 105821, 2019.

NOBRE, T. R. S. et al. Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de

difratometria de raios x e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de ^{29}Si no estado sólido. **Revista IPT**, v. 6, n. 19, p. 67-88, 2022.

OKINO, E.Y. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004.

OREN, O. H., et al. Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117774.

OTIENO, F.; SHUKLA, S. K. An insight into failure of iron ore mine tailings dams. **International journal of mining, reclamation and environment**, v. 37, n. 2, p. 127-147, 2023.

OWEN, J. R. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International journal of disaster risk reduction**, v. 42, p. 101361, 2020.

PARHI, S. K., PATRO, S. K. Application of R-curve, ANCOVA, and RSM techniques on fracture toughness enhancement in PET fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134644, 2024.

PEREIRA, T.G.T. et al. Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, p. S309-S314, 2020.

PROTASIO, F. N. M. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123929, 2021.

SAELI, M. et al. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116643, 2019.

SAGATOV, B. Study on reinforced concrete elements of buildings and structures with cracks, reinforced with composite polymer materials. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2023. p. 012043.

SANTOS, A. et al. Mechanical and thermal properties of geopolymers derived from metakaolin with iron mine waste. **Applied Clay Science**, v. 258, p. 107452, 2024.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105792, 2019.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **Indian Concr. J**, v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SHARMA, P.; GOYAL, S. K. Review of the Environmental Impacts of Cement Production and a Sustainable Remedy. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, p. 1-12, 2024.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in

concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.

SHETTIMA, A. U. et al. Strength and microstructure of concrete with iron ore tailings as replacement for river sand. In: E3S web of conferences. EDP Sciences, 2018. p. 01003.

SILVA, M. S. L. et al. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 6, p. 314-320, 2002.

SIQUEIRA, D. et al. Terrestrial and aquatic ecotoxicity of iron ore tailings after the failure of VALE SA mining dam in Brumadinho (Brazil). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 235, p. 106954, 2022.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 2019.

STRIDE, B. et al. Quantifying microplastic dispersion due to density effects. *Journal of Hazardous Materials*, v. 466, p. 133440, 2024.

TANG, C. et al. Recovering iron from iron ore tailings and preparing concrete composite admixtures. **Minerals**, v. 9, n. 4, p. 232, 2019.

TAO, Y. et al. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies—A review. **Applied Materials Today**, v. 24, p. 101141, 2021.

TEIXEIRA, J. N. et al. Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 2193-2200, 2020.

TEJASWINI, M. S. S. R.; PATHAK, P.; GUPTA, D. K. Sustainable approach for valorization of solid wastes as a secondary resource through urban mining. **Journal of environmental management**, v. 319, p. 115727, 2022.

TEODORO, R. et al. Functionally graded MDP panels using bamboo particles. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 39-47, 2016.

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, N. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00973, 2022.

THOMPSON, F. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135914, 2020.

VALÉRIO, A. F. F. et al. Determinação da densidade básica da madeira de peroba (*Aspidosperma polineuron* Muell. Arg.) ao longo do fuste. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 3, 2008.

VIANA, Q. S. et al. Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 32, p. 48964-48974, 2022.

VILELA, A. P. et al. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.

VON GREVE-DIERFELD, S. et al. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 6, p. 136, 2020.

WEISHI, L. et al. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of cleaner production**, v. 204, p. 685-692, 2018.

WERNKE, R. Análise de Custos e Preços de Venda: ênfase em aplicações e casos nacionais. 2. ed. São Paulo: **Saraiva Educação**, v. 1, 2015, 234 p.

XU, F. et al. Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101572, 2021.

XU, W., ZHANG, Y., LIU, B. Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119305, 2020.

YAO, G. et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863-871, 2020.

YAO, G. et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings. **Minerals Engineering**, v. 145, p. 106068, 2020.

ZACCONE, M. et al. Effect of injection molding conditions on crystalline structure and electrical resistivity of PP/MWCNT nanocomposites. **Polymers**, v. 12, n. 8, p. 1685, 2020.

ZHANG, L.; GAN, M.; XUE, Q. Induced by CO₂ Carbonation. Transport Perspectives for Porous Medium Applications, p. 79, 2024.

ZHANG, R. et al. Porous thermal insulation materials derived from fly ash using a foaming and slip casting method. **Energy and buildings**, v. 81, p. 262-267, 2014.

ZHAO, J. et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122968, 2021.

ZHU, J. et al. Surfactant-free synthesized magnetic polypropylene nanocomposites: rheological, electrical, magnetic, and thermal properties. **Macromolecules**, v. 44, n. 11, p. 4382-4391, 2011.

CAPÍTULO III – ARTIGO 2

PRODUÇÃO DE TELHAS DE CONCRETO COM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO, POLIMÉRICOS E LIGNOCELULÓSICOS

RESUMO

A construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais e contribui para o aquecimento global devido à produção de cimento, responsável por emissões de dióxido de carbono (CO₂). Motivados por rompimentos de barragens de rejeito de mineração, estudos têm buscado integrar resíduos de minério de ferro (RMF) na construção civil como forma de destinação sustentável. Diante desse contexto, essa pesquisa propõe a substituição simultânea do pó de pedra calcária (PPC) e 10% do cimento por RMF na produção de telhas de concreto reforçadas com resíduos de polipropileno (PP), Polietileno tereftalato (PET) e madeira de *Pinus*, todos na porcentagem de 0,5%. O traço controle para a produção das telhas de concreto foi de 27,15 % de cimento CPV-ARI, 60,85 % de areia e 12% de PPC. As telhas de concreto foram produzidas pelo processo de extrusão, sendo avaliadas após 28 dias de cura e envelhecimento acelerado. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e a viabilidade econômica. O uso do RMF na produção de telhas de concreto resultou em aumento da absorção de água e porosidade, além da redução na densidade e peso seco com incremento de 14% na resistência à flexão após envelhecimento. A condutividade térmica aumentou aos 28 dias de cura, mas reduziu com o envelhecimento acelerado, enquanto a barreira acústica apresentou uma redução. O custo de produção foi reduzido em 1,77%, e todas as especificações normativas da norma ASTM C1492-3 foram atendidas. Dentre os reforços avaliados, o *Pinus* destacou-se nas formulações com RMF, promovendo um aumento de 8,2% na resistência à flexão após envelhecimento acelerado e redução de custo de 1,73% em relação ao controle, apesar de aumentar a condutividade térmica em 9%, mas ainda abaixo do limite normativo. O PP apresentou a maior resistência à flexão sem o uso de RMF, seguido pelo PET, mas ambos elevaram o custo de produção, embora tenham melhorado o isolamento acústico aos 28 dias de cura.

Palavras-chave: materiais alternativos; sustentabilidade; eficiência; lignocelulósicos; matriz cimentícia; reforços; desempenho termoacústico.

PRODUCTION OF CONCRETE ROOFING TILES WITH MINING, POLYMERIC, AND LIGNOCELLULOSIC RESIDUES

ABSTRACT

The construction industry is a major consumer of natural resources and contributes to global warming due to cement production, which is responsible for carbon dioxide (CO₂) emissions. Driven by mining tailings dam failures, studies have sought to integrate iron mining waste (IMW) into construction as a sustainable disposal solution. In this context, this research proposes the simultaneous replacement of limestone powder (LP) and 10% of cement with IMW in the production of concrete tiles reinforced with polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and Pinus wood waste, all at a percentage of 0.5%. The control mix for tile production consisted of 27.15% CPV-ARI cement, 60.85% sand, and 12% LP. The concrete tiles were produced through an extrusion process and evaluated after 28 days of curing and accelerated aging. Physical, mechanical, thermal, and acoustic properties, as well as economic feasibility, were assessed. The use of IMW in concrete tile production resulted in increased water absorption and porosity, along with a reduction in density and dry weight, while improving flexural strength by 14% after aging. Thermal conductivity increased at 28 days of curing but decreased with accelerated aging, whereas acoustic insulation showed a reduction. Production costs were reduced by 1.77%, and all specifications of ASTM C1492-3 were met. Among the reinforcements evaluated, Pinus stood out in formulations with IMW, increasing flexural strength by 8.2% after accelerated aging and reducing costs by 1.73% compared to the control, despite raising thermal conductivity by 9%, though still within regulatory limits. PP exhibited the highest flexural strength without IMW, followed by PET, but both increased production costs, despite improving acoustic insulation at 28 days of curing.

Keywords: alternative materials; sustainability; efficiency; lignocellulosics; cementitious matrix; reinforcements; thermoacoustic performance.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é reconhecido como um dos maiores consumidores de recursos naturais, com destaque para o concreto, que é o material mais utilizado em suas obras (Xing *et al.*, 2022). O concreto é composto primordialmente por cimento, um dos principais responsáveis pelas altas emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante sua produção, contribuindo de maneira substancial para o aquecimento global (Skibsted, Snellings, 2019; Orozco *et al.*, 2024). Além disso, estima-se que a produção de cimento em 2030 atinja o valor de oito bilhões de toneladas anualmente (Tkachenko *et al.*, 2023), o que ressalta sua relevância quanto aos impactos ambientais associados ao seu processamento (de Magalhaes *et al.*, 2020). Diante disso, é imprescindível a adoção de novas técnicas no processo de fabricação de cimento e na formulação do concreto perante a necessidade de minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade da construção civil (Tun; Bonnet; Gheewala, 2021).

Brasil, Austrália e China destacam-se como os maiores produtores globais de minério de ferro. Minas Gerais é um estado brasileiro onde a exploração do minério de ferro é essencial para a economia, tendo impulsionado a instalação de algumas empresas no decorrer do século XX. Isso resultou na urbanização de várias cidades e como consequência, diversas barragens de rejeitos foram construídas no estado. Após o desastre de Brumadinho em 2019, iniciou-se o processo de descaracterização de barragens, com 12 já concluídas até 2022, em um esforço para aumentar a segurança e evitar novos acidentes (Bessa *et al.*, 2024).

A sequência de rompimentos de barragens em Minas Gerais começou em 1986, quando a barragem da Itaminas, em Itabirito, deixou sete mortos. Em 2001, o rompimento da barragem da mineração Rio Verde, em Nova Lima, causou cinco mortes. Em 2003, a barragem da Indústria Cataguases rompeu, deixando 600 mil pessoas sem água. Outros rompimentos ocorreram em 2007, em Miraí, afetando quatro municípios, e em 2008, em Congonhas, desalojando famílias. Em 2014, o rompimento em Itabirito matou três trabalhadores e poluiu rios locais (Lacaz; Porto; Pinheiro, 2017; Bessa *et al.*, 2024). Além disso, ressalta-se o desastre ocorrido em 5 de novembro de 2015, em Mariana, Minas Gerais, com o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, operada pela Samarco mineradora. Esse grave desastre ocupacional e ambiental não foi um caso isolado, mas o ponto culminante de uma série de eventos ligados à expansão da mineração no Brasil (Porto, 2016; da Silva *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, a busca por novas formas de destinação dos resíduos

provenientes do processo de extração do minério de ferro tem sido foco de diversas pesquisas. Alguns estudos apontam a viabilidade de inserção do RMF em materiais de construção tanto na substituição dos agregados da matriz cimentícia quanto na substituição parcial do cimento usado em concretos e argamassas, além de sua aplicação em elementos da construção civil como tijolos, blocos e telhas de concreto (Shettima *et al.*, 2016; Carrasco *et al.*, 2017; Assis; Queiroga; Mendes, 2018; Li *et al.*, 2019; Eugenio *et al.*, 2021; Moraes *et al.*, 2021; Bessa *et al.*, 2022; Viana *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2023a).

Os polímeros termoplásticos desempenham um papel crucial no avanço tecnológico e socioeconômico global, destacando-se por suas características de moldabilidade, resistência, durabilidade, leveza e baixo custo de produção. Essas propriedades tornam os termoplásticos aplicáveis em diversos setores da cadeia produtiva (Sagatov, 2023; Mohammed; Karim, 2023).

A produção global de plásticos alcança, anualmente, aproximadamente 330 milhões de toneladas. Desse total, cerca de 70% é direcionado aos aterros sanitários ou descartado de maneira inadequada no meio ambiente, contribuindo para a contaminação dos ecossistemas (Mohan; Jayanarayanan; Mini, 2021; Tejaswini; Pathak; Gupta, 2022). Esse descarte inadequado promove o aumento das concentrações de microplásticos e metais pesados nos solos e nos sistemas aquáticos, em decorrência dos processos de degradação, além de reduzir a permeabilidade à água e comprometer a fertilidade dos solos agrícolas (Sau; Shiuly; Hazra, 2023).

As propriedades intrínsecas dos resíduos plásticos, como baixa capacidade de adsorção de água, resistência à corrosão, baixa condutividade elétrica e térmica, além de alta resistência ao impacto, indicam seu potencial como uma alternativa promissora e sustentável em substituição dos agregados naturais empregados na matriz cimentícia (Zhang *et al.*, 2023).

Essa abordagem não apenas promove a redução dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de plásticos, mas também fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias no setor da construção civil (Mohammed; Rahim, 2020; Ahmed *et al.*, 2022). As soluções resultantes dessa inovação tendem a apresentar propriedades melhoradas, além de oferecer alternativas econômicas e eficientes para o mercado da construção civil (Hamada *et al.*, 2024).

Os resíduos de madeira são subprodutos gerados principalmente nas indústria de processamento madeireiro onde são gerados cavacos de diferentes tamanhos, além de resíduos em forma de serragem (Oladimeji *et al.*, 2021; Adegok *et al.*, 2022). Esses resíduos quando armazenados de forma incorreta geram sérios riscos ambientais e mesmo que sejam

depositados em aterros sanitários agravam a situação dos espaços ocupados pelos aterros, além de aumentar os custos de manutenção dos mesmos (Alabduljabbar *et al.*, 2020). Além disso, resíduos do setor madeireiro contêm fungos que atacam e destroem as vegetações em suas proximidades (Cultrone *et al.*, 2020) e por serem altamente inflamáveis contribuem com a proliferação de incêndios florestais afetando todo o ecossistema, infraestruturas e a população regional (Mohan; Jayanarayanan; Mini, 2021; Adegok *et al.*, 2022; Al-Kaseasbeh; Al-Qaralleh, 2023).

Diante dessas questões, uma alternativa para mitigar os impactos causados pelos resíduos de diversos setores, como o madeireiro, o plástico e a mineração consiste em seu reaproveitamento como matéria-prima na produção de concreto, argamassas e outros componentes da construção civil. Essa abordagem tem o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas e o custo dos compósitos resultantes, além de proporcionar uma destinação adequada aos resíduos gerados. (Alabduljabbar *et al.*, 2020; Sosoi *et al.*, 2022; Hamada *et al.*, 2024).

Perante esse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da incorporação de resíduos provenientes dos setores de mineração, madeireiro e polimérico nas formulações de telhas de concreto, com foco nas suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas, além da durabilidade e da viabilidade econômica. Além disso, buscou promover uma destinação adequada para esses resíduos ao desenvolver materiais inovadores e mais eficientes para a construção civil, contribuindo para a competitividade das indústrias.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Caracterização do resíduo de mineração

A caracterização do RMF foi realizada em relação à sua densidade, conforme a norma NBR NM 52 (ABNT, 2019), e ao teor de areia, silte e argila, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

Para a análise granulométrica foram usadas peneiras com aberturas de 4,26 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,600 mm, 0,300 mm e 0,150 mm, permitindo a determinação da porcentagem média retida, da porcentagem média retida acumulada, da dimensão máxima característica e do módulo de finura, conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Uma melhor extratificação das granulometrias do cimento *Portland* e do RMF foi obtida por meio de uma série de peneiras com aberturas menores (0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm, 0,075 mm, 0,053 mm, 0,045 mm e 0,038 mm), conforme metodologia adotada por Eugenio *et al.* (2023a) e Narciso *et al.* (2023). Além disso, os teores de Al_2O_3 (Óxido de alumínio), SiO_2 (dióxido de silício) e Fe (Ferro) foram determinados por fluorescência de raios X (XRF), usando o equipamento TRACER 5 G (Bruker, Alemanha).

2.2 Ensaio de pozolanicidade

O ensaio de pozolanicidade foi conduzido conforme a norma NBR 5752 (ABNT, 2014), visando determinar o índice de desempenho de materiais pozolânicos em combinação com cimento Portland após 28 dias de cura.

Foram utilizados cimento CII F 32, areia normalizada, resíduo de mineração e água na produção de duas argamassas, denominadas T1 e T2. Tendo a argamassa T1 em sua composição cimento, areia normalizada e água e a argamassa T2, cimento, areia normalizada, resíduo de mineração e água. Na argamassa T2 o cimento foi substituído em 25% pelo resíduo de mineração.

Conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), após a confecção dos corpos de prova, as amostras foram mantidas nos moldes em câmara úmida por 24 horas. Em seguida, foram desmoldadas e imersas em uma solução de água e cal virgem por 27 dias. Os ensaios de ruptura foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaio, modelo WDW 300-E (Arotec, Brasil), com velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. O índice de desempenho do resíduo de mineração com o cimento portland aos 28 dias foi calculado pela Equação 1.

$$I_{\text{cimento}} = \left(\frac{F_{cT2}}{F_{cT1}} \right) * 100 \quad (1)$$

Em que:

I_{cimento} - Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

F_{cT1} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa T1;

F_{cT2} - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa T2.

Para que o resíduo de mineração seja classificado como material pozolânico os resultados do ensaio de pozolanicidade devem atender aos os requisitos estabelecidos pelas normas NBR 12653 (ABNT, 2015) e ASTM C 618-19 (ASTM, 2019).

2.3 Caracterização dos materiais de reforço

O material lignocelulósico utilizado como reforço foi o resíduo proveniente do processamento da madeira de *Pinus* spp. realizado na marcenaria da Universidade Federal de Lavras. No Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis (CIMS-UFLA) o material passou pelos processos de moagem, secagem e classificação granulométrica. Para análise dos constituintes químicos do material lignocelulósico o mesmo foi processado em moinho Willey, para obtenção de partículas com granulometria entre 40 mesh e 60 mesh. Após o material ser acondicionado a temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5 % até a obtenção de massa constante, foram determinados seus teores de lignina, extrativos totais, cinzas, celulose e hemicelulose, a Tabela 1 traz as referências utilizadas em tais procedimentos.

Tabela 1 - Referências utilizadas para análise da composição química.

TEOR	NORMA
Cinzas	Norma NBR 13999 (ABNT, 2003)
Extrativos	Norma NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	Norma NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose	Browning (1963)
Celulose	Kennedy, Phillips e Willians (1987)
Hemicelulose	(Holocelulose – Celulose)

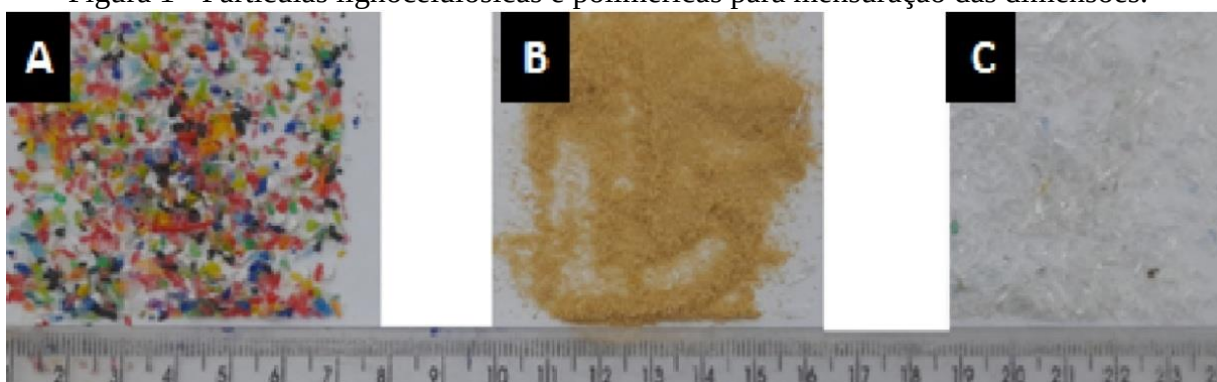
Fonte: Do autor (2025).

O PET foi adquirido em partículas já processadas para uso, sendo necessária uma

inspeção para identificar eventuais contaminantes. O PP foi adquirido na forma de tampas de garrafas, foi processado em moinho de facas da marca TRAPP, modelo TRF 650 com peneira de 0,8 mm de modo a se obter partículas menores para a produção. Em ambos os resíduos, para a caracterização física foi realizada a análise de densidade conforme adaptação da norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

Conforme metodologia adotada por Narciso *et al.* (2023) e Viana *et al.* (2022), mediante a utilização do software *ImageJ* foram mensurados o comprimento e diâmetro das partículas utilizadas como reforços (Figura 1). De posse desses dados foram calculados os índices de esbeltez das partículas.

Figura 1 - Partículas lignocelulósicas e poliméricas para mensuração das dimensões.



Legenda: (A) PP; (B) *Pinus spp.*; (C) PET.

Fonte: Do autor (2025).

2.4 Análise de aptidão

Esta análise consistiu em mensurar a progressão da temperatura da mistura das partículas da madeira de *Pinus spp.*, do RMF, das partículas de PP e de PET individualmente com o cimento durante um período de 24 horas. Conforme destacado por Hofstrand, (1984), o monitoramento da temperatura de reação é empregado como parâmetro para determinar o índice de inibição das reações entre o cimento e a água.

O sistema consistiu em conjunto de sensores que monitoram a temperatura da mistura em uma caixa termicamente isolada. Cada amostra contém uma quantidade fixa de cimento CPV-ARI, totalizando 200 gramas, e 90 ml de água, sendo essa a formulação controle. Para as demais amostras são adicionadas à formulação padrão 15 gramas do material a ser avaliado (RMF, PP, PET ou *Pinus*).

Cada uma dessas pastas foi misturada em um béquer e em seguida transferida para um recipiente de isopor forrado com papel alumínio e colocada em uma caixa térmica. Nesses

recipientes de isopor foram inseridos os sensores de temperatura. A cada 1 minuto foi feito o registro das temperaturas em um sistema automatizado visando gerar dados para traçar a curva de hidratação afim de avaliar a cura dos tratamentos com os materiais avaliados em relação à pasta controle.

Os índices de inibição foram calculados de acordo com a equação 1 de Hofstrand *et al.* (1984), utilizada por Narciso *et al.* (2023) e Eugenio *et al.* (2023). Na equação foram consideradas a temperatura máxima alcançada durante o processo e o tempo de hidratação de hidratação.

$$I = 100 \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) * \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) * \left(\frac{S'_2 - S_2}{S_2} \right) \right] \quad (2)$$

$$S'_2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2} \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2} \quad (4)$$

Em que:

t_2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t'_2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-adição de material;

T_2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T'_2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-adição de material;

S_2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'_2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-adição de material.

Para se classificar a compatibilidade do material adicionado como cimento foi utilizada a classificação de Okino *et al.* (2004). Um índice de inibição inferior a 10 é considerado de baixa inibição. Quando o índice se encontra entre 10 e 50, a inibição é classificada como intermediária. Para valores de índice entre 50 e 100, a inibição é alta. Por fim, quando o índice de inibição é superior a 100, a classificação é de muito alta inibição.

2.5 Produção das telhas de concreto

As telhas de concreto foram produzidas conforme as diretrizes especificadas na norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), nas dimensões médias de 420 mm x 320 mm x 13,6 mm (comprimento x largura x espessura), peso nominal médio aos 28 dias de 4,32 Kg e peso no telhado após montagem de 32,78 kgf/m². O delineamento experimental para a produção das telhas consistiu na substituição de PPC e cimento *Portland* pelo RMF em associação com os resíduos de PP, PET e *Pinus* como elementos de reforços (Tabela 2).

Tabela 2 - Formulações para produção das telhas de concreto.

Tratamento	Substituição do PPC (%)	Substituição do cimento (%)	Reforço (0,5%)
T01	-	-	-
T02	-	-	PP
T03	-	-	PET
T04	-	-	<i>Pinus spp.</i>
T05	100	10	
T06	100	10	PP
T07	100	10	PET
T08	100	10	<i>Pinusspp.</i>

Fonte: Do autor (2025)

O traço base em massa utilizado foi de 1: 2,24 : 0,44 (cimento, areia natural média e pó de pedra calcária), traço definido através de ensaios realizados no CIMS para definição do traço ótimo de produção e tomando como base traços utilizados por Eugenio *et al.* (2021), Viana *et al.* (2022) e Eugenio *et al.* (2023a) em estudos sobre telhas de concreto.

Foi utilizado o cimento CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), que, por não conter pozolana, facilita uma análise mais precisa da interação com o resíduo de minério de ferro. A alta resistência inicial é obtida devido à finura das partículas e ao equilíbrio ideal entre argila e calcário na formulação do clínquer (Protasio *et al.*, 2021).

O resíduo de minério de ferro usado nas formulações foi obtido da Samarco Mineradora S.A., localizada em Mariana, Minas Gerais, Brasil. Para o processo de fabricação das telhas, foi empregado o aditivo Hangen Block R, plastificante e densificador de concreto, em proporção de 1% em relação à massa do cimento (Eugênio *et al.*, 2021). Utilizou-se também o desmoldante VEDACIT afim de facilitar a remoção das telhas dos moldes. Como agregados, foram usadas areia natural média e pó de pedra calcária, materiais

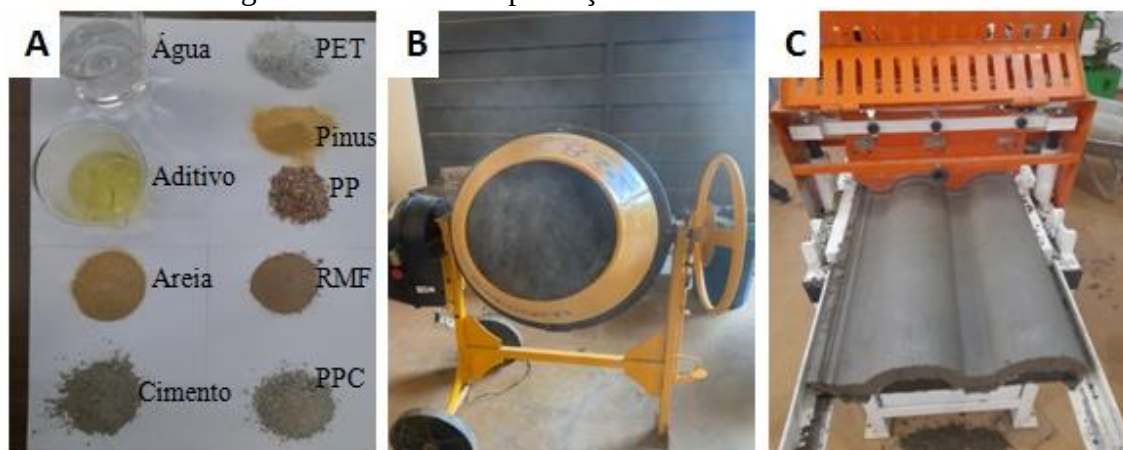
comumente usados na produção de telhas de concreto no sul de Minas Gerais, Brasil (Eugenio *et al.*, 2023a).

Os materiais foram pesados em suas proporções definidas nas formulações (Tabela 2) e inseridos em uma betoneira com capacidade para 400 litros. Inicialmente foi feita uma mistura seca para homogeneização dos componentes e posteriormente adicionada água em pequenas proporções até chegar no limite de 11 % da massa total da mistura.

Após isso, a matéria prima foi levada para a máquina de produção de telhas da marca NOWO (Santa Catarina, Brasil), onde as telhas foram produzidas pelo processo de extrusão e compactação. Seguindo as diretrizes da norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), nesse processo foram produzidas 18 telhas por tratamento, sendo 6 corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos aos 28 dias de cura, 6 corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos após envelhecimento acelerado. Além de 3 corpos de prova para ensaios acústicos e térmicos aos 28 dias de cura e 3 corpos de provas para ensaios acústicos e térmicos após envelhecimento acelerado.

Após 24 horas de cura, as telhas foram retiradas dos moldes e permaneceram por 27 dias em processo de cura em temperatura ambiente. A Figura 2 ilustra o processo básico de produção das telhas de concreto.

Figura 2 - Processo de produção das telhas de concreto.



Legenda: (A) Materiais para produção das telhas; (B) Homogenização dos componentes; (C) Telha de concreto recém produzida.

Fonte: Do autor (2025)

2.6 Caracterização das Telhas de Concreto

As telhas produzidas foram caracterizadas com base em suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e microestruturais, tanto aos 28 dias de cura quanto após o

envelhecimento acelerado, além de ser realizada a análise da viabilidade econômica das formulações avaliadas.

2.6.1 Durabilidade das Telhas de Concreto

O envelhecimento das telhas foi realizado utilizando o método de envelhecimento acelerado, conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 13554 (ABNT, 2012), que envolvem ciclos de imersão e secagem dos compósitos. As telhas foram submetidas a seis ciclos, cada um consistindo em imersão em água por cinco horas, seguida de secagem a uma temperatura de 71 ± 2 °C por 42 horas. Após esses ciclos as telhas foram direcionadas para a caracterização física, mecânica, térmica, acústica, além das análises de DRX e estrutural.

2.6.2 Propriedades físicas

Para caracterização das propriedades físicas foram utilizados 6 telhas por tratamento conforme a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Foram coletados os valores de massa seca, massa úmida e massa imersa para definição do seu peso seco e absorção de água conforme a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), além da porosidade aparente em concordância com a norma ASTM C 948-81 (ASTM, 2001).

2.6.3 Propriedades Mecânicas das telhas de concreto

Em concordância com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a carga de ruptura à flexão foi avaliada com as mesmas 6 telhas utilizadas para a caracterização das propriedades físicas. Foi utilizada uma máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo EMIC (Massachusetts, Estados Unidos) 23/100, com célula de carga de 10 kN. A força foi distribuída uniformemente e de modo progressivo na seção transversal da telha a uma velocidade 0,10 kN/s até que ocorresse a ruptura da telha.

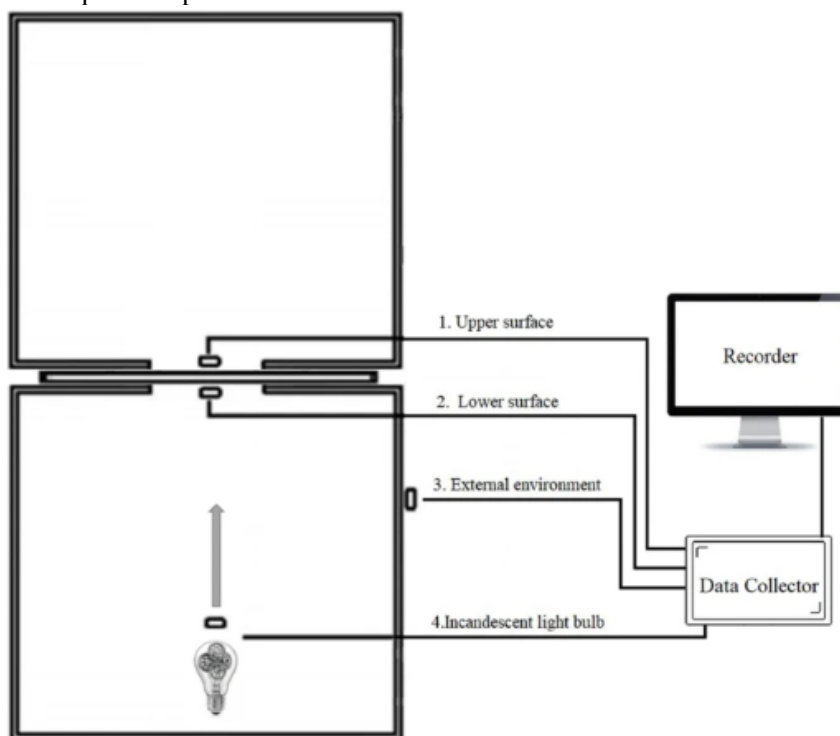
2.6.4 Propriedades térmicas das telhas de concreto

Seguindo a metodologia descrita por Vilela *et al.* (2020), Eugênio *et al.* (2021) e Eugênio *et al.* (2023), o ensaio foi conduzido afim de determinar a transmitância térmica das telhas de concreto.

O equipamento é composto por duas câmaras isoladas entre si e do ambiente externo. Dentro da câmara emissora está localizada uma fonte de calor controlada, afim de manter a temperatura dentro dos padrões do ensaio térmico. Dois sensores de temperatura monitoram as temperaturas nas câmaras emissoras e receptoras. As telhas foram posicionadas no equipamento e o ensaio foi realizado simulando a exposição do material a uma temperatura de 50 ° C, com razão de aquecimento de 1° C/ min. com ciclo de ensaio para cada tratamento de 3,5 horas.

As telhas foram inseridas entre duas câmaras, garantindo que fossem a única via de transmissão térmica entre elas. Um sensor foi instalado na face superior da telha, voltada para a câmara emissora, enquanto o outro sensor foi montado na face inferior, voltada para a câmara receptora. A variação de temperatura entre esses dois pontos, combinada com a espessura da telha, determinaram os parâmetros usados para calcular a condutividade térmica, tanto aos 28 dias de cura quanto após o envelhecimento acelerado. Na Figura 3 pode ser observado o processo para ensaio térmico.

Figura 3 – Esquema representando a estrutura do ensaio térmico das telhas de concreto.



Fonte: Viana *et al.* (2022).

2.6.5 Propriedades acústicas das telhas de concreto

Para determinação das propriedades acústicas foi utilizado um método alternativo fundamentado em diferentes normas, sendo a NBR 15575 (ABNT, 2021), que trata do desempenho em edificações habitacionais, A ISO 717 (ABNT, 2013) relativa à classificação dos isolamentos acústicos nos edifícios e a ISO 10847 (1997) que trata de barreiras externas ao ruído.

O dispositivo é composto por duas caixas isoladas acusticamente entre si e entre o ambiente externo que compõem as câmaras emissoras e receptoras de ruído. Dentro da câmara emissora foi inserido um calibrador acústico da marca Instrutherm, modelo CAL 5000 o qual foi ajustado para gerar um nível de sinal de 94 decibéis. Na câmara receptora foi instalado um medidor / registrador de nível de som da marca AKROM, modelo KR853 afim de receber e registrar os níveis de sinais que transpuseram os corpos de provas inseridos entre as câmaras emissora e receptora. A partir deste ensaio foi possível calcular a barreira acústica das telhas de concreto, mediante a utilização da Equação 03:

$$BA = 94 - X \quad (5)$$

Em que:

BA: Barreira acústica (dB);

94: Nível de sinal emitido pelo calibrador acústico (dB);

X: Valor resultante em cada ensaio (dB).

2.6.6 Análises microestruturais das telhas de concreto

A caracterização das propriedades microestruturais foi conduzida na superfície de ruptura das telhas submetidas ao ensaio de flexão estática. Este estudo teve como objetivo associar o efeito da combinação do RMF em conjunto com os materiais de reforços sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, tanto antes quanto após o envelhecimento acelerado. Com isso foi possível avaliar o efeito de cada tratamento sobre as propriedades dos compósitos. A microestrutura foi examinada com o uso de um microscópio óptico, permitindo a identificação e compreensão dos mecanismos de degradação que ocorrem na estrutura interna dos compósitos.

2.6.7 Análise Difração de Raio X (DRX) das telhas de concreto

A identificação dos elementos cristalinos presentes nas matérias primas (Cimento, PPC, PP, EPT e *Pinus*) e nas telhas aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado foi realizada por meio da técnica de difração de raios X (DRX). Para essa análise, foi empregado o difratômetro de raios X modelo XRD 6100 da Shimadzu, utilizando radiação de cobre (Cu), com parâmetros de 40 kV e 30 mA, faixa de varredura de 20 a 70°, resolução de 0,02°, e uma taxa de varredura de 2° por minuto.

2.7 Viabilidade econômica

A viabilidade econômica na produção das novas formulações das telhas de concreto foi avaliada por meio de um estudo quantitativo. Foram utilizados dados primários, obtidos através da coleta de valores em empresas do setor e de uma pesquisa de mercado que levantou os preços das matérias-primas utilizadas nas formulações. Os custos variáveis dos itens fabricados foram atribuídos com base em fichas técnicas ou listas de componentes do produto, permitindo a comparação dos custos entre a ficha técnica do produto controle e as dos demais tratamentos. Valores referentes ao custo direto das matérias-primas utilizadas na produção das telhas de concreto foram coletados considerando o volume de produção. Custos como salários, encargos, depreciação de equipamentos, energia elétrica, aluguel e telecomunicações não foram incluídos na análise, pois não apresentaram variação significativa após a alteração da composição (Wernke, 2015; Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023).

2.8 Análise de dados

Os dados das telhas foram analisados utilizando um delineamento inteiramente casualizado (DIC). A análise de variância foi realizada em esquema fatorial 2x4 (2 matrizes – Sem RMF e com substituição de 100% do PPC e 10% do cimento por RMF; e 4 tipos de material de reforço - Sem reforço, PP, PET, *Pinus*), foram realizados com o software de análise estatística Sisvar, ambos com nível de significância de 5%. Quando houve interação significativa ou então efeito significativo dos fatores matriz ou reforço, aplicou-se o teste de médias de Scott-Knott, também com 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do resíduo de mineração

3.1.1 Propriedades físico-química do RMF

Em termos de composição química, o resíduo contém 10,86 % de ferro (Fe), 71,46% de dióxido de silício (SiO_2) e 0,83% de óxido de alumínio (Al_2O_3). Quanto às suas propriedades físicas, a densidade do material foi de $3,10 \pm 0,078 \text{ g/cm}^3$, o pH foi de 6,8, o que indica uma leve acidez. Em relação à sua composição, o resíduo possui 52 dag/Kg de argila, 16 dag/Kg de silte e 32 dag/Kg de areia, sendo classificado como um material do Tipo 3, de textura argilosa.

Elevados teores de dióxido de silício (SiO_2) desempenham um papel importante na hidratação de compósitos cimentícios e no aumento da resistência mecânica. Quando o SiO_2 entra em contato com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), liberado durante o processo de hidratação do cimento, ocorre a formação de silicatos de cálcio mono-hidratados, os quais contribuem significativamente para o desenvolvimento da estrutura do material e a melhoria de suas propriedades mecânicas e durabilidade. (Xu, Zhang, Liu, 2020; Narciso *et al.*, 2023).

Altas concentrações de ferro (Fe) e óxido de alumínio (Al_2O_3) podem influenciar a resistência de produtos cimentícios de forma positiva, além de acelerar o processo de hidratação (Narciso *et al.*, 2023). Isso ocorre porque ambos os componentes fazem parte da composição química do cimento, resultando na formação do ferro aluminato tetracálcio (C_4AF). A presença do C_4AF no cimento contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e desempenha um papel importante na fase inicial de hidratação (Yao *et al.*, 2020; Eugenio *et al.*, 2023b).

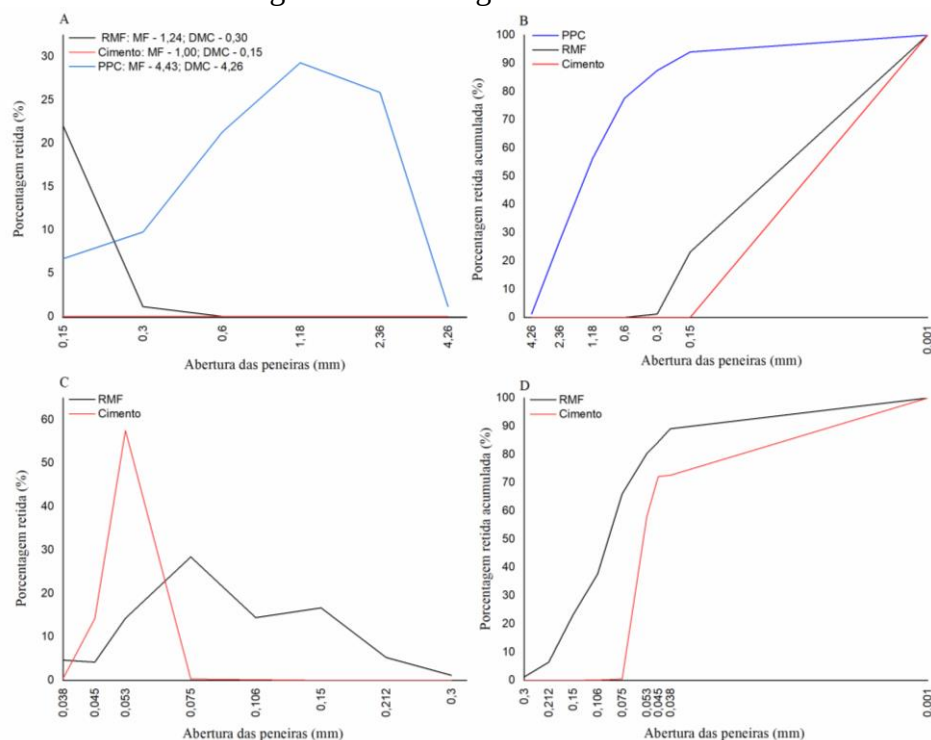
A densidade do cimento *Portland* é de $3,15 \text{ g/cm}^3$, valor muito próximo ao do RMF, avaliado em $3,10 \text{ g/cm}^3$, o que possibilita uma interação mais eficiente entre os dois materiais (Consoli *et al.*, 2022), possibilitando sua substituição em relação à massa dos materiais. Segundo Alhassan *et al.* (2022), as faixas de densidade do resíduo de minério de ferro variam entre $2,34 \text{ g/cm}^3$ e $3,49 \text{ g/cm}^3$, dependendo de fatores como o tipo de minério, a localização geológica e o método de processamento utilizado.

3.1.2 Caracterização granulométrica

As curvas granulométricas do RMF e do cimento Portland foram obtidas utilizando uma série de peneiras com aberturas menores, incluindo 300 μm , 212 μm , 150 μm , 106 μm , 75 μm , 53 μm , 45 μm e 38 μm , como mostrado nas Figuras 4C e 4D. Esse procedimento tem como objetivo identificar mais precisamente as partículas finas, pois, conforme o ensaio realizado com peneiras segundo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), observou-se que 76,86% das partículas do RMF e 100% das partículas do cimento estavam abaixo de 150 μm , a menor abertura da última peneira.

As porcentagens de material retido e retido acumulado para RMF, PPC e cimento Portland podem ser visualizadas nas Figuras 4A a 4D, assim como o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC), que estão ilustrados na Figura 4A.

Figura 4 - Curvas granulométricas.



Legenda: A – Porcentagem retida conforme série regular de peneiras recomendadas pela norma NBR NM 248 (ABNT,2003). B - Porcentagem retida acumulada conforme série regular de peneiras recomendadas pela norma NBR NM 248 (ABNT,2003). C - Porcentagem retida conforme peneiras com aberturas menores D - Porcentagem retida acumulada conforme peneiras com aberturas menores

Fonte: Do autor (2025).

A análise da curva granulométrica da porcentagem retida (Figura 4A) indicou que o PPC possui as maiores quantidades de partículas retidas nas peneiras de 2,360 mm e 1,180 mm, com valores de 25,85% e 29,29%, respectivamente. Apresentando módulo de finura de

4,450 e uma dimensão máxima característica de 4,260 mm. O cimento Portland, por sua vez, apresentou um módulo de finura de 1,00 e uma dimensão máxima característica de 0,150 mm, com a maior concentração de partículas retidas observada na peneira de 0,053 mm (Figura 4C).

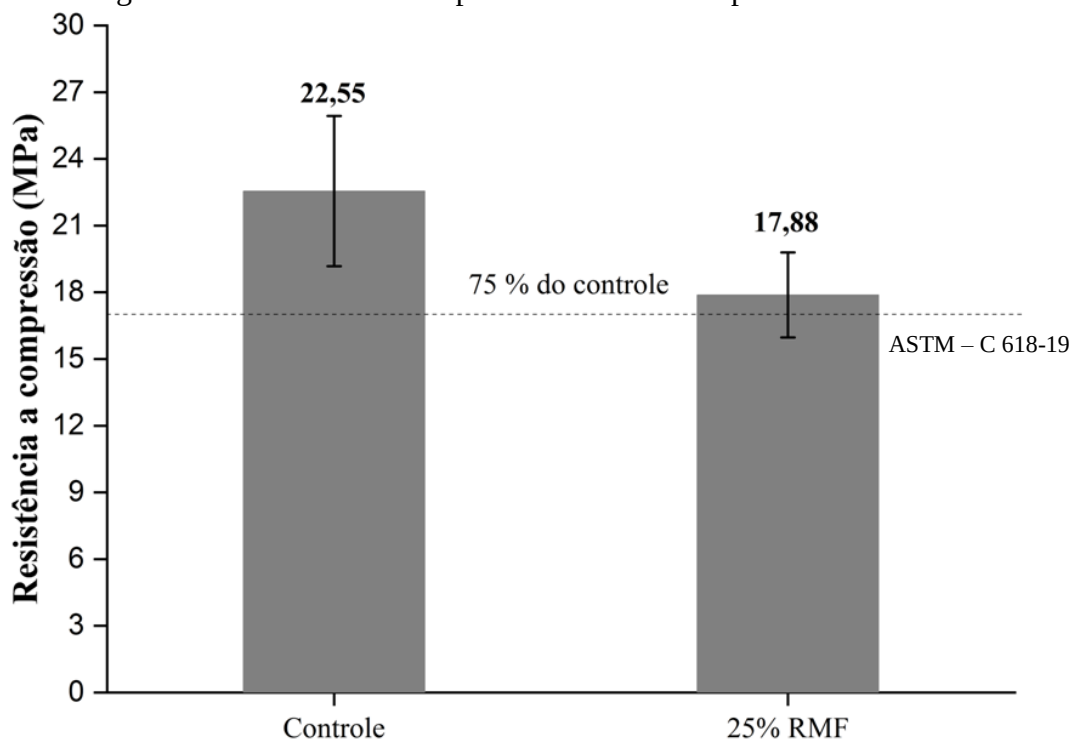
O RMF apresentou um módulo de finura de 1,24 e uma dimensão máxima característica de 0,300 mm. Conforme apresentado na Figura 4C, a maior retenção de partículas do RMF ocorreu na peneira de 0,075 mm, com 28,38%, o que indica que a maioria das partículas desse material se concentra na fração de areia muito fina, com tamanhos entre 0,053 e 0,125 mm (Silva *et al.*, 2002).

Além disso, observou-se que a quantidade de RMF retido na peneira com abertura de 0,045 mm foi de 4,20%. De acordo com os critérios estabelecidos para a aceitação de materiais como pozolânicos, conforme estipulado pela norma ASTM C 618-19 (ASTM, 2019), é exigido que a quantidade de material retido na peneira de 0,045 mm não exceda o limite de 34%. Nesse caso, o valor encontrado de 4,20% atende a premissa estabelecida pela referida norma.

3.1.3 Ensaio de pozolanicidade

A Figura 5 apresenta os valores médios da resistência à compressão para os corpos de prova controle e daqueles com substituição de 25 % do cimento portland por RMF.

Figura 5 - Resistência a compressão no ensaio de pozolanicidade.



Fonte: Do autor (2025).

A análise do índice de atividade pozolânica do RMF realizada com base na resistência à compressão das argamassas produzidas demonstra que a argamassa padrão, sem adição de RMF, registrou uma resistência à compressão de 22,55 MPa. Em comparação, a argamassa com adição de RMF apresentou resistência à compressão de 17,88 MPa, o que corresponde a um índice de pozolanicidade de 79,32 %.

Esse valor posiciona o RMF como um material pozolânico, de acordo com os critérios estabelecidos pela norma internacional ASTM C 618-19 (ASTM, 2019). Segundo essa norma, o índice de atividade pozolânica deve ser de, no mínimo, 75% para que o material seja considerado pozolânico. Portanto, com um índice de 79,32 %, o RMF atende aos requisitos dessa norma.

No entanto, ao se considerar a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) temos outro cenário. Essa norma estabelece um limite mínimo de 90% para o índice de atividade pozolânica e o índice de 79,32% não foi suficiente para atingir o limite mínimo exigido pela norma. Mas apesar disso, o RMF apresenta a maior proporção de suas partículas em 75µm (Figura 4), o que pode proporcionar vantagens significativas no processo de produção dos compósitos. De acordo com Saeli *et al.* (2019), Pereira *et al.* (2020) e Narciso *et al.* (2023), partículas de menor dimensão possuem uma maior área superficial, favorecendo a compactação do material e resultando em compósitos menos porosos e mais resistentes.

3.2 Caracterização dos materiais de reforços

3.2.1 Caracterização química do material lignocelulósico

A análise química do resíduo da madeira de *Pinus* apresentou os seguintes resultados: o teor de cinzas foi de 0,25% ($\pm 0,04$). A quantidade de extrativos foi de 2,83% ($\pm 0,27$). A lignina apresentou um teor de 24,62% ($\pm 0,61$). A holocelulose, que inclui a celulose e a hemicelulose, atingiu 76,47% ($\pm 4,53$). Enquanto a celulose representou 49,12% ($\pm 1,19$) e a hemicelulose o valor de 27,35% ($\pm 1,19$).

O componente químico da madeira de maior relevância para o presente estudo é a quantificação dos extrativos, devido à sua influência direta no desempenho do material. A interação entre as partículas de madeira e a matriz pode ser comprometida e isso interfere na resistência final dos compósitos cimentícios (Kochova *et al.*, 2020; Fatima Zohra; Horváth; Alpár, 2020). Nesse caso, a madeira de *Pinus* apresenta valores baixos (2,83%), o que é bastante desejável para produção dos compósitos (Narciso *et al.*, 2023).

Além disso, os resultados da análise química em questão indicam teores elevados tanto de celulose (49,12%) quanto de lignina (24,62%). Esse aspecto é particularmente importante, visto que a celulose e a lignina desempenham um papel crucial na matriz cimentícia, favorecendo as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos (Narciso *et al.*, 2023).

Em estudo sobre a composição química do *Pinus* silvestre foi observado 1,90 % de extrativos, 27,70 % de lignina, 63,40 % de holocelulose, 41,5 % de celulose, e 21,90 % de hemicelulose (Funda *et al.*, 2022). As variações na composição química do *Pinus* são frequentemente atribuídas à uma série de fatores, como a idade das árvores avaliadas, sua procedência geográfica, espécie e a região da árvore de onde o material foi extraído. Além disso, características como o espaçamento entre as árvores no plantio e suas taxas de crescimento também influenciam essas diferenças. Dessa forma, é esperado que os valores obtidos em análises químicas apresentem pequenas variações entre diferentes estudos, refletindo a influência dessas condições variadas no desenvolvimento das árvores (Luostarinen; Hakkarainen, 2019; Akinyemi; Adesina, 2021).

3.2.2 Análise morfológica e física dos materiais de reforços.

Em relação ao comprimento dos reforços, o PET apresentou o maior valor, 4,84 mm ($\pm 2,10$), seguido pelo PP, com comprimento médio de 2,44 mm ($\pm 0,77$). O *Pinus* possui o menor comprimento, 0,82 mm ($\pm 0,20$). Para o diâmetro, o PET novamente se destaca com o maior valor, 2,15 mm ($\pm 0,53$). O PP possui um diâmetro de 1,20 mm ($\pm 0,36$), enquanto o *Pinus* apresenta o menor diâmetro, 0,31 mm ($\pm 0,07$). Em relação ao índice de esbeltez, o *Pinus* apresenta o maior índice, de 2,83 ($\pm 1,10$), indicando uma forma mais alongada. O PET possui um índice de esbeltez de 2,36 ($\pm 1,14$), enquanto o PP apresentou o menor valor, 1,13 ($\pm 0,77$), indicando uma forma mais compacta.

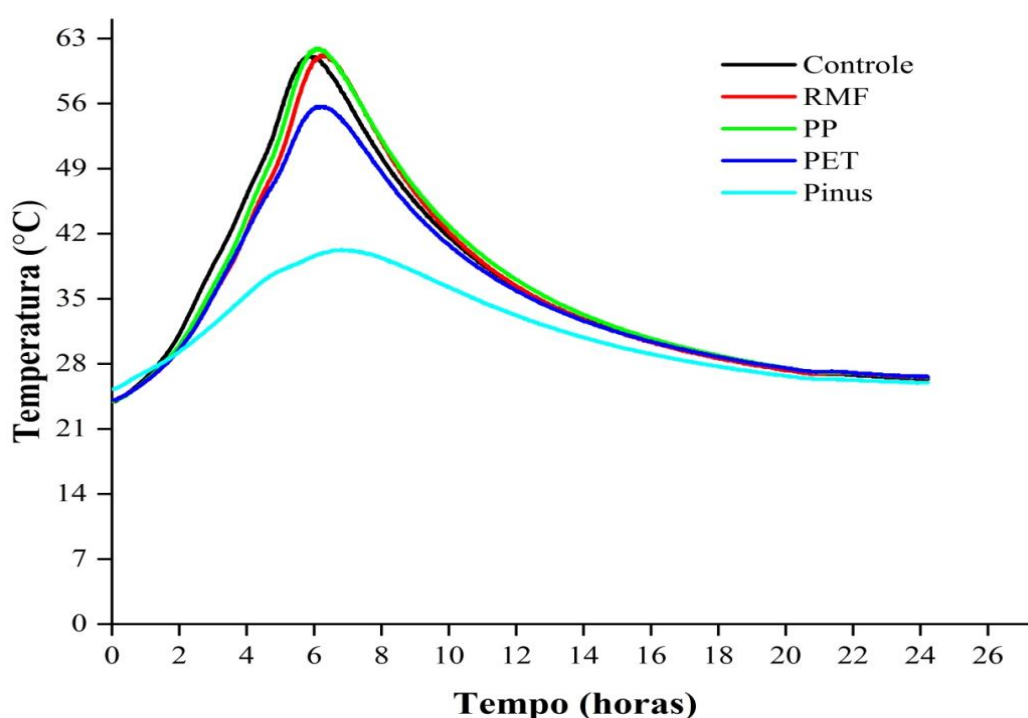
Reforços com diâmetros menores tendem a melhorar o desempenho mecânico, pois preenchem melhor os vazios da matriz e promovem uma interface mais eficiente, enquanto reforços com diâmetros maiores têm menor eficácia (Kerni *et al.*, 2020). Além disso, quando o comprimento das fibras é inferior ao necessário para gerar esforços, a transferência de tensão entre a fibra e a matriz é prejudicada, comprometendo as propriedades mecânicas do compósito (de Klerk *et al.*, 2020; Marvila *et al.*, 2021). O índice de esbeltez, que relaciona comprimento e diâmetro, permite ajustar as dimensões dos reforços, sendo essencial para padronizar suas características (Marvilla *et al.*, 2021). Os reforços de PP, PET e *Pinus* apresentaram variações nessas propriedades, o que influencia seu papel na matriz cimentícia, seja como agente de reforço ou de preenchimento (Bzeni, 2024).

Para Kerni *et al.* (2020), a densidade dos materiais de reforço podem influenciar diretamente na densidade final dos compósitos produzidos, impactando significativamente em suas propriedades físicas e mecânicas. As partículas de *Pinus* apresentaram uma densidade de $0,530 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$, valor próximo ao registrado por César *et al.* (2014), que foi de $0,456 \text{ g/cm}^3$. A densidade da madeira de *Pinus* variam entre $0,556 \text{ g/cm}^3$ e $0,597 \text{ g/cm}^3$, dependendo do tipo de solo de origem da madeira (Kozakiewics *et al.*, 2020). Madeiras com densidade básica superior a $0,50 \text{ g/cm}^3$ são classificadas como de densidade média (Narciso *et al.*, 2023). A densidade do resíduo PP foi de $1,17 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$, valor superior ao encontrado na literatura em análise do PP virgem que foi de $0,90 \text{ g/cm}^3$ (Alsabri, Tahir, Al-Ghamdi, 2022). Mas vale considerar que no PP reciclado existe a presença de pigmentos que podem vir a alterar essa propriedade. A densidade do resíduo PET foi de $1,35 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$, segundo a literatura o valor da densidade do PET está entre $1,3 \text{ g/cm}^3$ e $1,4 \text{ g/cm}^3$ (Stride *et al.*, 2024).

3.3 Análise de aptidão

A Figura 6 exibe as curvas de inibição para o tratamento controle, formulada com água e cimento, e para os tratamentos formulados com os componentes inseridos nas formulações das telhas de concreto (RMF, PP, PET e *Pinus*).

Figura 6 – Curva de inibição para os componentes inseridos na formulações



Fonte: Do autor (2025).

A formulação contendo partículas de *Pinus* atingiu uma temperatura máxima de 40,31°C após 6,82 horas, enquanto o PET apresentou uma temperatura máxima mais elevada, de 55°C em um período menor, 6 horas. Por outro lado, os tratamentos controle, RMF e PP alcançaram temperaturas máximas em torno de 61°C em aproximadamente 6 horas, favorecendo a redução dos índices de inibição. Os índices de inibição para RMF (0,01), PP (0,00) e PET (0,08) foram inferiores a 10, colocando-os na categoria de baixo índice de inibição, ao contrário do *Pinus* que obteve um valor mais alto de índice de inibição (18,13) que foi considerado intermediário. Os extrativos, mesmo em baixa quantidade (2,83%), presentes no resíduo de *Pinus* podem vir a reduzir a temperatura máxima e aumentar o tempo necessário para alcançá-la (Narciso *et al.*, 2023).

Estudo realizado por Eugenio *et al.* (2023b) com RMF em fibrocimento obteve um

índice de inibição de 0,05%, alinhando-se com o valor de 0,01% encontrado neste estudo, indicando que o RMF não interfere significativamente no processo de cura do cimento. O índice de 18,13% para o *Pinus* também é compatível com a literatura, já que estudo de Marques *et al.* (2016) obteve 23,71% para resíduo de eucalipto, apresentando valores similares quando se consideram resíduos provenientes do processamento de madeira, indicando que os dados para pinus podem ser comparáveis aos de eucalipto.

3.4 Caracterização das Telhas de Concreto

3.4.1 Propriedades físicas das telhas de concreto

As Tabelas 3 apresenta os valores médios para a densidade das telhas de concreto aos 28 dias de cura.

Tabela 3 – Densidade aparente aos 28 dias de cura (g/cm³).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	1,87(0,03) Ba	1,85(0,01) Aa
PP	1,80(0,03) Aa	1,84(0,02) Aa
PET	1,83(0,05) Aa	1,92(0,06) Bb
<i>Pinus</i>	1,83(0,03) Aa	1,86(0,03) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

A tabela 4 apresenta os valores médios para a densidade das telhas de concreto após envelhecimento acelerado. Para ambos períodos de cura foram observadas interações estatísticas significativas entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 4 – Densidade aparente após envelhecimento acelerado (g/cm³).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	1,90(0,04) Bb	1,84(0,02) Aa
PP	1,81(0,03) Aa	1,85(0,01) Aa
PET	1,93(0,04) Bb	1,84(0,02) Aa
<i>Pinus</i>	1,90(0,07) Bb	1,85(0,02) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que o único caso em que houve diferenciação estatística foi na combinação de reforço com PET na substituição do PPC e 10% do cimento por RMF. A maior densidade do PET ($1,35 \text{ g/cm}^3$) e sua geometria mais alongada, com comprimento médio de 4,84 mm e índice de esbeltez de 2,36, fazem com que o RMF, especialmente quando substitui o PPC – que tem uma diferença granulométrica significativa para o RMF (Tabela 6) –, contribua para o aumento da densidade do compósito, ao preencher melhor os espaços entre o reforço e a matriz. Ao analisar o efeito dos reforços dentro de cada matriz cerâmica (Sem RMF – Com RMF), observou-se que todos os reforços diminuíram sutilmente a densidade dos compósitos sem a adição de RMF. Esse efeito é devido ao aumento do número de poros e menor densificação da matriz (Figura 09), já para a substituição do PPC e 10% do cimento, o PET se diferenciou dos demais reforços nessa matriz, apresentando o maior valor. A maior densidade do PET ($1,35 \text{ g/cm}^3$) aliado ao seu perfil mais alongado permite uma melhor compactação da matriz ao ser preenchida por RMF.

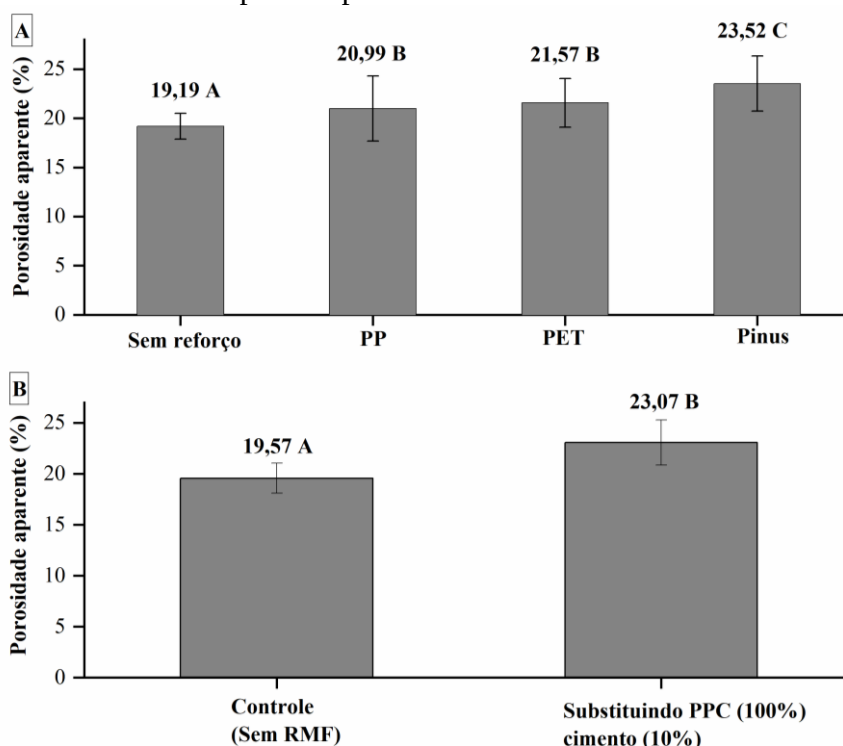
Considerando os resultados após envelhecimento acelerado, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que houve uma ligeira redução da densidade aparente tanto para o controle (sem reforço) quanto para os reforços de PET e *Pinus*. Enquanto que o reforço com PP não apresentou diferenciação estatística. Observa-se que para o controle e para o reforço com PET (Tabela 5) houve um aumento da porosidade, contribuindo para uma menor densificação da matriz. Para o *Pinus* o efeito da porosidade não se aplica, pois essa reduziu. Nesse caso, o índice de inibição do *Pinus* (Figura 6) aliado à redução de cimento na formulação pode vir a reduzir a qualidade da interface entre o reforço e a matriz, contribuindo para a redução da densidade do compósito.

Ao analisar o efeito dos reforços dentro de cada matriz cerâmica (sem RMF – com RMF), e considerando a matriz sem adição de RMF, o PP foi o único reforço que se diferenciou dos demais, apresentando o menor valor de densidade. Isso é devido a menor porosidade aparente apresentada pelo tratamento (Tabela 5) e consequentemente menor absorção de água (Tabela 3). Ao considerar-se a matriz com substituição de PPC e 10% do cimento por RMF não houveram diferenciações estatísticas.

Os valores médios de porosidade e absorção de água das telhas de concreto aos 28 dias de cura estão apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Em ambas as análises, não foi identificada interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

No entanto, ao avaliar separadamente o efeito do RMF e dos tipos de reforços, observou-se que os tratamentos influenciaram significativamente tanto a porosidade quanto a absorção de água das telhas. Após o envelhecimento acelerado, foi constatado efeito de interação significativo entre os fatores analisados, conforme demonstrado nas Tabelas 5 e 6.

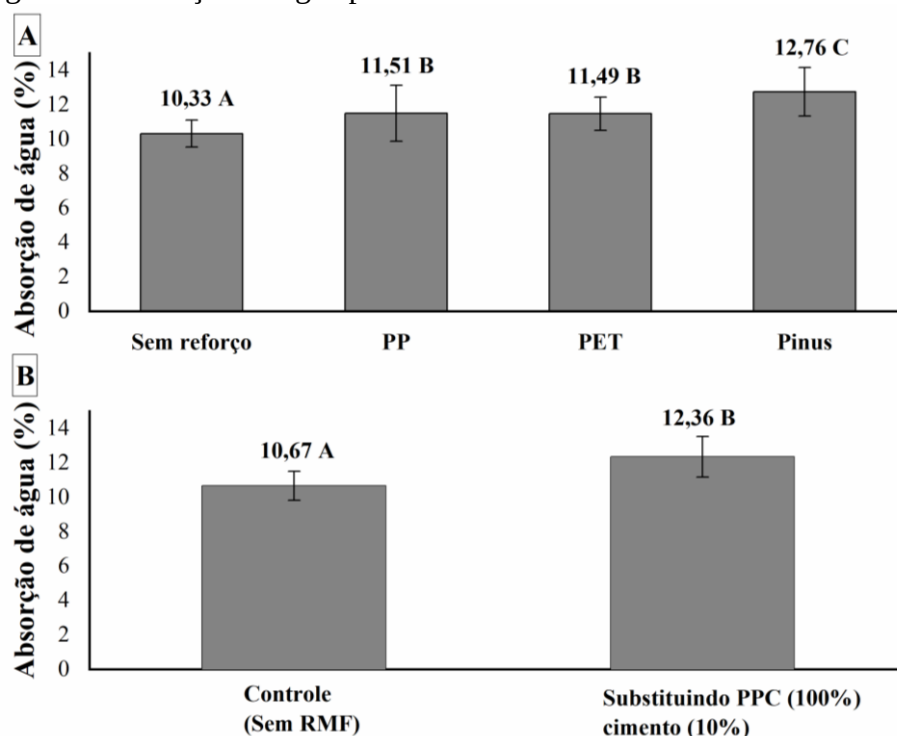
Figura 7 - Porosidade aparente para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.



Legenda: (A) Porosidade aparente aos 28 dias de cura considerando o efeito dos reforços; (B) Porosidade aparente aos 28 dias de cura considerando o efeito do RMF. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Figura 8 - Absorção de água para as telhas de concreto aos 28 dias de cura.



Legenda: (A) Absorção de água aos 28 dias de cura considerando o efeito dos reforços; (B) Absorção de água aos 28 dias de cura considerando o efeito do RMF. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os compósitos aos 28 dias de cura e a substituição do PPC e 10% do cimento por RMF, houve um aumento na porosidade de 17,88% e na absorção de água de 15,83% dos compósitos em relação ao tratamento controle. Esses resultados podem estar relacionados a substituição do cimento pelo RMF (Figura 11) que reduz a quantidade de material ligante e isso reduz a intensidade das reações do silicato tricálcio (C_3S) e do silicato bicálcio (C_2S), vindo a reduzir a quantidade de Silicato de cálcio hidratado (CSH) que tem por objetivo o preenchimento dos poros do compósito, reduzindo seu teor de vazios e diminuindo a absorção de água (Meng *et al.*, 2021; Al-Saffar; Wong; Paul, 2023; Shahpari *et al.*, 2023). Os difratogramas de Raios – X (Figuras 11 e 12) evidenciaram menor intensidade dos picos de CSH ao se comparar as formulações em que foram substituídos 10 % de cimento e PPC por RMF.

Considerando o efeito dos reforços na matriz, a adição de *Pinus* promoveu um aumento da porosidade em 22,56% e da absorção de água em 23,50%. Os extrativos presentes no resíduo de *Pinus*, mesmo em baixa quantidade (2,83%), afetam o processo de hidratação do cimento, conforme verificado na análise do índice de inibição (Figura 6).

Tabela 5 - Porosidade aparente para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	18,64(1,13) Ba	19,57(1,08) Aa
PP	16,21(0,50) Aa	21,02(0,28) Ab
PET	17,50(1,11) Ba	19,99(1,09) Ab
<i>Pinus</i>	22,87(1,15) Cb	20,41(2,24) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Tabela 6 – Absorção de água para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (%).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	9,80(0,70) Aa	10,62(0,64) Aa
PP	8,97(0,28) Aa	11,39(0,17) Ab
PET	9,05(0,63) Aa	10,87(0,76) Ab
<i>Pinus</i>	12,05(0,80) Bb	11,04(1,33) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Para os compósitos avaliados após envelhecimento acelerado e considerando o efeito dos reforços na matriz, para o controle (sem uso de RMF), observa-se um aumento significativo tanto da absorção de água quanto da porosidade com a adição de resíduo de *Pinus*, estando associado ao efeito da cura do cimento. O reforço com PP apresentou o menor valor de porosidade (16,21%), sendo esse valor alinhado com o valor de absorção de água que também apresentou o menor valor (Tabela 3) nessa formulação. Além disso ao se comparar as imagens apresentadas na Figura 9, observa-se uma extrutura mais compacta, inclusive com um recobrimento total da partícula de PP pelos produtos resultantes do processo de hidratação.

Contudo, considerando as formulações com substituição de PPC e 10% do cimento por RMF esse efeito não foi evidenciado. Esse resultado está associado as propriedades pozolânicas do RMF (Figura 5) e sua baixa granulometria (Figura 4) que pode vir a preencher os vazios e reduzir a porosidade e a absorção de água com a evolução do processo de cura (Narciso *et al.*, 2023). Considerando o efeito da matriz em cada tipo de reforço utilizado, verificou-se que para as formulações sem reforço, não houve efeito significativo para a porosidade e para a absorção de água com o uso do RMF na formulação.

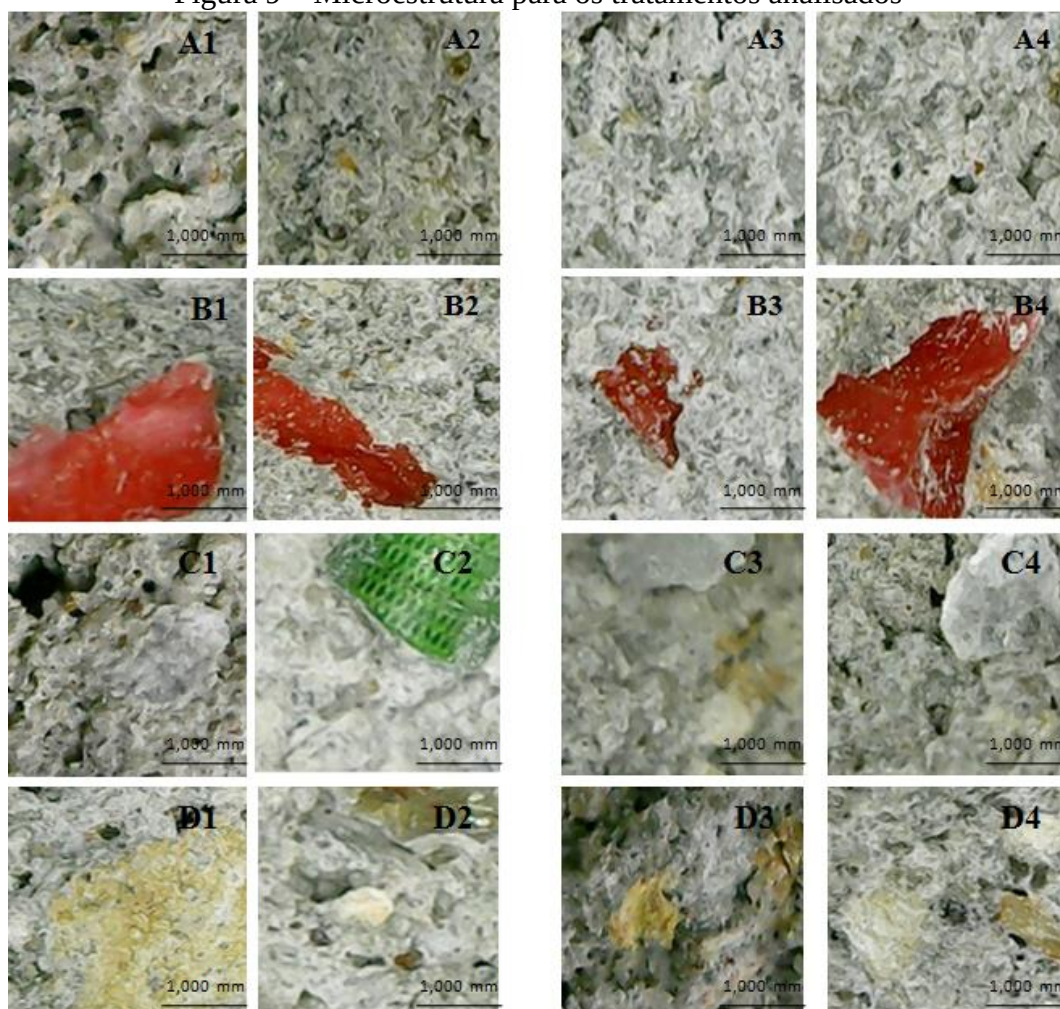
Tanto para o PP quanto para o PET, observou-se uma elevação da porosidade e da

absorção de água na substituição do PPC e de 10% do cimento por RMF, devido à redução da quantidade de material ligante. Para o *Pinus* houve uma redução da porosidade e da absorção de água. Esse efeito pode estar associado à geometria desses reforços. O *Pinus* possui o menor diâmetro dentre os reforços utilizados (0,31mm) e reforços com diâmetros menores tendem preencher melhor os vazios da matriz e promovem uma interface mais eficiente, com menor porosidade (Kerni *et al.*, 2020), diferentemente dos reforços com PP e PET que possuem um diâmetro 3,8 e 6,9 vezes maior que o *Pinus*.

Além disso, a porosidade e a absorção de água reduziram após os ciclos de molhagem e secagem do envelhecimento acelerado, favorecendo a hidratação contínua do cimento, permitindo que, mesmo após a cura inicial, ocorram reações de hidratação gradativas ao longo do tempo. Esse processo contribui para a redução dos vazios na microestrutura, promovendo a compactação do material e preenchendo os espaços porosos com produtos de hidratação. Esse efeito foi observado por Eugenio *et al.*(2021) e Eugenio *et al.*(2023a) em estudos com RMF na produção de telhas e concreto.

A Figura 09 apresenta as imagens dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado que contribuem para tal afirmação. As imagens revelam uma diminuição no número de poros nos compósitos após o envelhecimento. Esse comportamento é atribuído aos ciclo de molhagem e secagem a que os compósitos foram submetidos durante o envelhecimento, favorecendo uma hidratação contínua e resultando na redução dos vazios presentes na microestrutura (Eugenio *et al.*, 2023).

Figura 9 – Microestrutura para os tratamentos analisados



Legenda:(A1)Sem reforço 28;(A2)Sem reforço Env. (A3) RMF-Sem reforço 28;(A4) RMF-Sem reforço Env. (B1) PP 28; (B2) PP 28 Env; (B3) RMF-PP 28; (B4) RMF-PP Env; . (C1) PET 28; (C2) PET 28 Env; (C3) RMF-PET 28; (C4) RMF-PET Env; (D1) Pinus 28; (D2) Pinus 28 Env; (D3) RMF-Pinus 28; (D4) RMF-Pinus Env.

Fonte: Do autor (2025).

Seguindo as diretrizes da norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), que limita a absorção de água para telhas de concreto em 10 %, nenhum dos tratamentos para os ensaios aos 28 dias de cura atendeu à essa especificação. Para os ensaios com os compósitos envelhecidos, somente os tratamentos controle, PP e PET sem RMF atenderam à norma enquanto os demais tratamentos não estão com valores dentro do especificado. No entanto, segundo a norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009), que estipula uma absorção máxima de água em 14,5% para telhas de concreto com densidades entre 1682 kg/m³ a 2002 kg/m³, todos os tratamentos, após 28 dias de cura e envelhecidos, satisfazem os requisitos exigidos para o produto.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores médios para o peso seco das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, respectivamente. Para ambos períodos de cura foram observadas interações estatísticas significativas entre a utilização de RMF e os

tipos de reforços.

Tabela 7 – Peso seco para telhas de concreto aos 28 dias (dN/m²).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	31,61(0,89) Aa	33,09(1,09) Cb
PP	33,58(0,82) Bb	31,86(0,69) Ba
PET	32,27(1,05) Ab	30,92(0,52) Aa
<i>Pinus</i>	31,08(0,91) Aa	30,85(0,27) Aa

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na coluna e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na linha.

Fonte: Do autor (2025).

Tabela 8 – Peso seco para telhas de concreto após envelhecimento acelerado (dN/m²).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	30,27(0,51) Aa	32,67(0,62) Ab
PP	33,73(0,79) Bb	32,17(0,24) Aa
PET	33,07(0,57) Ba	32,91(0,81) Aa
<i>Pinus</i>	29,97(0,54) Aa	32,27(1,23) Ab

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na coluna e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na linha.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para telhas sem reforço houve um aumento do peso seco com a substituição de PPC e 10% do cimento por RMF. Esse fato pode estar relacionado à menor granulometria do RMF comparada principalmente à granulometria do PPC (Figura 6) e também à densidade do RMF (3,10 g/cm³) que é maior que a do PPC (2,73 g/cm³), conforme observado por Eugenio *et al.* (2021). Com a adição de reforços esse efeito não fica evidente, pois tanto para o PP quanto para o PET houve uma redução do peso seco na matriz com RMF, fato alinhado principalmente pela formação de mais vazios e uma menor densificação da matriz (Figuras 9). Não houve variação estatística considerando o reforço com *Pinus*, que pode estar relacionado ao seu menor diâmetro (0,31 mm) que permite uma maior acomodação das partículas de RMF na matriz. Assim, mesmo apresentando menor densidade (0,530 g/cm³), sua morfologia tende a equilibrar o efeito sobre a variação do peso seco.

Ao analisar o efeito dos reforços dentro de cada matriz cerâmica (sem RMF – Com RMF), observou-se que para o controle (sem adição de RMF) houve um aumento do peso

seco para o reforço de PP. Esse fato pode estar alinhado com seu menor índice de esbeltez (1,13), que aumenta a capacidade do reforço de se distribuir uniformemente promovendo uma melhor interação com a matriz. Com a adição de RMF houve uma redução do peso seco para todos os reforços.

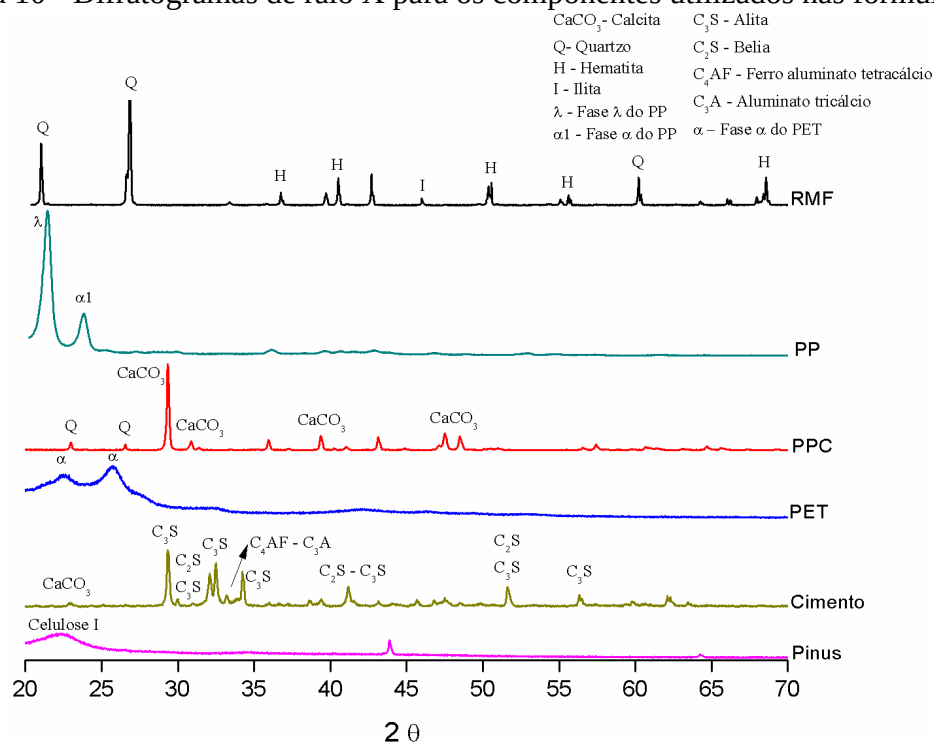
Considerando os resultados após envelhecimento acelerado, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para telhas sem reforço houve um aumento do peso seco com a substituição de PPC e 10% do cimento por RMF. Isso pode ser devido à densidade do RMF ($3,10 \text{ g/cm}^3$) que é maior que a do PPC ($2,73 \text{ g/cm}^3$), além da granulometria do RMF ser menor que a do PPC (Eugenio *et al.*, 2021). Para o PP houve uma redução do peso seco na matriz com RMF, fato alinhado principalmente pela formação de mais vazios e uma menor densificação da matriz. Fato observado também para o reforço com *Pinus*, que apresentou maior peso seco, devido à menor formação de vazios na matriz (Tabela 5). Ao analisar o efeito dos reforços dentro de cada matriz cerâmica, observou-se que sem adição de RMF, tanto PP quanto o PET apresentaram os maiores valores de peso seco devido a uma maior densificação da matriz, apresentando os menores valores de porosidade para essas formulações. Para a matriz com substituição do PPC e do cimento não houve variação estatística dentre os reforços, fato também alinhado com a porosidade dos compósitos que não apresentaram variação estatística para essas formulações (Tabela 5).

Todos os tratamentos aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, estão de acordo com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a qual limita o peso seco em 48 dN/m^2 .

3.4.2 Difração de Raios-X (DRX) das telhas de concreto.

Na Figura 10 estão apresentados os difratogramas oriundos das análises de Difração de Raios-X do Cimento, RMF, PPC, PET, PP e *Pinus*.

Figura 10 - Difratogramas de raio X para os componentes utilizados nas formulações.



Fonte: Do autor (2025).

No RMF, além da abundante presença de Quartzo, encontra-se também a hematita, composta majoritariamente por óxido de ferro (Fe₂O₃), indicando que todo o ferro no RMF se concentra nesse mineral. Em menor quantidade aparece a ilita, uma argila. Pesquisas de Thejas e Hossiney (2022) e Santos *et al.* (2024) também registraram a presença desses minerais nas posições indicadas.

No cimento Portland, os principais componentes incluem alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcio (C₄AF). A alita constitui a maior fração do cimento, representando de 50% a 70%, enquanto a belita responde por aproximadamente 20% a 30%. A fase de aluminato tricálcico (C₃A) desempenha um papel essencial na cura inicial do cimento. Ao reagirem com água, essas fases formam entre 20% e 30% de portlandita (Ca(OH)₂) e de 60% a 70% de silicato de cálcio hidratado (CSH). (Dunuweer; Rajapakse, 2018; Eugenio *et al.*, 2021; Fanna *et al.*, 2023).

O difratograma do PPC destaca a alta concentração de carbonato de cálcio (CaCO₃), identificado como calcita, com uma presença mais discreta de dióxido de silício (SiO₂), identificado como quartzo. Esses componentes desempenham um papel vital nos processos de hidratação e endurecimento do cimento, promovendo a formação de fases cristalinas essenciais, como o CSH. Trabalhos conduzidos por Eugenio *et al.* (2021) e Salman *et al.* (2023) também detectaram essas mesmas fases cristalinas nas posições indicadas.

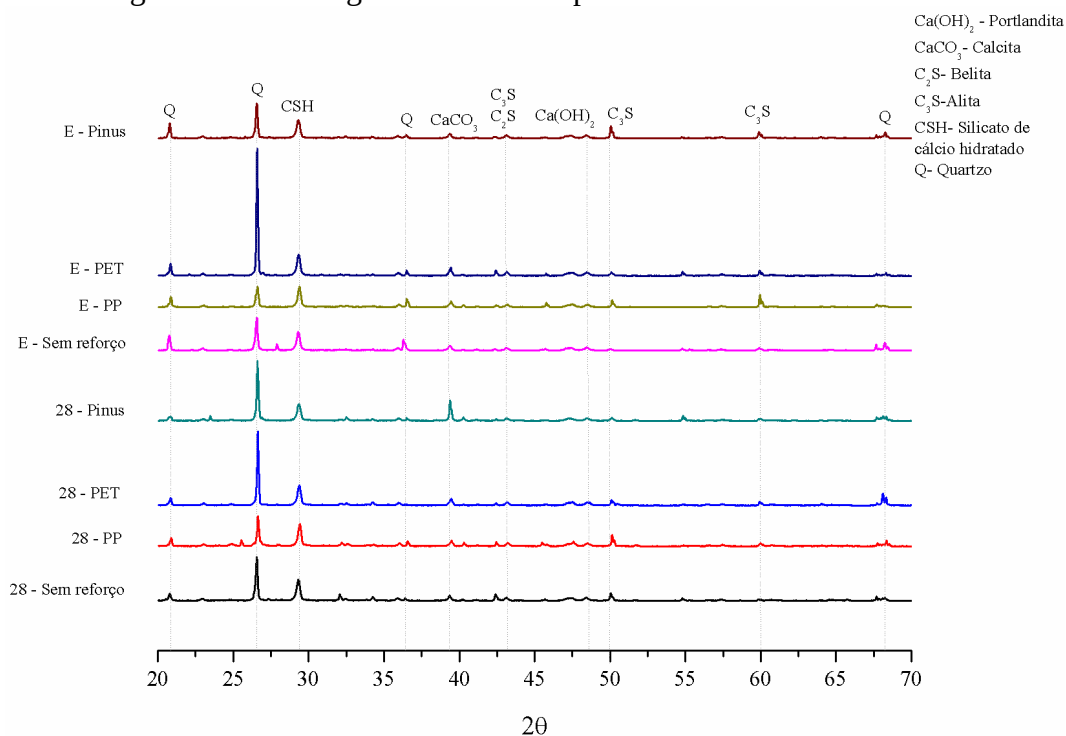
No difratograma do PET, observam-se picos definidos em $2\theta = 22,5^\circ$ e $2\theta = 26,2^\circ$, característicos da fase cristalina α do material. Essa fase possui uma estrutura triclínica, com parâmetros de rede $a = 4,56 \text{ \AA}$, $b = 5,94 \text{ \AA}$ e $c = 10,75 \text{ \AA}$, conforme descrito nos estudos de Barros *et al.* (2020) e de Eiogu, Ibeneme e Aiyejagbara (2020), que identificaram as fases cristalinas do PET.

O polipropileno (PP), apesar de sua composição química simples, apresenta uma estrutura cristalina notavelmente complexa, composta principalmente pelas fases α e γ . Essas fases possuem características distintas que podem ser identificadas por meio de análises de difração de raios X. A fase γ é reconhecida pelo pico na região de $20,07^\circ$, enquanto a fase α apresenta um pico em $21,86^\circ$. Nos difratogramas típicos do PP, é comum observar picos marcantes em torno de 20° e 23° , refletindo essas estruturas cristalinas específicas (Zhu *et al.*, 2011; Zaccone *et al.*, 2020; Banerjee *et al.*, 2021).

Na madeira, apenas a celulose apresenta uma estrutura parcialmente cristalina. No padrão de difração de raios X, é possível identificar uma banda característica próxima a $22,5^\circ$. Esse pico está relacionado ao plano cristalográfico 200 da celulose I, que reflete a organização tridimensional das fibras. Essa disposição, com cadeias de glicose alinhadas paralelamente, confere elevada rigidez e resistência às fibras vegetais (Broda; Popescu, 2019; García-Iruela, *et al.*, 2021; Broda *et al.*, 2022).

Nas Figuras 11 e 12 estão apresentados os difratogramas para os compósitos, em função do tipo de matriz cerâmica utilizada (controle ou substituição do PPC e 10% do cimento por RMF), aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.

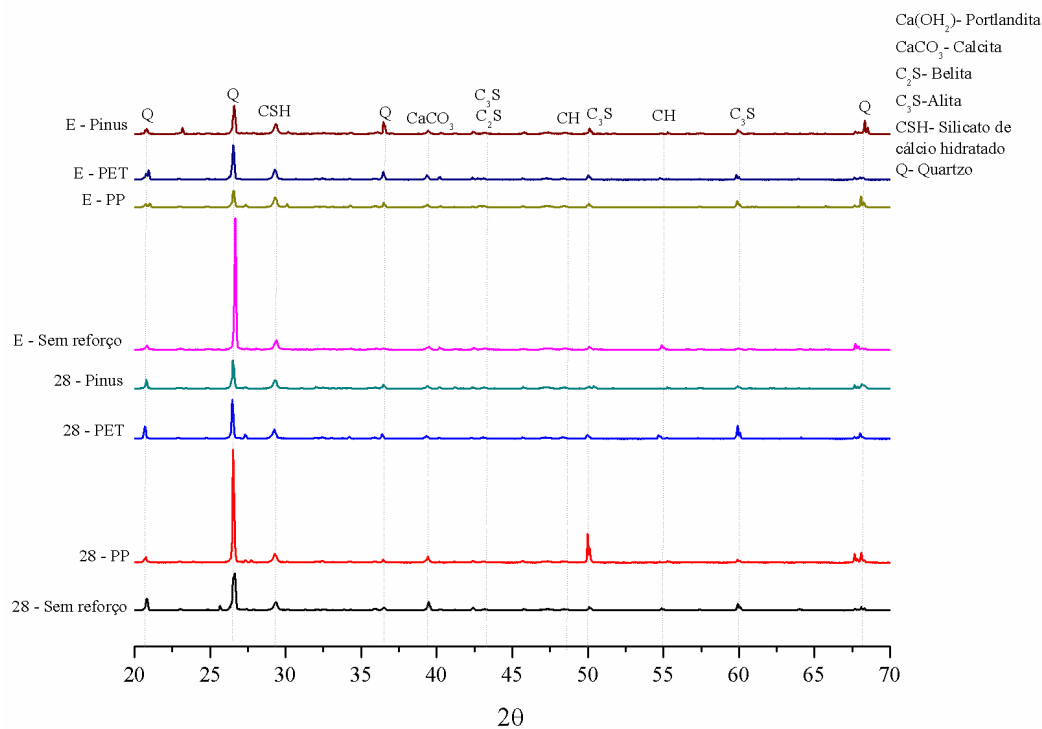
Figura 11 - Difratoogramas de raio X para os tratamentos com RMF.



Legenda: 28 – Aos 28 dias de cura; E - Após envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2025).

Figura 12 - Difratoogramas de raio X para 10 % do cimento e 100 % do PPC por RMF.



Legenda: 28 – Aos 28 dias de cura. E - Após envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2025).

O Quartzo é o mineral mais abundante encontrado na areia (BENCHAA, *et al.*, 2021)

que compõe o maior volume de matéria prima empregado nas formulações, conforme traço base utilizado no presente estudo. Diante disso, os picos característicos do quartzo se destacam em todos os tratamentos. A maior intensidade do SiO_2 pode ser observada na posição 26° . Contudo destacam-se picos menos intensos nas posições 21° , 36° e 68° , além disso observa-se que o SiO_2 é o principal constituinte do RMF (79,6%), conforme pode ser observado na Tabela 6. Essas características podem ser observadas em todos os tratamentos, antes e após o envelhecimento acelerado. As posições desses picos foram destacadas também por outros autores em pesquisas com a matriz cimentícia, conforme estudos realizados por Burduhos Nergis *et al.* (2020) e Atyia; Mahdy; Adb Elrahman (2021).

Os componentes minerais do cimento, como o C_3S (silicato tricálcio ou alita) e o C_2S (silicato bicálcio ou belita), desempenham papéis fundamentais nas reações de hidratação e no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto. Essas fases podem ser identificadas em todos os tratamentos, mesmo após o envelhecimento acelerado, evidenciando que o processo de hidratação continua em andamento (Narciso *et al.*, 2023). Os picos são observados nos ângulos de $43,5^\circ$ para ambos os componentes e em 50° e 60° para o C_3S . As posições desses picos foram destacadas também por outros autores em pesquisas com a matriz cimentícia, conforme estudo realizado por Atyia; Mahdy; Adb Elrahman (2021).

Os componentes do cimento Portland interagem com a água, resultando em produtos fundamentais oriundos do processo de hidratação. Dentre os produtos formados, o silicato de cálcio hidratado (CSH) destaca-se como o principal produto gerado. Este composto é essencial para a resistência do concreto, contribuindo significativamente para sua durabilidade e impermeabilidade. Os picos de CSH podem ser observados nos ângulos de 29° , conforme destacado também por Eugenio *et al.* 2021 e Narciso *et al.* 2023.

O Ca(OH)_2 (Hidróxido de cálcio) é apresentado no ângulo de 48° . Tal componente contribui para a alcalinidade do concreto, auxiliando na proteção contra a corrosão ao propiciar um ambiente alcalino na estrutura. Contudo, possui baixa resistência e pode ser lixiviado ao longo do tempo, provocando perda de massa e afetando a durabilidade do concreto. Dentro desse contexto, ainda temos presença do principal produto da reação de carbonatação que é o CaCO_3 (Carbonato de cálcio). A formação de CaCO_3 na forma de calcita é o principal resultado da reação de carbonatação em materiais cimentícios. Esse processo é desencadeado pela interação do dióxido de carbono atmosférico com o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia. Embora a precipitação de CaCO_3 possa aumentar a densidade do concreto e reduzir sua permeabilidade, ela também diminui o pH, o que pode comprometer a proteção das armaduras contra a corrosão. Essa estrutura pode ser

percebido na posição 39° (Von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020; Zhang; Gan; Xue, 2024).

3.4.3 Propriedades mecânicas das telhas de concreto.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores médios para a carga de ruptura à flexão das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, repectivamente. Para ambos períodos de cura foram observadas interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços.

Tabela 9 – Carga de ruptura a flexão para telhas de concreto aos 28 dias (kN).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	1,88(0,20) Aa	1,96(0,31) Ba
PP	1,75(0,17) Ab	1,44(0,16) Aa
PET	1,99(0,27) Ab	1,43(0,15) Aa
<i>Pinus</i>	1,96(0,35) Aa	1,81(0,28) Ba

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tramentos na coluna e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na linha.

Fonte: Do autor (2025).

Tabela 10 – Carga de ruptura a flexão após envelhecimento acelerado (kN).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	2,14(0,18) Aa	2,44(0,25) Ba
PP	2,63(0,23) Bb	2,12(0,17) Aa
PET	2,31(0,19) Aa	2,15(0,11) Aa
<i>Pinus</i>	2,04(0,21) Aa	2,64(0,37) Bb

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tramentos na coluna e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na linha.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando os resultados para os 28 dias de cura, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para telhas sem reforço e reforçadas com *Pinus* não houve diferenciação estatística com o uso do RMF, contudo para os reforços com PP e PET houve uma redução da carga de ruptura devido ao aumento do teor de vazios (Figura 9A) oriundos da adição desses reforços aliado à redução da quantidade de cimento para essas formulações. Não houve variação estatística considerando o reforço com *Pinus*, que pode estar relacionado ao seu menor diâmetro (0,31 mm), que permite uma maior acomodação das partículas de RMF na matriz,

fato que pode ser verificado na Tabela 3, que apresenta pequeno aumento em sua densidade (1,6%).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF) observou-se que para a matriz sem RMF não houve diferenciações estatísticas para nenhum dos reforços empregados. Contudo com a substituição do PPC e 10% do cimento por RMF observou-se uma redução da carga de ruptura para o PP e PET devido ao aumento da porosidade advindas da adição desses reforços. A formulação com *Pinus* não apresentou diferenciação estatística, a granulometria do *Pinus* permitiu uma maior densificação da matriz (Figura 3).

Considerando os resultados após o envelhecimento acelerado, ao analisar o efeito da composição da matriz cerâmica (com ou sem utilização de RMF) dentro de cada tipo de reforço, observou-se que para as telhas sem reforços não há diferenciação estatística em relação ao tipo de matriz, contudo para o reforço com PP observou-se uma redução da carga de ruptura em 24,05%. A aumento do teor de vazios nessa formulação influenciou a redução da carga de ruptura, visto que a porosidade nesse caso aumentou em 29,67% (Tabela 5). Para a formulação reforçada com *Pinus*, houve um incremento significativo de 29% na carga de ruptura que foi influenciado pela redução do teor de vazios dos compósitos, cuja porosidade reduziu em 12% na presente formulação (Tabela 5).

Ao analisar o efeito do tipo de reforço dentro de cada tipo de matriz (com ou sem utilização de RMF) observou-se que para a matriz sem RMF o reforço com PP apresentou diferenciação estatística com aumento da carga de ruptura. Entretanto, na matriz com RMF tanto PP quanto PET apresentaram diferenciação estatística com redução do valor da carga de ruptura. Em ambos os casos, a variação da porosidade dos compósitos influenciou diretamente os valores de suas cargas de ruptura (Tabela 5).

Estudos sobre a substituição do PPC por RMF em telhas de concreto demonstraram um grande potencial na substituição de 100% do PPC. Os resultados mostraram que, após os ciclos de molhagem e secagem durante o envelhecimento acelerado, houve um aumento significativo na resistência à flexão. Esse comportamento foi também observado em outra pesquisa, na qual 10% do cimento foi substituído por RMF, reforçando a viabilidade do uso do resíduo na construção civil como uma alternativa sustentável e eficaz (Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a).

Os tratamentos avaliados aos 28 dias de cura não estão em conformidade com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), pois a resistência à flexão das telhas não atingiu a carga mínima de 2000 N para a classe “C”. Contudo, após envelhecimento acelerado todos os

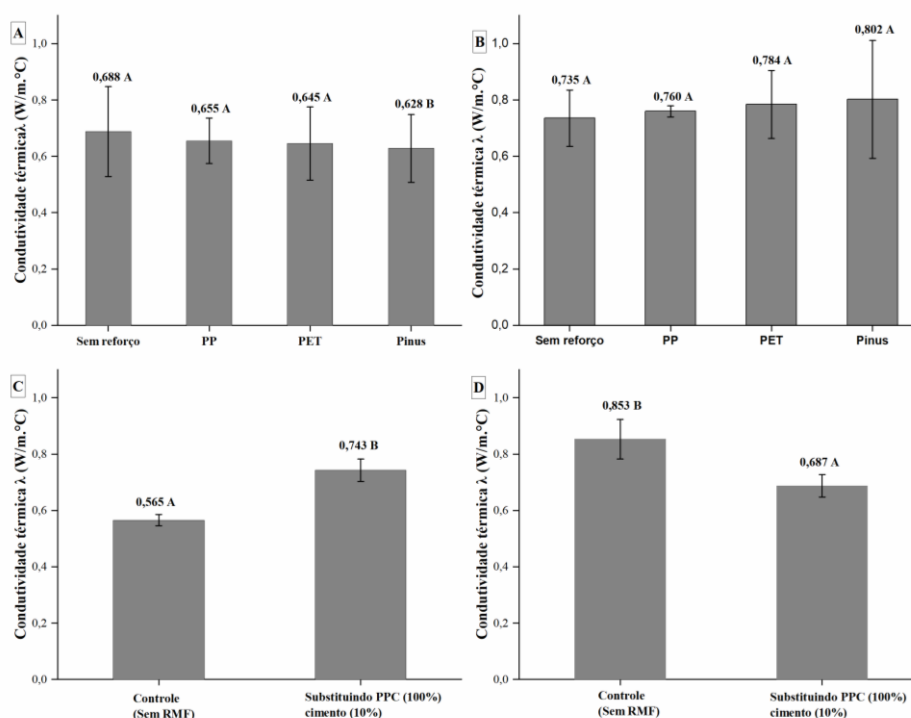
tratamentos estão em consonância com a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009) que estipula a carga mínima de ruptura à flexão para telhas classe “C” em 2000 N. Esse fato é devido a constante hidratação dos compósitos nos ciclos de molhagem e secagem que favoreceram a cura do concreto preenchendo os poros da matriz e por consequência aumentando a resistência à flexão (Niu *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2023).

Além disso, a norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009) define que as telhas classificadas como "Tipo 1", com densidade entre 1682 kg/m³ e 2002 kg/m³, devem apresentar uma carga mínima de ruptura à flexão superior a 1334 N. Nos ensaios realizados, tanto após 28 dias de cura quanto após o envelhecimento acelerado, todos os tratamentos atenderam aos requisitos exigidos.

3.4.4 Desempenho térmico das telhas de concreto

A Figura 13 apresenta os valores médios para a condutividade térmica das telhas de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. Não foram observadas interações estatísticas significativas entre a utilização de RMF e os tipos de reforços para ambos os períodos de cura. Contudo, considerando os reforços, houve diferenciação estatística apenas aos 28 dias de cura. Enquanto para a substituição dos componentes de matriz por RMF foi observado diferenciação estatística tanto aos 28 dias de cura quanto após o envelhecimento acelerado.

Figura 13 - Condutividade térmica para telhas de concreto.



Legenda: (A) Aos 28 dias de cura considerando o efeito dos reforços; (B) Após envelhecimento acelerado considerando o efeito dos reforços; (C) Aos 28 dias de cura considerando o efeito do RMF; (D) Após envelhecimento acelerado considerando o efeito do RMF. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Considerando o efeito dos reforços, aos 28 dias de cura, a formulação com resíduo de *Pinus* apresenta uma redução da condutividade térmica em relação ao controle (Sem reforço). Esse fato é devido a um aumento do teor de vazios em 22,6% (Figura 10) em relação ao tratamento controle e isso acarretou numa diminuição de 9,55 % da condutividade térmica. Contudo, após o envelhecimento acelerado, não houve diferença estatística entre os tratamentos avaliados. Apesar de apresentarem maior valor de condutividade térmica devido à uma maior densificação da matriz com redução da porosidade (Tabela 4). Callejas *et al.* (2023) observaram diminuição da condutividade térmica de telhas de concreto ao ser adicionado PET à formulação ensaiada aos 28 dia de cura, obtendo valores de 1,556 W/m.°C para o tratamento controle e de 1,401 W/m.°C para as telhas reforçadas com PET.

Considerando o efeito do RMF na matriz, aos 28 dias de cura com a adição de RMF houve um aumento da condutividade térmica dos compósitos, mesmo apresentando maior porosidade. Esse efeito é devido à presença da Hematita no RMF, conforme análise de DRX apresentada na Figura 19. A Hematita tem o valor de condutividade térmica de 11.3 W/m.°C (Mendes *et al.*, 2019), além da composição química do RMF que apresenta 10,86 % de ferro. Isso contribui para o aumento da condutividade térmica em compósitos onde são empregados

RMF na formulação (Eugenio *et al.*, 2023a). Após o envelhecimento acelerado esse efeito não ficou evidente. Na substituição de 10% de cimento por RMF, Eugenio *et al.* (2023a) obteve valores de condutividade térmica para telhas de concreto de 0,52 W/m.°C. Em outro estudo, para substituição do PPC obteve valores de 0,61 W/m.°C (Eugenio *et al.*, 2021).

A norma NBR 15220-2 (ABNT, 2022) estipula como referência a condutividade térmica de alguns materiais de construção. A telha cerâmica tem como referência o valor de 1,05 W/(m.°C) para telhas com densidade entre 1,8 g/cm³ e 2,0 g/cm³. Considerando esse valor, todas as telhas de concreto apresentam valores abaixo dos limites de referência estipulados pela norma.

3.4.5 Desempenho acústico das telhas de concreto.

A Tabela 11 apresenta os valores médios para a barreira acústica das telhas de concreto aos 28 dias de cura, onde foi observada interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços. Na Figura 14 pode-se observar os valores médios para barreira acústica das telhas de concreto após envelhecimento acelerado. Não houve interação estatística significativa entre a utilização de RMF e os tipos de reforços para os compósitos após o envelhecimento. Ao analisar a utilização do RMF e os tipos de reforços de forma separada, foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre a barreira acústica das telhas de concreto.

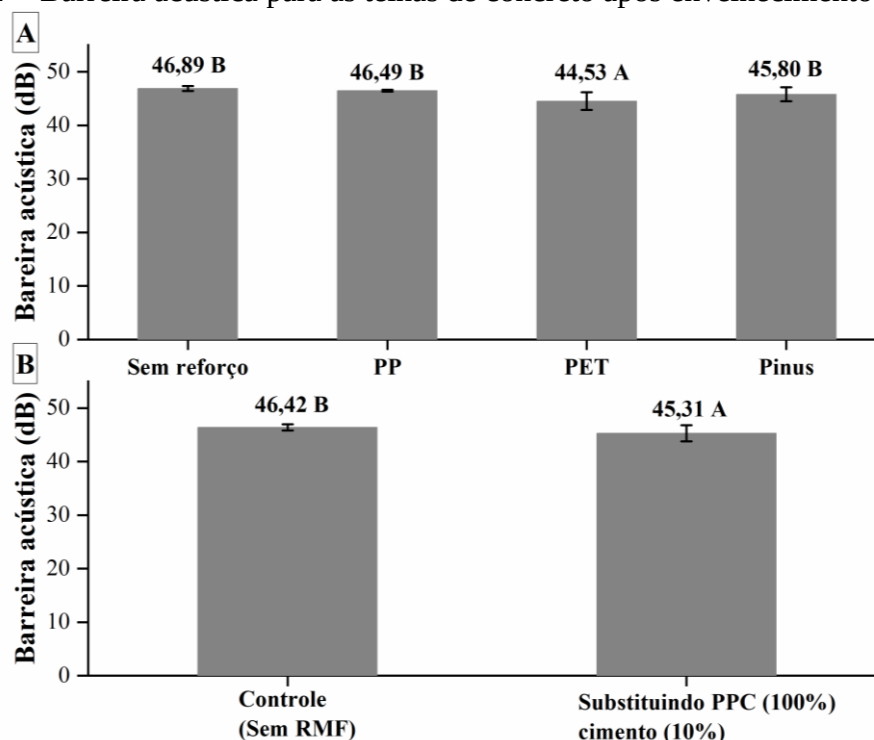
Tabela 11 – Barreira acústica aos 28 dias de cura (dB).

Reforço inserido	Substituição por resíduo de minério de ferro	
	0%	100% pó de pedra / 10 % do cimento
Sem reforço	43,92(0,36) Aa	42,58(1,64) Aa
PP	46,94(0,88) Bb	40,75(0,31) Aa
PET	45,56(0,70) Bb	42,13(0,99) Aa
<i>Pinus</i>	43,70(1,06) Aa	44,35(1,06) Ba

Diferentes letras maiúsculas demonstram diferença estatística dos tratamentos na linha e diferentes letras minúsculas demonstram a diferença estatística dos tratamentos na coluna.

Fonte: Do autor (2025).

Figura 14 - Barreira acústica para as telhas de concreto após envelhecimento acelerado.



Legenda: (A) Barreira acústica considerando o efeito dos reforços; (B) Barreira acústica considerando o efeito do RMF. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2025).

Para os tratamentos aos 28 dias de cura, ao analisar o efeito da adição de RMF para cada tipo de reforço verificou-se que para as telhas sem reforço e reforçadas com Pinus não existem diferenças significativas com a adição ou não de RMF. Para os reforços de PP e PET existem diferenças significativas, apresentando menores valores para a barreira acústica com o uso do RMF. Esse feito pode estar associado ao aumento da densidade dos compósitos (Tabela 7). O aumento da densidade pode levar à compactação do material, reduzindo o volume de poros. Tanto o tamanho quanto o tipo e a configuração dos poros em um compósito influenciam significativamente em seu desempenho acústico (Tao *et al.*, 2021).

Já para a análise do tipo de reforço com o uso de RMF e considerando as telhas sem RMF, os reforços com PP e PET apresentaram variação estatística com os maiores valores de barreira acústica. A inserção dos reforços de PP e PET na matriz tendem a aumentar os vazios na matriz. Nesse caso, como não há influência do RMF para melhorar a densificação da matriz, os poros formados refletem a energia sonora em suas paredes vindo a atenuar a transmissão sonora. Já para o uso de RMF, o reforço com Pinus apresentou variação estatística com o maior valor de barreira acústica. Esse fato pode estar relacionado à baixa densidade e estrutura porosa natural, o que permite a absorção e dissipação da energia sonora (Kalauni;

Pawar, 2019).

Para os tratamentos após envelhecimento acelerado e analisando o comportamento dos reforços, verificou-se que as telhas reforçadas com PET apresentaram diferenciação estatística com o menor valor de barreira acústica. A maior densidade do PP ($1,35 \text{ g/cm}^3$) dentre os reforços aplicados nos compósitos pode vir a densificar mais a matriz, contribuindo com a redução do isolamento acústico. Também para os tratamentos onde se avaliou o efeito da barreira acústica com a aplicação de RMF, aqueles com RMF apresentaram o menor valor de barreira acústica. O RMF, principalmente substituindo o PPC devido à maior diferenciação granulométrica (Tabela 6), densifica mais a matriz e reduz o tamanho e forma de fechamento dos poros, vindo a contribuir para uma menor dissipação da energia sonora e consequentemente perda da capacidade de isolamento acústico (Fediuk *et al.*, 2021).

Em estudo conduzido sobre barreiras acústicas em compósitos cimentícios reforçados com fibras de palmeira, observou-se que mesmo em formulações com maior absorção de água e, consequentemente, maior quantidade de poros foi observada menor capacidade de isolamento acústico (Lahouioui, 2020).

3.5 Viabilidade econômica

A análise econômica das telhas foi conduzida com base nos custos das matérias-primas utilizadas na fabricação de telhas de concreto em uma indústria localizada em Candeias, Minas Gerais, Brasil. O estudo focou nos custos do Cimento Portland CPV-ARI e do PPC, que foram os componentes cujas proporções variaram nas formulações. Outros custos de produção, como mão de obra, energia, depreciação e insumos, foram mantidos constantes, já que não foram impactados pelas mudanças nas formulações testadas. A análise econômica considerou uma produção mensal de 60.000 telhas, que representa a capacidade produtiva da empresa, conforme descrito por Eugenio *et al.* (2021) em estudo sobre a produção de telhas de concreto nessa fábrica. Além disso, foi examinado o impacto econômico da adição de reforços na matriz cimentícia.

Este trabalho avalia o consumo de materiais e os custos associados à produção de telhas de concreto utilizando uma formulação padrão. A composição dessa formulação inclui 27,14% de cimento Portland, 60,86% de areia natural e 12,0% de PPC. As telhas produzidas no estudo apresentaram uma massa média de 4,32 kg, com uma produção mensal de 60 mil unidades. A partir dessas informações, o consumo mensal de cimento Portland foi calculado em 69,984 toneladas, enquanto o PPC teve um consumo de 31,104 toneladas. O custo por

tonelada de cimento Portland é de R\$ 446,57, e o PPC de R\$ 46,86 por tonelada. Com isso, o custo total do cimento para a produção de 60 mil telhas ao mês foi de R\$ 31.253,03, e o gasto com PPC totalizou R\$ 1.457,68.

O custo unitário de produção de cada telha de concreto foi de R\$ 2,43 (Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a), totalizando um custo mensal de R\$ 145.800,00. O cimento, que é um dos componentes principais, representa cerca de 21,40% do custo final, enquanto o PPC corresponde a aproximadamente 1,00%. A substituição desses materiais pelo RMF é sugerida como uma estratégia para reduzir os custos e minimizar o impacto ambiental, especialmente considerando o uso de rejeitos provenientes da mineração.

Destaca-se, para fins de análise, que o custo do RMF em si não será considerado, uma vez que esse resíduo é comumente descartado em barragens de contenção pelas empresas de mineração. No entanto, o custo de transporte do RMF da fonte geradora até a unidade produtora de telhas será incluído no cálculo.

O estudo analisa o cenário entre Brumadinho, Minas Gerais, Brasil — onde ocorreu o rompimento de uma barragem de rejeitos em 25 de janeiro de 2019 — e Candeias, também em Minas Gerais, onde está situada a unidade de produção de telhas. A distância entre as duas cidades é de cerca de 200 km, com um custo médio de transporte estimado em R\$ 55,00 por tonelada (Eugenio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2023a).

Na substituição de 10% do cimento por RMF, seriam consumidas mensalmente 6,99 toneladas de RMF, resultando em um custo de transporte de R\$ 384,45. O custo mensal atual com cimento na produção de 60.000 telhas de concreto é de R\$ 31.253,03. Com a substituição parcial de 10%, haveria uma economia de R\$ 3.125,30 nos custos de cimento. Considerando o custo do frete do RMF, essa substituição proporcionaria uma redução líquida de R\$ 2.740,85 por mês, o que resultaria em uma diminuição de 1,88% no custo total de produção mensal.

Por outro lado, na substituição total do PPC pelo RMF, o custo de transporte seria significativamente maior, alcançando R\$ 1.710,70 por mês. Esse valor supera o custo do PPC, que é de R\$ 1.457,68, uma vez que a empresa fornecedora de PPC está localizada a apenas 12 km da fábrica de telhas, com um custo de frete de apenas R\$ 107,00. Essa substituição resultaria em um aumento de R\$ 146,02 nos custos mensais de produção, representando apenas 0,1% do custo total. Ao se considerar a substituição simultânea desses dois componentes haveria uma redução do custo de R\$ 2594,83, representando uma diminuição de 1,77% no custo total de produção mensal.

A adoção de uma parceria entre a empresa geradora de RMF e a fábrica de telhas para compartilhamento do custo com o transporte do RMF vem a melhorar o desempenho do custo

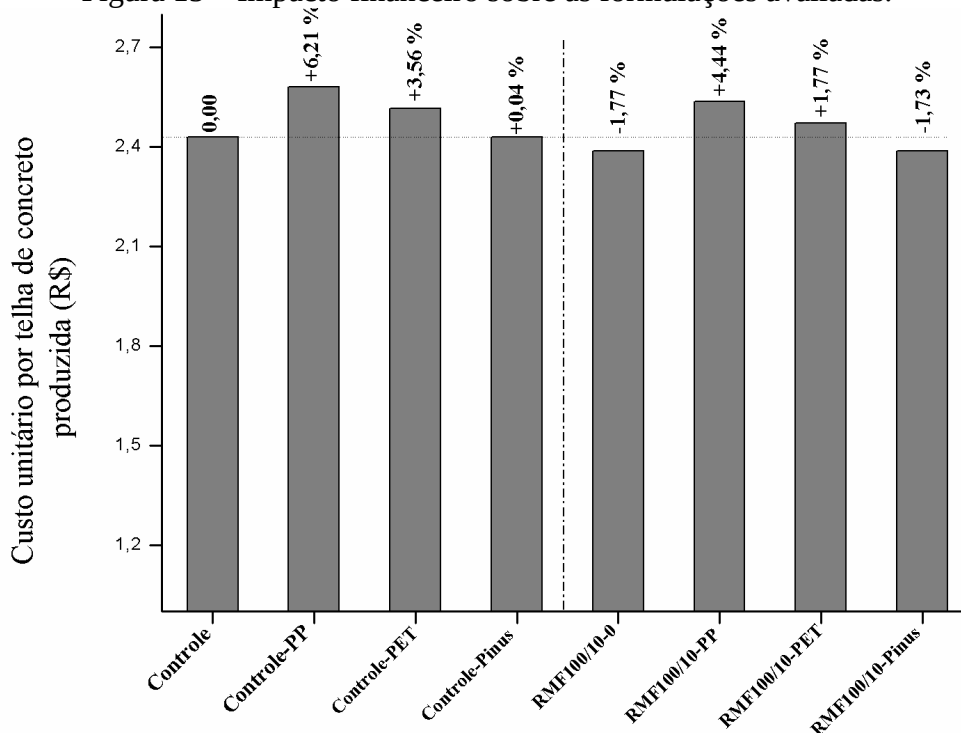
de produção, visto que também é de interesse da mineradora a destinação ecologicamente correta de seus resíduos minimizando os impactos ambientais e os custos de manutenção com as barragens de contenção (Eugenio *et al.*, 2023a; XU *et al.*, 2021). Ademais, ao instalar a produção das telhas nas proximidades da área de mineração, é viável reduzir significativamente as despesas logísticas, o que contribui para uma queda nos custos totais de produção.

De acordo com as formulações propostas, o reforço foi incorporado em uma proporção de 0,5% em relação à massa total da formulação. Para uma produção mensal de 60.000 telhas, a quantidade total de material processado corresponde a 259,2 toneladas, sendo que a massa dos reforços utilizados equivale a 1,296 toneladas. O custo do resíduo de *Pinus* não será considerado nesta análise, uma vez que o material seria descartado pela empresa geradora. No entanto, o custo do transporte do resíduo precisa ser incluído nos cálculos de produção. Considerando um cenário em que a coleta do resíduo será realizada em um raio máximo de 200 km, o custo de frete estimado é de R\$ 78,20. Esse valor representa uma pequena fração, aproximadamente 0,05%, no custo total de produção, que pode ser financiado pela empresa geradora do resíduo, visto que ela própria já é responsável pelo frete de descarte desse material.

O custo do PP reciclado é estimado em aproximadamente R\$ 7.000 por tonelada, o que resulta em um acréscimo de R\$ 9.072 no custo mensal da produção. Este valor corresponde a 6,22% do custo total de produção. Em contrapartida, o custo do PET reciclado é mais baixo, em torno de R\$ 4.000 por tonelada, o que implica um aumento de R\$ 5.184 no custo mensal, representando 3,55% do custo total.

A Figura 15 apresenta o impacto do custo unitário por telha produzida em cada uma das formulações avaliadas e seu comportamento em relação ao tratamento controle.

Figura 15 – Impacto financeiro sobre as formulações avaliadas.



Fonte: Do autor (2025).

A utilização do RMF mostrou-se vantajosa quando substitui o cimento e o PPC, resultando em uma redução significativa no custo de produção, dado o elevado preço do cimento. Entre os reforços analisados, os resíduos de PP e PET apresentaram o maior acréscimo no custo de produção. Esse aumento está associado não apenas aos elevados custos de coleta e processamento desses materiais, mas também à alta demanda no mercado de reciclagem. Por outro lado existe estudo que desconsidera o custo dos reforços termoplásticos utilizados na matriz cimentícia. Isso por serem incorporadas como material complementar, sendo utilizadas como resíduo não tratado, sem causar impacto no custo de produção (Xu *et al.*, 2021). Em contrapartida, o resíduo de *Pinus*, obtido como subproduto do processamento da madeira, teve o menor impacto financeiro nas formulações, tornando-se uma alternativa econômica viável.

Além das considerações econômicas, a incorporação de resíduos no processo produtivo de telhas de concreto apresenta importantes benefícios ambientais. A utilização desses materiais minimiza o descarte inadequado de resíduos e estimula o desenvolvimento da indústria de reciclagem, contribuindo para a sustentabilidade e para a redução dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil através da adoção de novas tecnologias de produção.

4 CONCLUSÃO

O estudo permitiu uma análise dos impactos da incorporação de RMF e diferentes tipos de resíduos poliméricos e lignocelulósicos como materiais de reforço nas telhas de concreto. A pesquisa avaliou como esses materiais influenciam as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade das telhas, além de investigar sua viabilidade econômica, fornecendo uma visão aprofundada do potencial desses recursos para a indústria da construção.

O uso do RMF na produção de telhas de concreto aumentou a absorção de água e a porosidade. A densidade e o peso seco diminuíram e ainda proporcionou um aumento de 14% na resistência à flexão após o envelhecimento. A condutividade térmica aumentou aos 28 dias de cura e diminuiu com o envelhecimento acelerado enquanto a barreira acústica sofreu uma redução antes e depois do envelhecimento. Além disso, proporcionou uma redução do custo de produção em 1,77% e as especificações previstas na norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009) foram atendidas.

Para todos os tipos de reforços utilizados foram atendidas as regulamentações previstas na norma ASTM C1492-3 (ASTM, 2009), tanto para as propriedades físicas quanto mecânicas das telhas de concreto em todas as etapas de cura. Destaque para o reforço com *Pinus*, o qual apresentou o melhor resultado ao ser empregado nas formulações com RMF, vindo a apresentar um aumento de 8,2% na resistência à flexão após envelhecimento acelerado, além de apresentar uma redução de custo de 1,73% em relação ao tratamento controle. Apesar de ter produzido um aumento da condutividade térmica em 9 %, o valor ficou abaixo do limite máximo de referência normativa. O PP apresentou o melhor resultado no ensaio de flexão quando não foi empregado RMF na formulação, seguido pelo PET. Contudo, esses reforços elevam o custo de produção, apesar de não influenciarem na condutividade térmica e melhorarem o isolamento acústico aos 28 dias de cura.

A utilização de resíduo de minério de ferro, poliméricos e lignocelulósicos na produção de telhas de concreto apresenta um potencial significativo para a construção civil, tanto em aspectos técnicos quanto ambientais. Ao integrar esses resíduos como insumos, é possível não apenas diminuir a quantidade de rejeitos destinados a aterros e barragens, mas também desenvolver produtos inovadores que contribuam para práticas mais sustentáveis.

5 AGRADecIMENTOS

Agradecimentos às entidades de fomento FAPEMIG - PQ-01237-21, CNPq - 305662/2021-1, FINEP e CAPES; à Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e ao Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. N. et al. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 818-823, 2022.
- AKINYEMI, B. A.; ADESINA, A. Utilization of polymer chemical admixtures for surface treatment and modification of cellulose fibres in cement-based composites: a review. **Cellulose**, v. 28, n. 3, p. 1241-1266, 2021. - > disparidade de idades.
- ALABDULJABBAR, H. et al. Engineering properties of waste sawdust-based lightweight alkali-activated concrete: experimental assessment and numerical prediction. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5490, 2020.
- ALHASSAN, A. et al. Iron Ore Tailings as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete Production–Review. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 12, n. 4, p. 64-71, 2022.
- AL-KASEASBEH, Q.; AL-QARALLEH, M. Valorization of hydrophobic wood waste in concrete mixtures: Investigating the micro and macro relations. **Results in Engineering**, v. 17, p. 100877, 2023.
- ALSABRI, A.; TAHIR, F.; AL-GHAMDI, S. G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 2245-2251, 2022.
- AL-SAFFAR, F. Y.; WONG, L. S.; PAUL, S. C. An elucidative review of the nanomaterial effect on the durability and calcium-silicate-hydrate (CSH) gel development of concrete. **Gels**, v. 9, n. 8, p. 613, 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1492-03**: Standard Specification for Concrete Roof Tiles, 2009. West Conshohocken, 2001. 2 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618-19**: Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 948-81**: Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, 2001. 2 p.
- ASSIS, D. M.; QUEIROGA, F. O. C. S.; MENDES, J. C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços. **A Rev. Científ. FaSaR**, v. 3, p. 191-200, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro, 6 p. julho, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13858-2**: Telha de concreto – Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 32 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 4 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 3 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacitância térmica, da resistência térmica e da absorptância térmica. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4 p. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 8 p. dez, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica em madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 6 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6 p. jul, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6 p. jul, 2019.

ATYIA, M. M.; MAHDY, M. G.; ABD ELRAHMAN, M. Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124655, 2021.

BANERJEE, J. et al. Carbon nanotubes interaction with amorphous and semi-crystalline domains of polypropylene in melt mixed composites: Influence of multiwall carbon nanotubes agglomerate and their modifications. **SPE Polymers**, v. 2, n. 4, p. 257-275, 2021.

BARROS, A. B. S. et al. The effect of ZnO on the failure of PET by environmental stress cracking. **Materials**, v. 13, n. 12, p. 2844, 2020.

BENCHAA, S. et al. Structural characterizations of dune sand and construction sand of Sidi Slimane and Zaouia El Abidia areas in the Touggourt region in southeast Algeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 1-11, 2021.

BESSA, S. A. L. et al. Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, p. e13175, 2022.

BESSA, S. et al. Characterization and Analysis of Iron Ore Tailings Sediments and Their Possible Applications in Earthen Construction. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 362, 2024.

BRODA, M. et al. Effects of biological and chemical degradation on the properties of scots pine wood—part I: chemical composition and microstructure of the cell wall. **Materials**, v. 15, n. 7, p. 2348, 2022.

BRODA, M.; POPESCU, C. M. Natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes—An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 209, p. 280-287, 2019.

BURDUHOS NERGIS, D. D. et al. XRD and TG-DTA study of new alkali activated materials based on fly ash with sand and glass powder. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 343, 2020.

BZENI, D. K. Investigating the Influence of Fiber Content and Geometry on the Flexural Response of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 9, p. 347, 2024.

CALLEJAS, I. J. A. et al. Desempenho térmico de telhas cimentícias com incorporação de resíduo PET. **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 17, p. 1-8, 2023.

CARRASCO, E. V. M. et al. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31-38, 2017.

CONSOLI, N. C. et al. Behaviour of compacted filtered iron ore tailings–Portland cement blends: New Brazilian trend for tailings disposal by stacking. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 836, 2022.

CULTRONE, G. et al. Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117436, 2020.

DA SILVA, L. S. C. et al. Dispersion of tailings in the Paraopeba River system after Brumadinho dam failure: Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 83, n. 4, p. 128, 2024

DE KLERK, M. D. et al. Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 117835, 2020.

DE MAGALHAES, L. F. et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of cleaner production**, v. 274, p. 123260, 2020.

EIOGU, I. K.; IBENEME, U.; AIYEJAGBARA, O. M. Identification of polyethylene terephthalate (PET) polymer using X-ray diffractogram method: part 1. **NANO**, v. 8, p. 58-62, 2020.

EUGENIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of partial replacement of cement with IOT in extruded concrete roof tiles production. **Construction and Building Materials**, v. 393, p. 132129, 2023.

EUGENIO, T. M. C. et al. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, 2021

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

FATIMA ZOHRA, B.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. L. Effect of pre-treatments and additives on the improvement of cement wood composite: A review. **BioResources**, v. 15, n. 3, p. 7288-7308, 2020.

FEDIUK, R. et al. Acoustic properties of innovative concretes: A review. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 398, 2021

FUNDA, T. et al. Predicting the chemical composition of juvenile and mature woods in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using FTIR spectroscopy. **Wood Science and Technology**, v. 54, p. 289-311, 2020

GARCÍA-IRUELA, A. et al. Changes in cell wall components and hygroscopic properties of *Pinus radiata* caused by heat treatment. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, p. 851-861, 2021.

HAMADA, H. M. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 40, p. e00877, 2024.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. 1984.

KALAUNI, K.; PAWAR, S. J. A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. **Journal of Porous Materials**, v. 26, n. 6, p. 1795-1819, 2019.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. **Chichester: E.Horwood**, 1130 p. 1987.

KERNI, L. et al. A review on natural fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 1616-1621, 2020.

KOCHOVA, K. et al. Investigation of local degradation in wood stands and its effect on cement wood composites. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117201, 2020.

LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. M.. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista brasileira de saúde ocupacional**, v. 42, p. e9, 2017.

LAHOUIOUI, M. et al. Investigation of fiber surface treatment effect on thermal, mechanical and acoustical properties of date palm fiber-reinforced cementitious composites. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, p. 4441-4455, 2020.

LI, L. et al. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120853, 2020.

LI, R. et al. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. **Construction and building materials**, v. 213, p. 43-50, 2019.

LUOSTARINEN, K.; HAKKARAINEN, K. Chemical composition of wood and its connection with wood anatomy in *Betula pubescens*. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 7, p. 577-584, 2019.

MARQUES, M. L. et al. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 466-472, 2016.

MARVILA, M. T. et al. Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, p. 1-24, 2021.

MENG, T. et al. Comparative study on mechanisms for improving mechanical properties and microstructure of cement paste modified by different types of nanomaterials. **Nanotechnology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 370-384, 2021.

MOHAMMED, A. A.; KARIM, S. H. Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106195, 2023.

MOHAMMED, A. A.; RAHIM, A. A. F. Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118350, 2020.

MOHAN, H. T.; JAYANARAYANAN, K.; MINI, K. M. Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121520, 2021.

MORAIS, C. F. et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121073, 2021.

NARCISO, C. R. P. et al. Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 54, p. 115381-115395, 2023.

NIU, Y. et al. Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under bending by digital image correlation technique. **Cement and Concrete Research**, v. 125, p. 105821, 2019.

OKINO, E. Y. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004.

OLADIMEJI, T. E. et al. Production of activated carbon from sawdust and its efficiency in the treatment of sewage water. *Heliyon*, v. 7, n. 1, 2021.

OROZCO, C. et al. Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 39, p. e00796, 2024.

PEREIRA, T. G. T. et al. Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, p. S309-S314, 2020.

PORTO, M. F. S. A tragédia da mineração e do desenvolvimento no Brasil: desafios para a saúdecoletivaThe tragedy of mining and development in Brazil: public health challenges La tragedia de la minería y eldesarrolloenBrasil. **Cad. Saúde Pública**, v. 32, n. 2, p. e00211015, 2016.

PROTASIO, F. N. M. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123929, 2021.

SAELI, M. et al. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116643, 2019.

SAGATOV, B. Study on reinforced concrete elements of buildings and structures with cracks, reinforced with composite polymer materials. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2023. p. 012043.

SANTOS, A. et al. Mechanical and thermal properties of geopolymers derived from metakaolin with iron mine waste. **Applied Clay Science**, v. 258, p. 107452, 2024.

SAU, D.; SHIULY, A.; HAZRA, T. Utilization of plastic waste as replacement of natural aggregates in sustainable concrete: Effects on mechanical and durability properties. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 2, p. 2085-2120, 2024.

SHAHPARI, M. et al. Synergetic effects of hybrid nano-blended cement on mechanical properties of conventional concrete: Experimental and analytical evaluation. In: **Structures**. Elsevier, 2023. p. 1519-1536.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.

SILVA, M. S. L. et al. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 6, p. 314-320, 2002.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 2019.

SOSOI, G. et al. Experimental investigation on mechanical and thermal properties of concrete using waste materials as an aggregate substitution. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1728, 2022.

STRIDE, B. et al. Quantifying microplastic dispersion due to density effects. *Journal of Hazardous Materials*, v. 466, p. 133440, 2024.

TAO, Y. et al. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies—A review. **Applied Materials Today**, v. 24, p. 101141, 2021.

TEIXEIRA, J. N. et al. Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 2193-2200, 2020.

TEJASWINI, M. S. S. R.; PATHAK, P.; GUPTA, D. K. Sustainable approach for valorization of solid wastes as a secondary resource through urban mining. **Journal of environmental management**, v. 319, p. 115727, 2022.

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, N. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00973, 2022.

TKACHENKO, N. et al. Global database of cement production assets and upstream suppliers. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 696, 2023.

TUN, T. Z.; BONNET, S.; GHEEWALA, S. H. Emission reduction pathways for a sustainable cement industry in Myanmar. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 449-461, 2021.

VIANA, Q. S. et al. Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 32, p. 48964-48974, 2022.

VILELA, A. P. et al. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.

VON GREVE-DIERFELD, S. et al. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 6, p. 136, 2020.

WERNKE, R. *Análise de Custos e Preços de Venda: ênfase em aplicações e casos nacionais*. 2. ed. São Paulo: **Saraiva Educação**, v. 1, 2015, 234 p.

XING, W. et al. Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 317, p. 125950, 2022.

XU, D. et al. The influence of curing regimes on hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, p. 107401, 2023.

XU, F. et al. Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101572, 2021.

XU, W., ZHANG, Y., LIU, B. Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119305, 2020.

YAO, G. et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863-871, 2020.

ZACCONE, M. et al. Effect of injection molding conditions on crystalline structure and electrical resistivity of PP/MWCNT nanocomposites. **Polymers**, v. 12, n. 8, p. 1685, 2020.

ZHANG, C. et al. Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. **Waste Management**, v. 155, p. 311-319, 2023.

ZHANG, L.; GAN, M.; XUE, Q. Induced by CO₂ Carbonation. **Transport Perspectives for Porous Medium Applications**, p. 79, 2024.

ZHU, J. et al. Surfactant-free synthesized magnetic polypropylene nanocomposites: rheological, electrical, magnetic, and thermal properties. **Macromolecules**, v. 44, n. 11, p. 4382-4391, 2011.