

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL

NISIELY GRELLMANN PACHECO

**DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SUSTENTÁVEL DE COMPÓSITO DE  
RESÍDUO POLIMÉRICO – UM FOCO NA ECONOMIA CIRCULAR**

Farroupilha

2025

NISIELY GRELLMANN PACHECO

**DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SUSTENTÁVEL DE COMPÓSITO DE  
RESÍDUO POLIMÉRICO – UM FOCO NA ECONOMIA CIRCULAR**

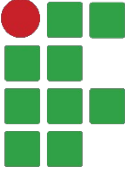

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de  
Mestre em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais  
Linha de Pesquisa: Tecnologia da transformação de materiais

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti

FARROUPILHA

2025

	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.	
	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais.	

Dissertação intitulada 'DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SUSTENTÁVEL DE COMPÓSITO DE RESÍDUO POLIMÉRICO – UM FOCO NA ECONOMIA CIRCULAR', de autoria de 'Nisiely Grellmann Pacheco', aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Ana Maria Coulon Grisa  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Profa. Dra. Daniela Lupinacci Villanova  
IFRS Campus Farroupilha

---

Dra. Laura de Andrade Souza  
IFRS Campus Farroupilha

---

Profa. Dra. Mara Zeni Andrade  
Suplente

---

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti  
IFRS Campus Farroupilha

---

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer  
Coordenadora do PPG-TEM

Data de apresentação: Maio de 2025

## CIP - Catalogação na publicação

Pacheco, Nisiely Grellmann

Desenvolvimento de tijolo sustentável de compósito de resíduo polimérico: um foco na economia circular / Nisiely Grellmann Pacheco. -- 2025.

92 f.

Orientador: Edson Luiz Francisquetti.

Dissertação (Mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais - PPGTEM, Farroupilha, BR-RS, 2025.

1. Resíduo Plástico. 2. Compósito polimérico. 3. Tijolo sustentável. I. Francisquetti, Edson Luiz. II. Título.

## DEDICATÓRIA

Aos meus filhos, Arthur, Nicolas e Melinda, por serem minha inspiração e o motivo da minha persistência.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti, pela orientação, confiança, paciência, ensinamentos e auxílio nas análises de TGA, MEV e FTIR.

Ao IFRS, aos técnicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Reitoria e Campus Farroupilha;

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para execução deste trabalho.

## RESUMO

Os polímeros modernos são materiais multifacetados e indispensáveis ao desenvolvimento humano, devido à sua versatilidade, resistência e baixo custo. Contudo, o descarte inadequado de resíduos plásticos pós-consumo, em virtude da limitada reciclagem e gestão deficiente, gera poluição ambiental global, impactando a saúde humana. Diante da crescente demanda material e da finitude de recursos naturais não renováveis, faz-se imperativo o desenvolvimento de materiais sustentáveis, especialmente na construção civil. A aplicação de resíduos plásticos como material de construção emerge como uma solução para reinserção produtiva, alinhada à economia circular e ao desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Este estudo desenvolveu um tijolo sustentável a partir de um compósito inovador, cuja matriz aglutinante é formada por uma mistura heterogênea de resíduos poliméricos pós-consumo (PE, PP, entre outros) e areia de rio como carga. Uma característica central do processo é a tolerância a contaminantes minoritários e a ausência de uma dosagem específica dos tipos de polímero, visando ao aproveitamento de um fluxo de resíduo mais realista para a indústria.

Os materiais foram processados em misturador intensivo, seguidos por fusão, moldagem e desmoldagem. Corpos de prova foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas tais como resistência à compressão, absorção de água e dureza. Análises complementares incluíram espectroscopia no infravermelho, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os tijolos confeccionados a partir do compósito polímero-cerâmico exibiram desempenho satisfatório nos parâmetros avaliados, indicando seu potencial como material alternativo e inovador, capaz de promover a sustentabilidade, reduzir o impacto ambiental e fortalecer a economia circular.

**Palavras-chave:** resíduo plástico, tijolo sustentável, sustentabilidade, compósito polimérico e economia circular.

## **ABSTRACT**

Modern polymers are multifaceted materials indispensable to human development due to their versatility, resistance, and low cost. However, the inadequate disposal of post-consumer plastic waste, owing to limited recycling and inefficient management, generates global environmental pollution, impacting human health. Given the growing material demand and the finite nature of non-renewable natural resources, the development of sustainable materials becomes imperative, especially in civil construction. The application of plastic waste as a construction material emerges as a solution for productive reinsertion, aligned with the circular economy and sustainable socioeconomic development.

This study reports the development of a sustainable brick from an innovative composite, wherein the binder matrix is formed by a heterogeneous blend of post-consumer polymeric waste (predominantly PE and PP), with river sand serving as a filler. A central feature of this process is its tolerance to minor contaminants and the lack of a requirement for specific polymer sorting or dosing, thereby enabling the utilization of a more industrially realistic waste stream.

The fabrication methodology encompassed intensive mixing of the constituent materials, followed by a sequence of melting, molding, and subsequent demolding. Test specimens were characterized for their mechanical properties such as compressive strength, water absorption, and hardness. Complementary analyses included infrared spectroscopy, thermogravimetry, and scanning electron microscopy (SEM). The bricks fabricated from the polymer-ceramic composite displayed satisfactory performance in the evaluated parameters, indicating their potential as an alternative and innovative material capable of promoting sustainability, reducing environmental impact, and strengthening the circular economy.

Keywords: plastic waste, sustainable brick, sustainability in construction, polymer composite and circular economy..

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Termoplásticos mais utilizados na construção civil.....	18
Figura 2: Ciclo dos polímeros: da produção à reciclagem, incluindo a disposição inadequada.....	20
Figura 3: Resíduos plásticos em aterro na ilha artificial de Thilafushi, nas Maldivas.	21
Figura 4: Processo industrial de reciclagem do resíduo polimérico pós consumo.....	22
Figura 5: Projeção da produção de RPs, por região global, ao longo do tempo.....	22
Figura 6: Ciclo dos polímeros inseridos na economia.....	23
Figura 7: Morfologia das partículas conforme desgaste: angulares (esquerda), polimórficas (meio) e esféricas (direita).....	27
Figura 8: Composição interna do compósito: matriz, reforço e interface.....	29
Figura 9: Quantidade e proporção de vazios na matriz polimérica em função do: a)tamanho e b)proporção das partículas.....	32
Figura 10: Termoplásticos aplicados para oito setores industriais,.....	36
Figura 11: Resíduos poliméricos (RPs) utilizados.....	38
Figura 12: Caracterização dimensional de alguns RPs utilizados.....	39
Figura 13: Areia fluvial fina para construção.....	39
Figura 14: Ensaio granulométrico: A (agitador), B (peneiras).....	41
Figura 15: Materiais pesados em balança de precisão: areia (A) e RP (B).....	44
Figura 16: Materiais utilizados nos tijolos: A (areia), B (RP) e C (mistura).....	45
Figura 17: Misturador intensivo tipo Driser.....	45
Figura 18: Peças fundidas e moldadas em molde de madeira.....	46
Figura 19: Durômetro Harteprufer.....	47
Figura 20: Estufa utilizada para os corpos de prova.....	50
Figura 21: Ensaio de absorção de água com tijolos imersos por 24 horas.....	51
Figura 22: Máquina de Ensaio Universal (EMIC 20000).....	52
Figura 23: Equipamento Perkin Elmer Frontier.....	53
Figura 24: Equipamento Perkin Elmer TGA 4000.....	54
Figura 25: Curva de distribuição granulométrica da areia.....	56
Figura 26: Espectro infravermelho da areia de referência utilizada.....	57
Figura 27: Espectro infravermelho do resíduo polimérico de referência.....	59
Figura 28: Imagem dos tijolos compósito (acima) em comparação com rocha basalto (abaixo).....	60

Figura 29: Dureza do tijolo em função da proporção dos materiais.....	61
Figura 30: Curva da densidade do tijolo em função da proporção dos materiais.....	63
Figura 31: Determinação do índice de absorção de água dos tijolos em função da composição.....	65
Figura 32: Compósito sendo testado à compressão.....	67
Figura 33: Resistência à compressão em função da proporção de RPs e areia.....	68
Figura 34: Relação tensão deformação dos corpos de prova do compósito (1:1) demonstrando seu comportamento viscoelástico.....	72
Figura 35: Comportamento das estruturas: A) Distribuição das tensões; B) Deformação dúctil, frente às adversidades e C) Estrutura rígida e ruptura abrupta..	73
Figura 36: Espectros infravermelhos da areia, dos (RPs) e dos compósitos, em todas as porcentagens testadas.....	74
Figura 37: Curva TG e sua derivada, para a amostra do tijolo 100% de resíduo polimérico 1:0.....	75
Figura 38: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia na proporção 1:1.....	76
Figura 39: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia, na proporção 1:2....	76
Figura 40: Curva TG e sua derivada, do compósito RP o e areia na proporção 1:3..	77
Figura 41: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia na proporção 1:4.....	77
Figura 42: Micrografia de fratura, dos resíduos poliméricos fundidos (A0) e de seus compósitos (A1;A2;A3 e A4) ampliados 150 X.....	79
Figura 43: Micrografia de fratura do tijolo de resíduos plásticos ampliado 5000X.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Taxa de permeabilidade de gases de polímeros.....	33
Tabela 2: Trabalhos desenvolvidos sobre compósitos de RPs.....	35
Tabela 3: Proporções usadas em estudos que resultaram na melhor resistência à compressão.....	43
Tabela 4: Identificação e formulação das misturas dos compósitos testados.....	43
Tabela 5: Requisitos a serem verificados para tijolo cerâmico não estrutural.....	49
Tabela 6: Requisitos a serem verificados para tijolo cerâmico estrutural.....	49
Tabela 7: Porcentagem de grãos de areia passantes em cada peneira.....	55
Tabela 8: Dados levantados com o durômetro nos tijolos de acordo com a composição .....	62
Tabela 9: Resistência à compressão dos compósitos, em função da proporção de areia.....	68
Tabela 10: Resultados da análise termogravimétrica dos compósitos.....	78

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	RESÍDUOS POLIMÉRICOS.....	17
2.1.1	Polímeros termoplásticos.....	17
2.1.1.1	Polietileno.....	19
2.1.1.2	Polipropileno.....	19
2.1.2	Geração dos Polímeros e seus Resíduos.....	20
2.1.3	Gestão de RPs: Desafios e Perspectivas para a Economia Circular.....	21
2.1.4	Processo de Extrusão por Fricção para Reciclagem de Polímeros.....	24
2.2	OS TIJOLOS E SEUS MATERIAIS.....	24
2.2.1	Tijolo cerâmicos.....	24
2.2.2	Blocos de concreto.....	25
2.3	A AREIA: O AGREGADO DE REFORÇO.....	25
2.3.1	A Influência da morfologia da areia como reforço.....	26
2.4	COMPÓSITOS E SUAS PARTICULARIDADES.....	27
2.4.1	Compósito reforçado com partículas grandes.....	28
2.4.2	Empacotamento das partículas de reforço.....	30
2.4.3	Influência da proporção do reforço nas propriedades mecânicas do compósito.....	31
2.4.4	Permeabilidade e absorção da matriz.....	32
2.5	COMPÓSITO POLÍMERO CERÂMICO DE RPS E AREIA: EVIDÊNCIAS CIENTÍFICAS.....	34
2.6	O COMPÓSITO DE RPS COMO SOLUÇÃO ESTRATÉGICA NA ECONOMIA CIRCULAR.....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1	MATERIAIS.....	38
3.1.1	Resíduo polimérico:.....	38
3.1.2	Areia fina.....	39
3.2	METODOLOGIA.....	40

3.2.1	Caracterização dos Resíduos Plásticos.....	40
3.2.2	Caracterização da areia.....	40
3.2.3	Formulação e preparação dos corpos de prova.....	42
3.2.4	Caracterização dos corpos de prova.....	46
3.2.4.1	Teste da dureza dos corpos de prova.....	46
3.2.4.2	Teste de densidade dos corpos de prova.....	47
3.2.4.3	Teste de absorção de água dos corpos de prova.....	48
3.2.4.4	Teste de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova.....	51
3.2.4.5	Espectroscopia de infravermelho dos corpos de prova.....	53
3.2.4.6	Termogravimetria (TGA) dos corpos de prova.....	53
3.2.4.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova.....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
4.1	AREIA .....	55
4.2	RESÍDUOS POLIMÉRICOS.....	57
4.3	TIJOLO COMPÓSITO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS E AREIA (RP/A).....	59
4.3.1	Dureza dos tijolos RP/A.....	61
4.3.2	Densidade dos tijolos RP/A.....	63
4.3.3	Absorção de água dos tijolos RP/A.....	64
4.3.4	Resistência mecânica à compressão dos tijolos RP/A.....	66
4.3.4.1	Resistência máxima teórica $f(x)$ em função da proporção de areia.....	70
4.3.4.2	Relação tensão deformação dos tijolos RP/A.....	71
4.3.5	Espectroscopia de infravermelho dos tijolos RP/A.....	73
4.3.6	Termogravimetria (TGA) dos tijolos RP/A.....	74
4.3.7	Morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	78
4.3.8	Desempenho dos tijolos RP/A em função dos requisitos de norma.....	80
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>PREVISÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A importância dos materiais poliméricos na sociedade moderna é inquestionável, trazendo benefícios associados à sua versatilidade e baixo custo (BOURGUIGNON, 2018 e VOET et al., 2021). Contudo, a gestão inadequada e o descarte incorreto desses resíduos são as causas primárias de uma crise de poluição que exige estratégias de mitigação urgentes (BUCKNALL, 2020 e GEYER, 2021) uma vez que os métodos atuais são insuficientes para lidar com o montante de toda a gama de resíduos plásticos gerados (POTTINGER et al, 2024).

Em um levantamento bastante abrangente sobre o tema, Geyer, Jambeck e Law (2017) estimaram que, de todo o lixo plástico já gerado pela humanidade, apenas 9% foi efetivamente reciclado, enquanto 79% foi acumulado no ambiente ou aterros.

Projeções indicam que os fluxos anuais de resíduos plásticos no ambiente podem triplicar até 2040, com um crescimento exponencial previsto em regiões da Ásia e África até 2060 (GOUNDEN; MWANGI; MOHAN, 2022 e OECD, 2022).

Simultaneamente, o setor da construção civil, embora essencial para a economia, é o maior consumidor de matérias-primas do planeta. Seus materiais convencionais mais importantes, o tijolo cerâmico e o concreto, possuem impactos ambientais significativos.

A produção cerâmica envolve a extração de argila e processos de queima que geram poluição atmosférica, enquanto a indústria cimenteira é uma das maiores fontes antropogênicas de CO<sub>2</sub>, com emissões anuais que chegam a 2,1 mil milhões de toneladas (AWOYERA; ADESINA, 2020; HAKIR; MOHAMMED, 2013; LIMA; GUTJAHR; PONTES, 2021 e CHAUDHURY; SHARMA, 2023).

O cimento Portland é sem dúvida um dos principais aglutinantes da construção moderna (ROY et al., 2025). Porém, a extração de recursos naturais, acarreta impactos ambientais significativos, incluindo a alteração da paisagem e a degradação de recursos hídricos. Assim, a busca por materiais alternativos que reduzam a dependência de matérias-primas virgens é um campo de pesquisa fundamental e promissor (WU et al., 2025 e XANTHOS; WALKER, 2017).

Diante da necessidade de garantir infraestrutura para uma população crescente, de forma sustentável, a economia circular surge como um paradigma indispensável. Este modelo propõe sistemas restaurativos e regenerativos, nos quais os resíduos são reintegrados à cadeia produtiva como recursos valiosos, eliminando a poluição e permitindo

a regeneração dos sistemas naturais, através da aplicação desses resíduos em produtos de longa vida útil (ZEIFMAN et al., 2022; CIMEN, 2021; REDDY et al., 2020 e ISWA, 2022).

O desenvolvimento de materiais compósitos a partir de resíduos industriais e urbanos constitui uma área de pesquisa estratégica para a sustentabilidade na engenharia civil. Dentre as soluções emergentes, os compósitos de matriz polimérica reforçados com cargas minerais, como a areia, têm recebido atenção por seu potencial de aliar a valorização de resíduos plásticos à produção de materiais de construção de baixo impacto ambiental (YADAV et al., 2024).

Mesmo assim, verifica-se escassez de estudos que proponham formulações otimizadas, utilizando métodos realmente replicáveis e de baixo custo.

As pesquisas apontam o uso de resíduos poliméricos (RPs) pré separados e devidamente higienizados, o que envolve custos e impacto ambiental. Neste contexto, este trabalho difere pois, investiga a possibilidade da aplicação de resíduos poliméricos (RPs) mistos como matéria-prima, sem lavagem prévia, para a obtenção de um compósito com areia, que apresente bom desempenho estrutural e menor impacto ambiental.

Para isso o compósito será avaliado e comparado com os parâmetros requeridos aos tijolos normatizados.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A ineficácia dos modelos lineares de produção e consumo, evidencia a urgência de se desenvolver meios de valorização de resíduos em larga escala (GEYER, 2017) como a proposta nesta dissertação.

A relevância científica deste estudo reside na geração de dados sobre o comportamento de um compósito polímero cerâmico a partir de uma matéria-prima abundante e realista: resíduos plásticos mistos e sem seleção prévia, que são descartados.

A proposta de utilizar resíduos plásticos na confecção de novos materiais para a construção civil representa uma rota promissora de valorização de resíduos, alinhada aos princípios da economia circular. Tal abordagem transcende a simples mitigação da poluição plástica (YADAV et al., 2024; SINAN; BUBSHAIT, 2022; XANTHOS; WALKER, 2017). Ela também oferece um caminho para:

- Reduzir o uso de recursos naturais não renováveis, diminuindo os impactos ambientais da indústria cerâmica e de polímeros.

- Gerar novas cadeias de valor econômico e oportunidades de emprego, fortalecendo a economia local (CHAUHAN et al., 2019).
- Promover soluções de moradia e infraestrutura de menor custo, especialmente relevantes para países em desenvolvimento (GOUNDEN; MWANGI; MOHAN, 2022).
- Desenvolver um tijolo que ofereça um desempenho comparável ou superior ao tijolo tradicional normatizado.

Portanto, este trabalho é justificado pela necessidade urgente de soluções inovadoras que integrem a gestão de resíduos à indústria da construção, transformando um passivo ambiental em um ativo para o desenvolvimento tecnológico, ambiental e socioeconômico.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um compósito de areia e resíduo polimérico misto pós consumo, para fabricação de tijolos sustentáveis e de alto desempenho, inseridos na temática da economia circular.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO

- ✓ Caracterizar os resíduos plásticos quanto sua natureza;
- ✓ Caracterizar o agregado (areia fina);
- ✓ Investigar a influência da proporção de uma mistura de resíduos poliméricos (RPs) e areia nas propriedades mecânicas (resistência à compressão, dureza), físicas (densidade, absorção de água) e térmicas (análise termogravimétrica) do compósito resultante.
- ✓ Comparar os resultados com tijolos tradicionais conforme normas técnicas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 RESÍDUOS POLIMÉRICOS

A denominação de resíduos poliméricos ou resíduos plásticos (RPs) refere-se a materiais deixados como subprodutos após a fabricação, processamento ou uso de polímeros. Esses resíduos incluem sobras de produção industrial, aparas de processamento, produtos descartados ou materiais plásticos que chegam ao fim de sua vida útil.

Podem ocorrer em diversas formas, como embalagens, filmes finos, peças moldadas, grânulos, entre outros, porém nesse estudo o foco será nos termoplásticos mais simples e de uso comum (polietileno e polipropileno), uma vez que englobam a maior parcela dos resíduos poliméricos descartados (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005; MORICI; DINTCHEVA, 2022; SCHYNS; SHAVER, 2021).

A gestão de resíduos poliméricos envolve técnicas como reciclagem, reutilização, incineração controlada e deposição segura em aterros destinados ao tratamento de resíduos sólidos (WANG; PRAETORIUS, 2022).

Para estudar os resíduos poliméricos termoplásticos e sua gestão é fundamental analisar primeiramente a natureza dos polímeros e sua aplicação na construção civil.

#### 2.1.1 Polímeros termoplásticos

Os resíduos poliméricos utilizados neste trabalho são majoritariamente constituídos por poliolefinas, a classe de termoplásticos mais consumida mundialmente.

Quimicamente, são macromoléculas obtidas pela polimerização de olefinas simples, resultando em cadeias longas de hidrocarbonetos (SCHYNS; SHAVER, 2021). Entre esses materiais, o polietileno (PE) e o polipropileno (PP) representam a maior parte dos resíduos sólidos urbanos, sobretudo em embalagens (GEYER et al., 2017). Na construção civil são usados para diversos produtos conforme Figura 1.

A microestrutura semicristalina das poliolefinas, composta por regiões cristalinas imersas em matriz amorfa, é determinante para suas propriedades. O grau de cristalinidade

governa a rigidez, densidade e resistência mecânica, além de influenciar a temperatura de fusão (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018; DOWLING, 2013).

Essas características, associadas à baixa densidade, à moldabilidade térmica e à alta durabilidade, explicam a predominância do PE e do PP no consumo e descarte, mas também sua elevada persistência ambiental (VOET et al., 2021; SCHYNS; SHAVER, 2021).

No presente trabalho, tais propriedades são exploradas na formulação do compósito sustentável, impactando diretamente sua densidade, absorção de água e resistência mecânica.



Figura 1: Termoplásticos mais utilizados na construção civil

Fonte: a autora

### 2.1.1.1 Polietileno

O polietileno (PE) é um polímero semicristalino cuja proporção entre as fases amorfa e cristalina influencia diretamente suas propriedades (COUTINHO; MELLO, 2003). O polietileno de baixa densidade (PEBD), devido à elevada ramificação de cadeia, apresenta cristalinidade limitada ( $\approx 65\%$ ), maior flexibilidade e menor rigidez. Já o polietileno de alta densidade (PEAD), menos ramificado, atinge cristalinidade próxima a 90%, resultando em maior resistência e rigidez (DOWLING, 2013).

Nos resíduos sólidos urbanos, predominam o PEBD e o PEAD, utilizados em embalagens, sacolas, garrafas e recipientes (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Devido à sua natureza parafínica e à estrutura semicristalina, os polietilenos apresentam inércia química, temperatura de fusão em torno de 110–115 °C e segurança para uso em embalagens alimentícias e farmacêuticas (COUTINHO; MELLO, 2003). Considerando a abundância desses resíduos e sua importância como matriz aglutinante, este estudo utiliza PEBD e PEAD como principais constituintes do compósito.

### 2.1.1.2 Polipropileno

O polipropileno (PP) é uma poliolefina termoplástica com temperatura de fusão entre 165 °C e 175 °C, apresentando estabilidade térmica, resistência ao impacto em temperatura ambiente e elevada resistência química (SANTOS, 2011). Sua estrutura difere do PE pela presença de grupos metila, cuja disposição espacial (taticidade) pode ser isotática, sindiotática ou atática, influenciando diretamente a cristalinidade e, portanto, o desempenho mecânico e térmico (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

O PP é amplamente utilizado em embalagens de curta duração, filmes e rótulos, constituindo uma das principais fontes de resíduos plásticos urbanos (GARBACZ et al., 2024). Sua leveza e facilidade de processamento o tornam relevante para compósitos, pois contribui para reduzir densidade e viabilizar a produção de materiais construtivos mais sustentáveis.

## 2.1.2 Geração dos Polímeros e seus Resíduos

A produção de polímeros termoplásticos está intrinsecamente associada à extração de recursos fósseis, em especial petróleo e gás natural, sendo a nafta a principal matéria-prima para o polietileno (PADILHA, 2000). Esse processo demanda elevada energia não renovável e resulta em emissões significativas de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para as mudanças climáticas (STEFANINI et al., 2021).

O ciclo de vida dos plásticos, que vai da produção ao descarte, frequentemente culmina em aterros ou incineração, com apenas uma fração minoritária sendo reciclada (Figura 2) (BUCKNALL, 2020). Essa limitação na recuperação faz com que a acumulação de resíduos poliméricos no ambiente seja crescente, configurando-se como um desafio global (WWF, 2019).

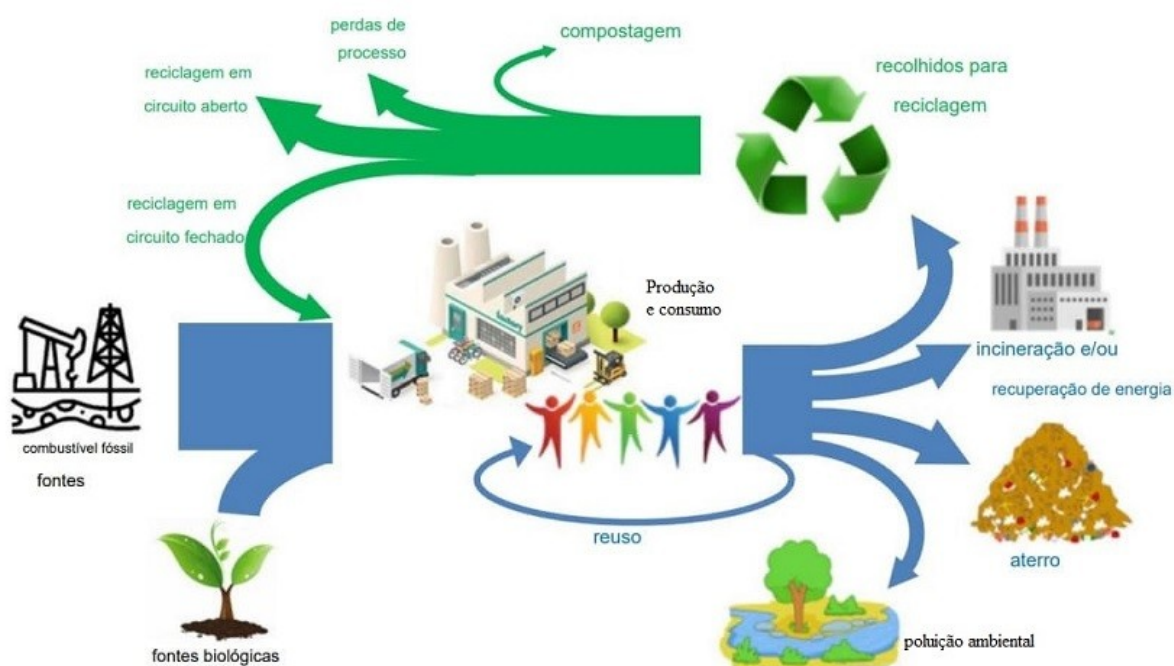


Figura 2: Ciclo dos polímeros: da produção à reciclagem, incluindo a disposição inadequada.

Fonte: Bucknall, 2020.

A gestão ineficaz desses resíduos impacta diretamente solo, água e atmosfera, intensificando os danos ambientais (Figura 3). Esse cenário evidencia a necessidade de

soluções inovadoras para valorização e reintegração de resíduos plásticos em novos ciclos produtivos (BUCKNALL, 2020; OECD, 2022).



Figura 3: Resíduos plásticos em aterro na ilha artificial de Thilafushi, nas Maldivas

Fonte: Mohamed Abdulraheem/Shutterstock

### 2.1.3 Gestão de RPs: Desafios e Perspectivas para a Economia Circular

A gestão de RPs enfrenta grandes desafios devido aos seus diversos tipos de reciclagem: primária, para resíduos industriais; secundária, que resulta em produtos de menor valor; e, as químicas e térmicas, que são caras e podem gerar gases de efeito estufa (GEE) (MORICI; DINTCHEVA, 2022; SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A reciclagem mecânica, por sua vez, é limitada pela degradação das propriedades, contaminação e, principalmente, pela incompatibilidade de polímeros mistos, que tornam a reciclagem inviável (BUCHMAN, 2022) mesmo sendo o método de reciclagem mais adequada para o reprocessamento de poliolefinas (Figura 4)(POTTINGER et al., 2024).



Figura 4: Processo industrial de reciclagem do resíduo polimérico pós consumo.

Fonte: Mundo do Plástico, 2024.

Globalmente, a produção de RPs cresceu de 234 para 460 milhões de toneladas entre 2000 e 2019 (Figura 5) (OECD, 2022). A maior parte desse lixo ainda é destinada a aterros (quase 50%) ou incineração (19%), com apenas 9% efetivamente reciclado (GEYER, JAMBECK; LAW, 2017).

No Brasil, o problema é ainda mais grave, uma vez que o país ainda está predominantemente inserido na economia linear, com uma taxa de reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo de apenas 2,3% em 2020 (WWF, 2019).

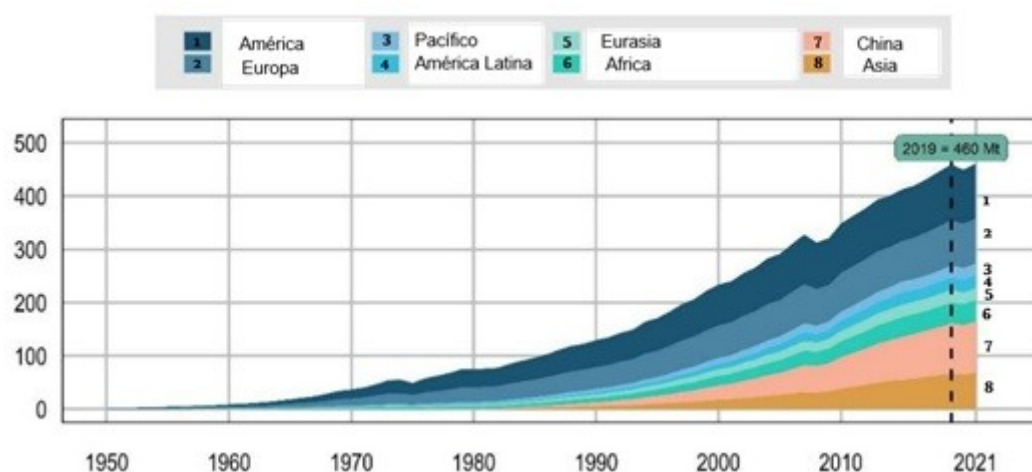


Figura 5: Projeção da produção de RPs, por região global, ao longo do tempo.

Fonte: OECD, 2022.

Além disso, Saleem et al. (2023) destacam que, sem um tratamento adequado, os plásticos se degradam no ambiente, formando microplásticos. A liberação contínua dessas partículas contribui para impactos negativos à saúde humana e aos ecossistemas.

Nesse cenário, a economia circular surge como uma solução para mitigar a poluição, transformando resíduos em recursos valiosos (SILVA et al., 2020; NCUBE et al., 2021). A valorização de RPs em novos materiais, como a proposta neste estudo, é uma forma de reintroduzi-los na economia, e a reciclagem mecânica, por ser energeticamente mais eficiente, é preferível às rotas termoquímicas (Figura 6) (BUCKNALL, 2020; SCHYNS; SHAVER, 2021; POTTINGER et al., 2024).

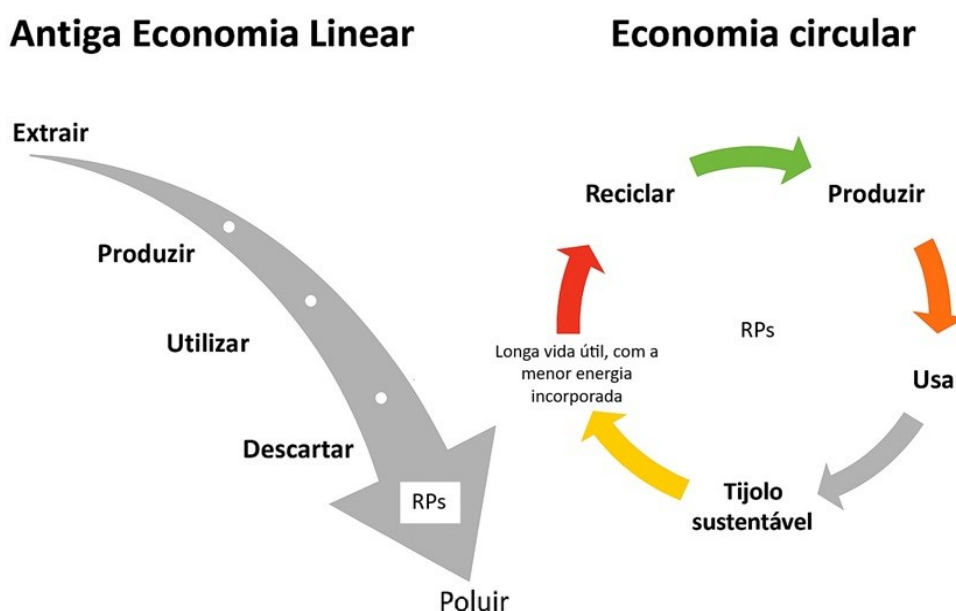


Figura 6: Ciclo dos polímeros inseridos na economia

Fonte: a autora

#### 2.1.4 Processo de Extrusão por Fricção para Reciclagem de Polímeros

Com base no artigo de Ni, Li et al. (2024), a extrusão por fricção é uma técnica de processamento em estado sólido que utiliza o calor gerado pelo atrito para amolecer e moldar os polímeros, sem a necessidade de fundi-los completamente.

O procedimento é inovador e altamente vantajoso por ser significativamente mais eficiente em termos de energia, com uma economia estimada entre 50% e 80% em comparação com a extrusão convencional. Além disso, por ser um processo em estado sólido, ele não degrada as propriedades moleculares e morfológicas dos plásticos, garantindo a qualidade do material final.

A principal inovação do processo reside em sua capacidade de reciclar plásticos mistos e de baixa qualidade (como o PE e o PP) em uma única etapa. Ele resolve o desafio de tratar resíduos que não teriam utilidade nos métodos de reciclagem tradicionais, tornando-se uma solução ideal e promissora para a economia circular.

## 2.2 OS TIJOLOS E SEUS MATERIAIS

O setor da construção civil, um dos maiores consumidores de recursos e emissores de carbono, utiliza tijolos cerâmicos e blocos de concreto, cujos processos produtivos apresentam desafios ambientais significativos.

### 2.2.1 Tijolo cerâmicos

Desde a antiguidade, os tijolos de argila foram aprimorados com a queima em fornos, o que lhes conferiu maior resistência e durabilidade (SALES et al., 2022). O tijolo de argila, que ainda é o mais utilizado no Brasil, é feito de um recurso natural não renovável (SODRÉ, 2014; ALMSSAD; ALMUSAED; HOMOD, 2022). O processo tradicional de produção, que inclui a extração da argila e a queima em fornos, gera severos impactos ambientais.

A queima é a etapa mais crítica, com uma pegada de carbono e energética considerável. Estima-se a emissão de 0,41 kg de CO<sub>2</sub> e o consumo de 2,0 kWh por unidade

de tijolo (FONSECA; MORAIS, 2022). A nível global, a produção consome cerca de 375 milhões de toneladas de carvão anualmente (SINGH et al., 2023).

Adicionalmente, a extração de argila causa desmatamento, erosão, perda de biodiversidade e assoreamento de corpos d'água (FONSECA; MORAIS, 2022; VERMA et al., 2022). A escassez de jazidas e a crescente pressão regulatória, como a Resolução CONAMA nº 369/2006, acentuam a necessidade de alternativas.

### 2.2.2 Blocos de concreto

O cimento Portland, componente essencial dos blocos de concreto, é um pilar da infraestrutura global, com demanda projetada para crescer até 23% até 2050 (FONSECA; MORAIS, 2022). Contudo, sua produção é um dos principais vetores de impacto ambiental, responsável por 8% das emissões globais de carbono e por grande parte da pegada de CO<sub>2</sub> da construção civil (CHAUDHURY; SHARMA, 2023; ROY et al., 2025).

A produção dos blocos, que consiste na mistura de cimento, agregados e água, também é intensiva em recursos hídricos, com um consumo de 18,92 litros para um único bloco de 14x19x39 cm (KUNTZ, 2021).

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) demonstram que, além do processo produtivo do cimento, a maior massa do produto (151,93 kg/m<sup>2</sup> contra 90,56 kg/m<sup>2</sup> dos cerâmicos) eleva o consumo de combustível e as emissões na fase de transporte, tornando os blocos de concreto menos sustentáveis em termos de carbono incorporado por unidade de energia (HAMMOND; JONES, 2008; CALDAS; SPOSTO, 2017).

## 2.3 A AREIA: O AGREGADO DE REFORÇO

A areia (sílica, SiO<sub>2</sub>) é um recurso fundamental cuja extração de fontes naturais, como rios, gera significativos impactos ambientais e enfrenta uma crise de esgotamento (ZHONG et al., 2022; SILVA et al., 2018). No entanto, sua extração pode contribuir para o meio ambiente, pois em algumas situações o processo de extração contribui para o desassoreamento dos leitos dos rios, quando há o devido acompanhamento técnico.

Sua base química, o dióxido de silício, é o composto mais abundante da crosta terrestre, o que abre um vasto leque de fontes alternativas e torna seu ecossistema muito mais versátil que o da argila (GOMES; FURTADO; SOUZA, 2018).

A excelência da areia como agregado reside em sua estabilidade termoquímica, sendo utilizada nas obras de engenharia civil, aterros, execução de argamassas, concretos e também na fabricação de vidros.

O quartzo, seu principal constituinte, possui uma estrutura de rede tridimensional com fortes ligações covalentes, conferindo-lhe uma altíssima temperatura de fusão (1710°C) e notável inércia química (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018). Isso garante que a areia atue como um reforço estável em compósitos, mantendo a integridade estrutural mesmo sob altas temperaturas e tornando-a apropriada para o no presente estudo.

### 2.3.1 A Influência da morfologia da areia como reforço

É crucial enfatizar que a forma das partículas da areia é um parâmetro funcional que impacta diretamente o desempenho do material compósito final.

Os grãos podem variar de angulares a arredondados (esféricos), dependendo do processo de desgaste e formação a que foram submetidos (GARBACZ et. al, 2024; USP, 2010). Esta variação morfológica pode se apresentar como:

- **Partículas Angulares:** Típicas de areias britadas (artificiais) ou que sofreram pouco transporte, promovem um maior atrito interno e intertravamento mecânico entre os grãos. Esse efeito pode resultar em um compósito com maior resistência à compressão e ao cisalhamento, sendo uma característica desejável para aplicações que exigem alto desempenho mecânico (Figura 7/esquerda).
- **Partículas Arredondadas:** Comuns em areias fluviais ou eólicas, possuem menor área de contato e rolam mais facilmente umas sobre as outras. Isso melhora a trabalhabilidade e a fluidez da mistura (seja com cimento ou polímeros), facilitando a compactação e reduzindo a quantidade de vazios. No entanto, o menor intertravamento pode levar a uma resistência mecânica ligeiramente inferior em comparação com agregados de mesma natureza, porém angulares (Figura 7/direita).
- **Polimórficas:** podem ocorrer misturadas e de várias formas (Figura 7/meio).



Figura 7: Morfologia das partículas conforme desgaste: angulares (esquerda), polimórficas (meio) e esféricas (direita).

Fonte: Grotzinger, 2023.

Dessa forma, a crise de abastecimento da areia fluvial em alguns locais (CAVALCANTI & FREIRE, 2007) impulsiona o uso de alternativas como a areia artificial (YADAV et al., 2024), areia marinha tratada e agregados reciclados de RCC (resíduos da construção civil) ou vidro (BRASILEIRO; MATOS, 2015; LIOTTO & SANTANA, 2020).

A escolha entre essas fontes não afeta apenas a pegada de carbono e a sustentabilidade do processo, mas determina de forma crítica as propriedades do produto final, pois cada fonte gera agregados com morfologia e textura distintas.

No presente trabalho foi utilizada a areia fluvial por ser a mais comum e disponível na região.

## 2.4 COMPÓSITOS E SUAS PARTICULARIDADES

Um material compósito é feito pela combinação de dois ou mais materiais que são mutuamente insolúveis, misturando-os ou unindo-os de tal forma que cada um mantenha sua integridade (CHAUDHURY; SHARMA, 2023).

Esses materiais individuais podem ser metais, cerâmicas e/ou polímeros. O objetivo de projeto de um compósito é atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por qualquer material isolado e também, incorporar as melhores características de cada um dos materiais que o compõe (DOWLING, 2013) que é justamente o propósito do presente trabalho.

O compósito pode ser considerado, mediante o princípio da ação combinada, como um material multifásico, feito artificialmente, que exhibe uma proporção desejada de ambas as fases constituintes.

Eles possuem uma fase dispersa e a matriz, onde o objetivo da fase matriz é transferir as tensões, protegendo a fase dispersa do ambiente, enquanto a fase dispersa tem o objetivo de melhorar as propriedades da matriz.

Os compósitos particulados podem ser compósitos reforçados por dispersão (microscópicas) e compósitos com partículas grandes (macroscópicas). Essas partículas são introduzidas intencionalmente para melhorar, modificar as propriedades do compósito ou substituir parte do volume da matriz com um material mais barato (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

Os materiais compósitos também podem ser classificados de acordo com o tipo de matriz. Eles podem ser divididos em compósitos de matriz metálica (CMM), matriz cerâmica (CMC), matriz polimérica (CMP) e matriz cerâmico-polimérica (CMCP).

Nesse estudo focaremos no CMP reforçado com partículas grandes (areia).

#### 2.4.1 Compósito reforçado com partículas grandes

Nos compósitos reforçados com partículas grandes, a interação partícula matriz não pode ser tratada a nível atômico ou molecular, devendo-se empregar a mecânica do contínuo.

A fase particulada é mais dura e mais rígida do que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração da carga.

O grau de reforço ou de melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface da matriz e partícula (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018), aqui representada na Figura 10, que mostra a configuração interna do compósito proposto, com a delimitação das fases (interface), reforço (areia) e matriz polimérica (Rps).

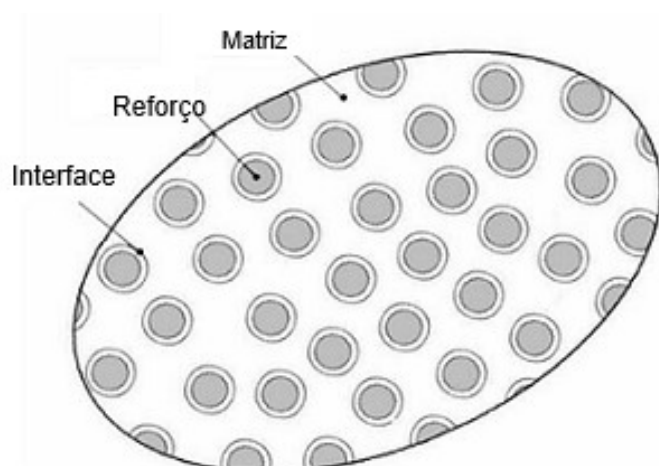


Figura 8: Composição interna do compósito: matriz, reforço e interface.

Fonte: Alves, 2017.

Padilha aponta vários estudos que buscam desenvolver um compósito com matriz polimérica (CMP) atendendo a demanda de um material estrutural, útil na construção civil, unindo a flexibilidade e o peso de um polímero (resíduo polimérico) de forma a combinar a dureza e resistência mecânica de um material cerâmico (areia) (PADILHA, 2000).

As propriedades dos compósitos dependem fortemente das características dos seus materiais constituintes, da sua distribuição e da interação entre eles. Além disso, a necessidade de compósitos com elevada relação resistência/peso, resistência à corrosão, materiais de construção mais leves e estruturas mais resistentes a sismos tem colocado grande ênfase em materiais avançados que não apenas diminuem o peso, mas também absorvam choques e vibrações por meio de microestruturas personalizadas (VERMA et al., 2013).

O concreto estrutural é um ótimo exemplo de compósito com partículas grandes onde a fase matriz é composta pela pasta de cimento portland e água, enquanto a fase dispersa é constituída por partículas de areia (agregado fino) e brita (agregado graúdo).

Neste caso a resistência mecânica da matriz cimentícia é reduzida com a adição das partículas de areia e brita, entretanto, os agregados alteram o modo de ruptura tornando o material menos frágil (natureza cerâmica do cimento) (ALVES, 2017), pela transferência de tensões da matriz para as partículas quando o compósito está sob carga e, assim, evitar a propagação de fissuras do compósito (VERMA et al., 2013).

O concreto armado é outro exemplo de compósito reforçado com partículas grandes, onde o concreto, tem seu limite de resistência à tração, aproximadamente, 10 a 15 vezes

inferior à sua resistência à compressão. Por isso vergalhões, barras ou malhas de aço são inseridos no concreto fresco, como reforço, permitindo a estrutura endurecida suportar maiores tensões de tração, compressão e cisalhamento (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

Ao adicionar cargas de reforço aos polímeros semicristalinos, todas as suas propriedades estão sujeitas às mudanças. Além do tamanho de suas partículas, da forma e da rigidez, da sua concentração na matriz polimérica e do tipo de interação matriz partícula, a boa condutividade térmica da carga de reforço, também contribui com a homogeneidade do fundido e com a boa dispersão dela na matriz reduzindo a formação de defeitos (FIRMINO et al., 2017).

#### 2.4.2 Empacotamento das partículas de reforço

O estudo do empacotamento de partículas é um ponto crucial a ser levado em consideração nos compósitos de partículas grandes, uma vez que pode ser um problema a correta seleção do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente de maneira que a resistência máxima é obtida quando a porosidade inicial da matriz é mínima, isto é, a densidade de empacotamento é máxima (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

A densidade de empacotamento é influenciada pela distribuição granulométrica, que é a análise das proporções relativas de diferentes tamanhos de partículas em uma amostra de material, e a morfologia das partículas que o constituem a carga (ALVES, 2017).

Partículas menores preenchem os vazios entre partículas maiores para aumentar a densidade de empacotamento, porém, o excesso de partículas finas aumenta a área superficial total das partículas a serem englobadas pela matriz e conseqüentemente diminui a espessura da película de pasta matriz em torno das partículas maiores. Logo, o teor de finos deve ser tal que a densidade de empacotamento seja aumentada para um valor próximo do máximo, mas que a área superficial não seja aumentada excessivamente (Figura 10a) (KWAN et al., 2014).

Outro fator que pode alterar a condição de empacotamento é a morfologia das partículas, que já foi discutido e exemplificada na seção 2.3.1. Figura 08. Quanto mais

irregular (menos esférica) for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois se verifica um maior atrito entre as partículas já que tendem a se encaixar menos eficientemente umas nas outras. Somado a isso, quanto menor for o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Misturas com empacotamento elevado, onde as partículas estão muito bem acomodadas, possuem a tendência de reduzir o espaço para preenchimento pela matriz, indicando teoricamente uma resistência mecânica mais elevada (LOPES, 2019).

#### 2.4.3 Influência da proporção do reforço nas propriedades mecânicas do compósito

O empacotamento mais denso das partículas, com conseqüente melhor contato interfacial entre a matriz e o reforço, é um fator crucial para a otimização das propriedades mecânicas do compósito através do emprego de tamanhos menores e formatos mais arredondado da partícula. Porém não menos importante é a escolha adequada das proporções dos materiais a serem empregados. Conforme demonstrado por Callister Jr. e Rethwisch (2018), há uma proporção ideal do material particulado que deve variar entre 60% a 80% do total, o que resulta na redução do número de vazios e no aumento da resistência mecânica do compósito.

A otimização das propriedades mecânicas de compósitos de RPs e areia depende criticamente de sua proporção de mistura. O estudo de Kumi-Larbi Jr. et al. (2018) sugere que uma proporção ideal, de aproximadamente 75% de areia em peso, é crucial para maximizar a resistência à compressão. Essa proporção permite que a matriz polimérica encapsule as partículas de areia e preencha os vazios, criando uma estrutura coesa. Por outro lado, o excesso de areia resulta em um volume insuficiente de ligante, enquanto o excesso de plástico impede a otimização da areia como reforço (Figura 10b).

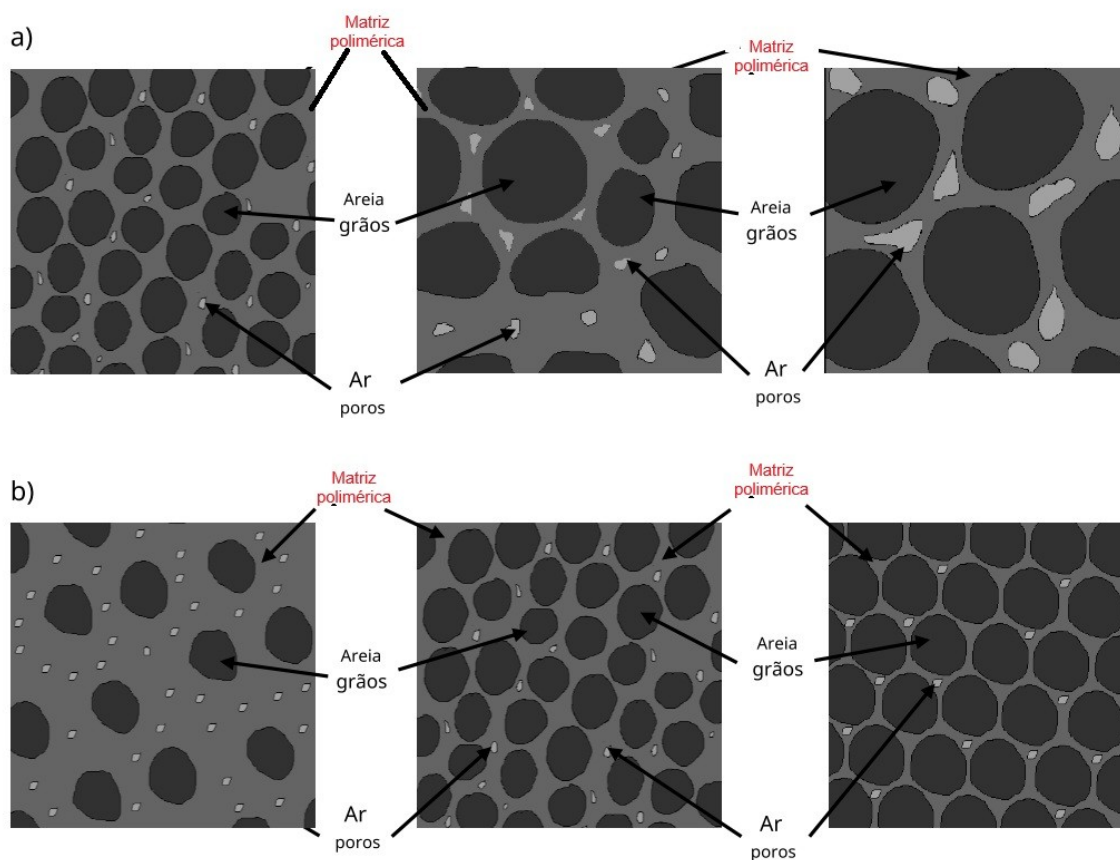


Figura 9: Quantidade e proporção de vazios na matriz polimérica em função do: a) tamanho e b) proporção das partículas

Fonte: Kumi-Larbi Jr. et al. (2018)

#### 2.4.4 Permeabilidade e absorção da matriz

As características de permeabilidade e de absorção da matriz polimérica estão relacionadas com o grau no qual as substâncias externas se difundem no material (por exemplo  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) podendo levar ao inchamento e/ou a reações químicas com as moléculas do polímero e, com frequência, à degradação das propriedades mecânicas e físicas do material. As taxas de difusão são maiores através das regiões amorfas do que através das regiões cristalinas pois os movimentos de difusão ocorrem através de um vazio para um vazio adjacente entre as cadeias poliméricas. Sendo assim os polímeros semicristalinos como o PP e o PE, listados na Tabela 01, possuem baixas taxas de permeabilidade (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

Tabela 1: Taxa de permeabilidade de gases de polímeros.

$[\times 10^{-13} (cm^3 \text{ CNTP})(cm)/(cm^2 \cdot s \cdot Pa)]$					
<b>Polímero</b>	<b>Acrônimo</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
Polietileno (baixa densidade)	LDPE	2,2	0,73	9,5	68
Polietileno (alta densidade)	HDPE	0,30	0,11	0,27	9,0
Polipropileno	PP	1,2	0,22	5,4	38
Poli(tereftalato de etileno)	PET	0,044	0,011	0,23	–

Fonte: Callister, 2018.

O mesmo foi verificado por Rafael, em ensaios laboratoriais de difusão em geomembranas de PEAD para determinação da permeabilidade do material, sendo que de todas as situações de degradação a que foi exposta, a influência mais significativa foi a de execução de microfuros intencionais, tendo maior efeito sobre a permeabilidade do que a exposição às intempéries, envelhecimento aos raios por 12 anos ou efeito estufa, no decorrer do tempo (MARÇAL, 2012).

Processos termo oxidativos são ditados pela estrutura e pela difusão do oxigênio através da matriz polimérica onde o oxigênio ambiental reage com radicais induzidos por cisalhamento e reações subsequentes produzem radicais peróxidos que propagam a decomposição radical.

A alta permeabilidade ao oxigênio leva ao aumento das taxas de termo oxidação dentro do material que levam a perda de resistência mecânica, diminuição da tenacidade e alongamento do material aumentando a probabilidade de fratura sob carga (SCHYNS; SHAVER, 2021).

Logo, se a permeabilidade for baixa, como no caso dos Rps, é maior a probabilidade da manutenção das suas propriedades intrínsecas, ao longo do tempo de uso do compósito.

## 2.5 COMPÓSITO POLÍMERO CERÂMICO DE RPS E AREIA: EVIDÊNCIAS CIENTÍFICAS

A literatura científica sobre compósitos à base de resíduos plásticos reciclados (RPs) com adição de areia apresenta avanços promissores, ainda que, em grande parte, restritos a ensaios laboratoriais e projetos-piloto. Os resultados já obtidos, entretanto, indicam potencial significativo para aplicações em escala (Tabela 2).

No âmbito ambiental, Almssad, Almusaed e Homod (2022) concluíram que compósitos com matriz polimérica de resíduos apresentam menor impacto ambiental e constituem alternativa viável para mitigação da poluição em larga escala. A utilização de resíduos de origem comercial, empresarial e doméstica como matéria-prima reforça o caráter sustentável e socialmente benéfico do processo.

Na mesma direção, Sales et al. (2022) destacam que a incorporação de RPs em tijolos contribui para evitar o acúmulo em aterros e a poluição de corpos hídricos, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Isso se deve à baixa densidade do material, que diminui o esforço motriz e o consumo de combustíveis fósseis no transporte, em comparação com blocos cerâmicos e de concreto. O mesmo estudo também aponta que edificações construídas com tijolos de RPs podem apresentar economia de até 50% em relação à alvenaria convencional, considerando custos de materiais e logística.

Do ponto de vista mecânico, Kumi-Larbi Jr. et al. (2018) observaram que compósitos de polietileno de baixa densidade (PEBD) com areia apresentam densidade adequada e resistência à compressão de até 27,3 MPa, valor superior ao concreto estrutural C20/25.

Sob a ótica do desempenho térmico, Garbacz et al. (2024) ressaltam a possibilidade de aplicação do material em ambientes com temperaturas negativas extremas, ampliando sua versatilidade de uso em diferentes contextos geográficos.

Kumar et. al (2020), após uma vasta revisão da literatura, concluiu que tijolos de RPs são superiores em todos os aspectos, se comparados com tijolos tradicionais, pois são mais econômicos, atingem maior resistência à compressão, apresentam baixa absorção de água e baixa densidade.

Assim, a literatura evidencia que compósitos polímero-cerâmicos à base de RPs e areia apresentam vantagens ambientais, econômicas e técnicas, reforçando seu potencial como alternativa sustentável aos materiais convencionais na construção civil.

Tabela 2: Trabalhos desenvolvidos sobre compósitos de RPs

Autor(es)	Método	Resultados Obtidos
SAHANI et al. (2022)	Realizaram ensaios de absorção de água em tijolos de areia/plástica em diferentes proporções de RPs.	Observaram que a absorção de água foi nula e não houve eflorescência.
HAMZAH; ALKHAF AJ (2022)	Conduziram experimentos com compósitos de areia/polímero.	Aumentar a quantidade de areia no compósito diminuiu a absorção de água. Atribuíram a diminuição ao preenchimento de vazios pela areia, que ficam envoltos pelo polímero.
ANEKE; SHABANGU (2021)	Realizaram testes em tijolos com partículas de areia na matriz polimérica.	O acréscimo de areia reduziu os espaços de possíveis poros dentro dos tijolos, causando baixa absorção de água devido às propriedades hidrofóbicas dos plásticos.
GOUDEN et al. (2023)	Misturaram areia com resíduo de PEAD em um processo de extrusão.	Os RPs fundidos, ao envolverem os grãos de areia, conferem uma função aglutinante, proporcionando a adesão entre o par areia/polímero.
IKECHUKWU; SHABANGU (2021)	Realizaram testes em compósitos com diferentes proporções de RPs	Observaram que proporções de RPs menores que 20% apresentam tendência de perda de conexão interfacial entre as partículas.
SINGH et al. (2023)	Conduziram uma extensa revisão de literatura sobre tijolos de RPs.	Apresentaram faixas de resistência para diversas formulações, demonstrando que os resultados, em muitos casos, superiores aos valores reportados.

## 2.6 O COMPÓSITO DE RPS COMO SOLUÇÃO ESTRATÉGICA NA ECONOMIA CIRCULAR

A convergência entre economia circular e sustentabilidade demanda a incorporação de tecnologias que maximizem a eficiência energética e prolonguem o tempo de serviço dos materiais.

Os compósitos de resíduos poliméricos (RPs) respondem a esse desafio ao possibilitar a conversão de resíduos em insumos duráveis, configurando-se como estratégia relevante para a construção civil no paradigma da circularidade.

Dois estudos de referência oferecem bases complementares. Geyer, Jambeck e Law (2017) modelaram o fluxo global de plásticos, correlacionando setores de uso e geração de resíduos, e demonstraram a assimetria entre embalagens, de curta duração, e materiais da construção civil, projetados para décadas de uso. Já Spinacé et al. (2005) aplicaram a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para mensurar energia incorporada na produção de polímeros, constatando que 1 kg de PEBD reciclado consome 40–49 MJ, contra cerca de 80 MJ para polímero virgem, e que a energia necessária para transformar resíduos poliméricos em novos produtos é constante, independentemente da aplicação.

A interligação entre os achados de Geyer (2017) e Spinacé et al. (2005) permite propor um indicador de eficiência temporal-energética: ainda que o investimento energético seja semelhante para produzir uma embalagem ou um componente construtivo a partir de resíduos, a diferença está no tempo de serviço. Uma embalagem cumpre sua função por cerca de seis meses, enquanto materiais de construção atingem em média 35 anos, tornando a eficiência do uso da energia aproximadamente 70 vezes maior e permitindo maior alinhamento com os princípios da circularidade (Figura 10).

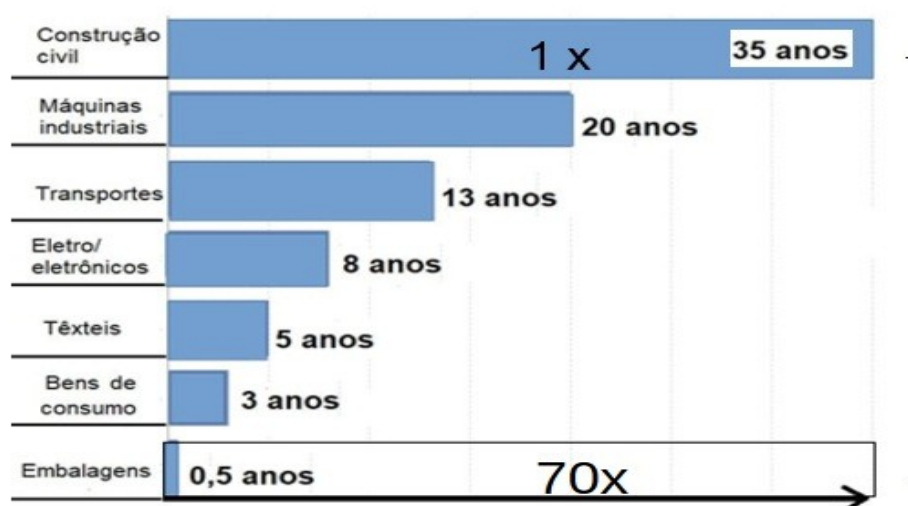


Figura 10: Termoplásticos aplicados para oito setores industriais, em função da vida útil e da energia incorporada na produção.

Fonte: adaptado de Geyer, 2017 e Spinacé et al., 2005.

Miranda et al. (2023) reforçam a viabilidade da substituição por materiais sustentáveis quando seus custos ambientais e energéticos são menores que os da fabricação tradicional. Os autores comprovaram que tijolos de polímero e areia (20/80) podem ser produzidos em apenas 15 minutos, consumindo um terço da energia de tijolos cerâmicos, além de reduzir emissões de gases de efeito estufa.

De forma complementar, Ikechukwu e Shabangu (2021) estimaram que tijolos de resíduos poliméricos e vidro triturado custam até 15 vezes menos que os de argila, resultado consistente com Schneider e Moreiras (2021), que, citando Bauer (2001), destacam que tijolos cerâmicos demandam 4 a 10 dias de queima (800–1100 °C) e mais 7 dias de resfriamento.

Portanto, a integração entre as análises de Geyer (2017) e Spinacé et al. (2005) evidencia que o uso de resíduos poliméricos na construção civil prolonga a vida útil dos materiais e maximiza a eficiência da energia incorporada, que é justamente a proposta da economia circular.

Os compósitos de RPs configuram-se, assim, como estratégia promissora para inserir a construção civil na economia circular, conciliando desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Resíduo polimérico:

Foram utilizados resíduos poliméricos (RPs) não comercializáveis Figura 11, devido a contaminação por diversos polímeros. Eles foram obtidos, por doação, na empresa Master Reciclar, Guaporé, RS, Brasil.



Figura 11: Resíduos poliméricos (RPs) utilizados

Eles já vieram triturados do tamanho de pellets, como mostra a Figura 12, o que facilita a mistura com a areia. O material é formado por resíduos mistos, não triados e nem lavados, sendo basicamente formados por aparas de rebarbas e embalagens trituradas.

A proporcionalidade entre os tipos de polímeros no material não foi dosada, pois a proposta metodológica focou na simplificação do processo, utilizando a matéria-prima mista tal como é obtida no fluxo de resíduos.

Os RPs fundidos formam a matriz aglutinante do compósito, preenchendo os vazios entre os grãos de areia, criando uma massa coesa e unificada.

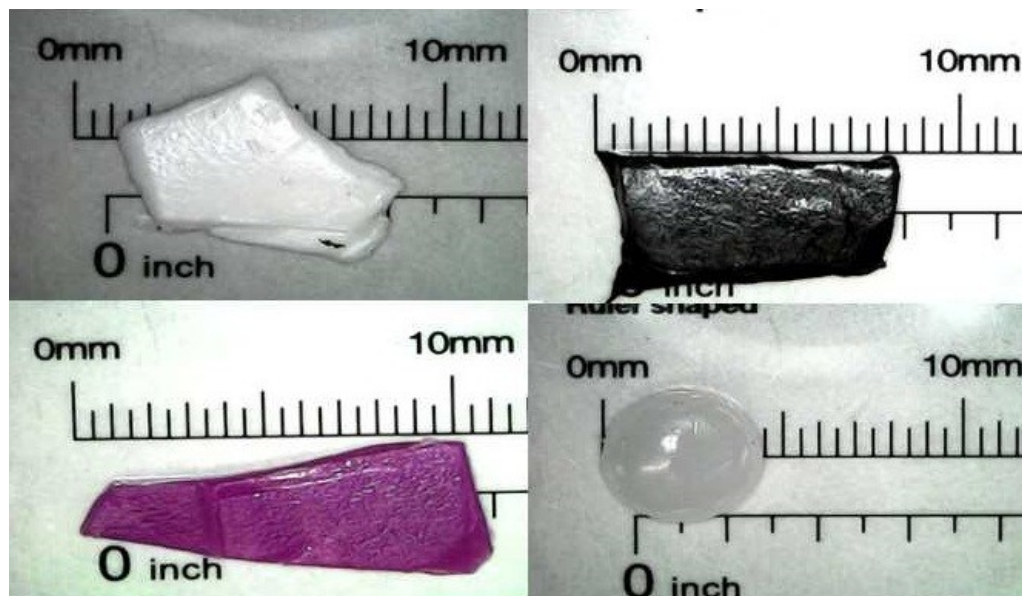


Figura 12: Caracterização dimensional de alguns RPs utilizados.

### 3.1.2 Areia fina

A areia natural de rio foi adquirida no Farrapos materiais construção em Farroupilha-RS. O material é apresentado na Figura 13.



Figura 13: Areia fluvial fina para construção.

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 Caracterização dos Resíduos Plásticos

Os resíduos plásticos foram caracterizados, por Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier em reflexão atenuada (FTIR-ATR), em um equipamento Perkin Helmer modelo Frontier 100, com 16 varreduras e comprimento de onda variando de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ .

Termogravimetria (TGA), em um equipamento Perkin Helmer modelo TGA4000, os corpos de prova foram aquecidos da temperatura ambiente até  $900^{\circ}\text{C}$ , em uma rampa de aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , em atmosfera de nitrogênio com taxa de araste de  $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### 3.2.2 Caracterização da areia

A areia foi caracterizada em ensaio granulométrico que foi realizado conforme norma ABNT NBR 7211-Agregados para concreto (ABNT,2022), foi utilizado em um agitador elétrico de peneiras, marca Bertel (Figura 14A), no laboratório do IFRS, Campus Farroupilha, onde foram seguidas as especificações descritas na NBR 17054-Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio (ABNT, 2022).

As peneiras utilizadas serão da série normal e série intermediária de peneiras, Figura 14 B, com as aberturas estabelecidas conforme NBR 7211 (ABNT, 2022) e NBR 7217 (ABNT, 1987).

A areia também foi caracterizada por Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier em reflexão atenuada (FTIR-ATR), em um equipamento Perkin Helmer modelo Frontier 100, com 16 varreduras e comprimento de onda variando de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ .

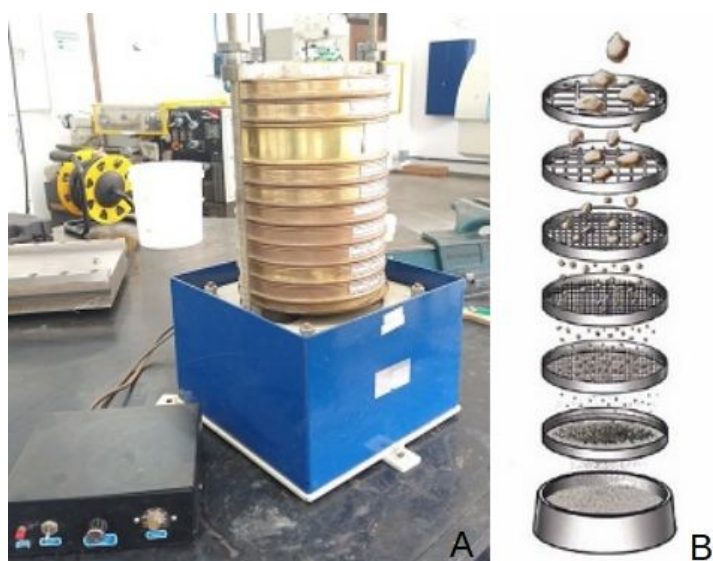


Figura 14: Ensaio granulométrico: A (agitador), B (peneiras).

A areia foi seca em estufa, a 110°C por 2 horas e deixado esfriar à temperatura ambiente, após a porção de areia foi dividida em duas porções m1 e m2, anotando-se a massa de cada uma das porções, conforme o descritivo da norma.

A densidade da areia foi determinada pela NBR 16916 Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água (ABNT, 2021), com auxílio de balança de precisão modelo Shimadzu UW6200H, no laboratório do IFRS, Campus Farroupilha.

A densidade do agregado seco foi calculada utilizando a Equação 1:

$$\rho_s = \frac{m_A}{V - V_a} \quad (\text{Equação 1});$$

Onde,

$\rho_s$  é a densidade do agregado na condição seca, em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$m_A$  é a massa da amostra seca em estufa a (105 ± 5) °C, em gramas (g);

$V$  é o volume do frasco calibrado, em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>);

$V_a$  é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>) conforme Equação 2:

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a} \quad (\text{Equação 2});$$

Onde

$mC$  é a massa do conjunto formado pela massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, expressa em gramas (g);

$mD$  é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, mais a massa da água, expressa em gramas (g);

$\rho_a$  é a densidade da água na temperatura do banho, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>).

A densidade do agregado na condição saturada de superfície seca é calculada utilizando a Equação 3:

$$\rho_{SSS} = \frac{mB}{V - V_a} \quad (\text{Equação 3});$$

Onde,

$mB$  é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em gramas (g);

$\rho_{SSS}$  é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

### 3.2.3 Formulação e preparação dos corpos de prova

Levando em consideração a seção 2.4.3., a qual enfatiza a importância da aplicação da proporção adequada para obter as melhores propriedades mecânicas do compósito, um compilado de alguns resultados disponíveis na literatura são apresentados na tabela 3, justificando as proporções definidas para o estudo.

A Tabela 04, apresenta as proporções, em percentagem de massa dos materiais utilizadas para confecção dos tijolos compósitos, as respectivas denominações de cada amostra e o tempo de processamento até a completa fusão dos RPs para cada corpo de prova.

Tabela 3: Proporções usadas em estudos que resultaram na melhor resistência à compressão

Autor(es) e Ano	Proporções Testadas	Melhor Proporção RPs	Melhor Resistência
Miranda et al. (2024)	10% e 20% de PP	1 : 4	17,2 MPa
Hameed e Hamza (2019)	10% a 30% UPR*	1 : 3	132 MPa
Nnorom et al. (2024)	1:1/3, 1 : 1 e 1:3 RP/A	1 : 3	31,11MPa
Hassan et al. (2025)	10% a 50% de ABS**	1 : 1	15 MPa
Ngayakamo (2025)	40% a 100% de RPs	40%	74,91 MPa
Kumi-Larbi Jr et al (2018)	25% de PEBD e 75% A	1 : 3	27,3 MPa
Sahani et al. (2022)	1 : 3, 1 : 4 e 1 : 5	1 : 4	12,28MPa
Hamzah; Alkhafaj (2022)	40% a 100% de RPs	40%	61,287 MPa
Aneke; Shabangu (2021)	20% a 40% de RPs	30%	33,25 MPa
Gounden et al. (2023)	15% a 40% de RP/caulin	25%	52,76 MPa
Ikechukwu; Shabangu (2021)	20% a 40% de vidro	30%	42 MPa
Kumi-Larbi Jnr et al. (2023)	25% de PE e 75% A	1 : 3	15 MPa
Kumi-Larbi Jnr et al. (2022)	25% de PEAD e 75% A	1 : 3	37,1 MPa
*Resina de Poliéster	**Acrlonitrilo-Butadieno-Estireno		

Tabela 4: Identificação e formulação das misturas dos compósitos testados

Nome da Amostra Padrão	Mistura RP/Areia (%)	Proporção RP/Areia	Tempo de Mistura e fusão (segundos)
A0	100/0	1:0	± 15
A1	50/50	1:1	± 45
A2	33/67	1:2	± 60
A3	25/75	1:3	± 75
A4	20/80	1:4	± 90

Fonte: a autora

Para cada formulação, a areia e os resíduos plásticos (RPs), foram pesados em uma balança analítica modelo Shimadzu UW6200H (Figura 15), posteriormente misturados (Figura 16C). A mistura dos resíduos poliméricos mistos com a areia foi realizada utilizando o processo de extrusão por fricção em um misturador intensivo tipo Driser (Figura 17), para mistura e fusão. Essa técnica foi escolhida por sua comprovada eficiência energética e capacidade de processar resíduos plásticos heterogêneos sem degradação do material, conforme reportado por Ni et al. (2024). O equipamento aquece o material por atrito, produzindo uma mistura escura, homogênea e viscosa, a qual foi vertida em um molde de madeira com formato retangular com dimensões de 105 mm x 75 mm x 35 mm, de comprimento, largura e altura respectivamente (Figura 18).

O processo foi repetido e obtidos 5 corpos de prova para cada uma das misturas, tendo seu tempo médio de fusão registrado (Tabela 04).

Após 24 horas em temperatura ambiente, os 25 corpos de prova, foram desmoldados e identificados de acordo com as proporções da areia utilizadas na Tabela 04.

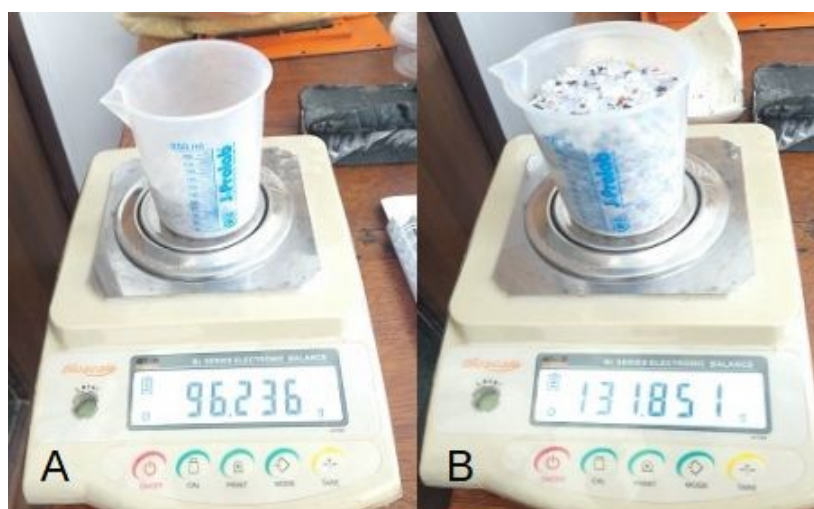


Figura 15: Materiais pesados em balança de precisão: areia (A) e RP (B).

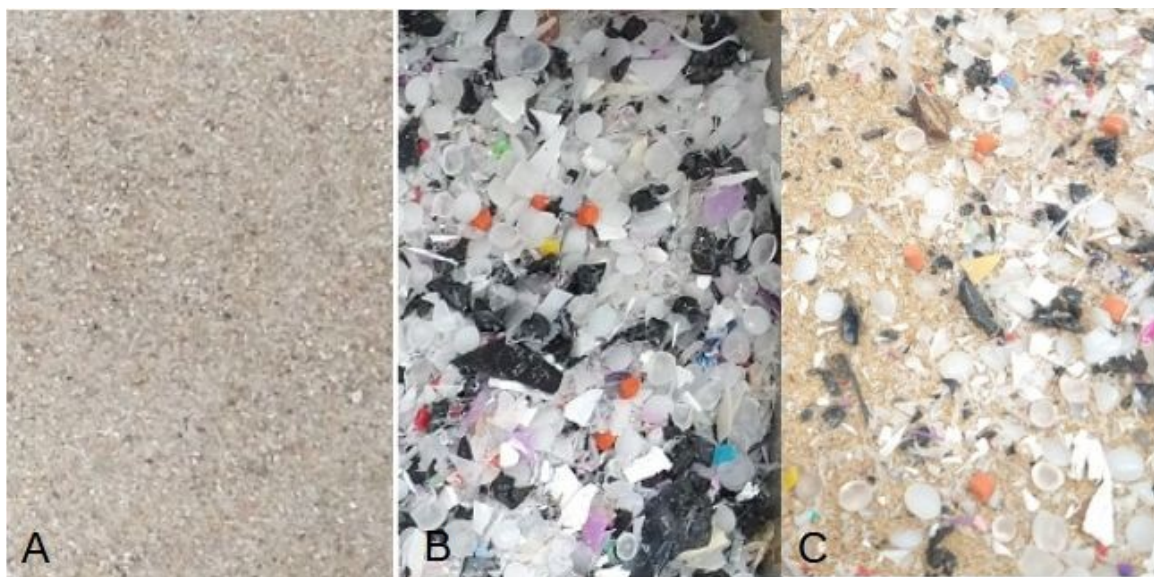


Figura 16: Materiais utilizados nos tijolos: A (areia), B (RP) e C (mistura).



Figura 17: Misturador intensivo tipo Driser.



Figura 18: Peças fundidas e moldadas em molde de madeira.

### 3.2.4 Caracterização dos corpos de prova

#### 3.2.4.1 Teste da dureza dos corpos de prova

A dureza dos corpos de prova foi determinada com um durômetro Harteprefer, na escala de dureza Shore A, conforme norma ASTM D 2240. O resultado de dureza é obtido através da média aritmética de dez repetições (Figura 19).

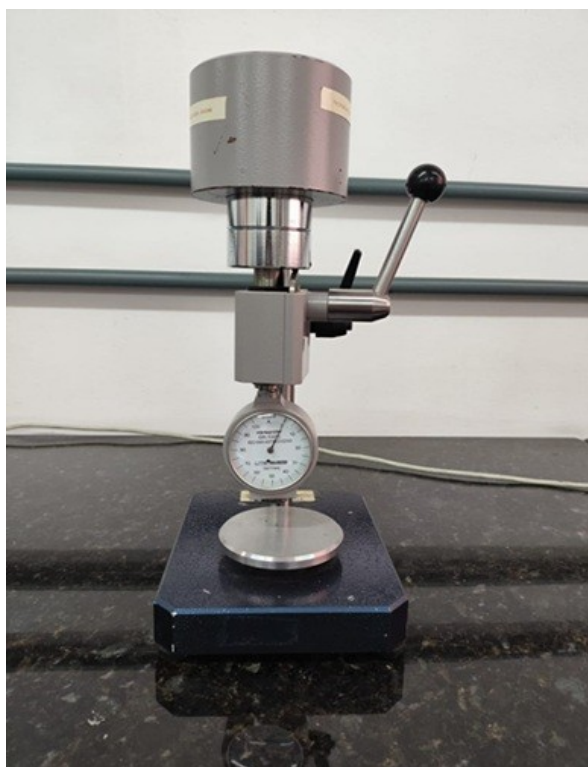


Figura 19: Durômetro Hartepreifer.

#### 3.2.4.2 Teste de densidade dos corpos de prova

A densidade volumétrica dos corpos de prova foram determinadas através de ensaios não destrutivos, seguindo recomendações da norma NBR 10545-3-2020 Placas cerâmicas/Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente.

Os corpos de prova foram secos em uma estufa modelo Masterlab, por um período de 24 horas a uma temperatura de 40°C, após este período os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica modelo Shimadzu UW6200H, com precisão de 0,01g para determinação da massa dos corpos de prova. Com auxílio de um paquímetro digital 200 mm da Mitutoyo, com precisão de 0,01mm, foi determinado o volume dos corpos de prova, utilizando-se a Equação 4:

$$V'_{cp} = C'_{cp} \times L'_{cp} \times A'_{cp}$$

Equação 4

Onde :

$V'_{cp}$  = Volume do corpo de prova ( $\text{cm}^3$ ),

$C'_{cp}$  = Comprimento do corpo de prova (cm),

$L'_{cp}$  = Largura do corpo de prova (cm),

$A'_{cp}$  = Altura do corpo de prova (cm).

A obtenção das densidades volumétricas dos corpos de prova foi determinada conforme Equação 5.

$$D'_{cp} = \frac{m'_{cp}}{V'_{cp}} \quad \text{Equação 5;}$$

Onde :

$D'_{cp}$  = densidade do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$m'_{cp}$  = massa do corpo de prova (g);

$V'_{cp}$  = volume do corpo de prova ( $\text{cm}^3$ ).

#### 3.2.4.3 Teste de absorção de água dos corpos de prova

A determinação da porcentagem de umidade que o tijolo absorve quando exposto à umidade foi realizada segundo a norma ABNT NBR 15270-2:2023 estabelece os métodos para a execução dos ensaios dos blocos e tijolos cerâmicos com e sem função estrutural (ABNT, 2023).

Os parâmetros de comparação dos resultados dos ensaios foram consultados na norma ABNT NBR 15270-1:2023 especifica os requisitos dimensionais e as propriedades físicas e mecânicas de blocos e tijolos cerâmicos a serem utilizados em obras de alvenaria, com ou sem função estrutural (ABNT, 2023).

Tais parâmetros estão apreciados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Requisitos a serem verificados para tijolo cerâmico não estrutural

Classe	f <sub>bk</sub> mínimo (MPa)	Absorção d'água (%)
VED40	4	8 a 25

Fonte: ABNT, 2023.

Tabela 6: Requisitos a serem verificados para tijolo cerâmico estrutural

Classe	f <sub>bk</sub> mínimo (MPa)	Absorção d'água (%)
EST60	6	8 a 25
EST80	8	8 a 25
EST100	10	8 a 25
EST120	12	8 a 25
EST140	14	8 a 25

Fonte: ABNT, 2023.

Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem foram obtidos pela da Equação 6:

$$A = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 6});$$

onde:

A é a absorção de água, expressa em porcentagem (%);

m<sub>1</sub> é a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);

m<sub>2</sub> é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Conforme a norma NBR 15270-2-2023, os corpos de prova devem ser secos em estufa, entre 105 °C a 110 °C, porém, para não comprometer a integridade estrutural das amostras as mesmas foram, secas em estufa modelo De Leo (Figura 20), por 24 horas a temperatura de 40C° e pesadas em uma balança analítica modelo Shimadzu UW6200H, até atingirem uma massa constante, conforme observação de SAHANI et al., (2022).



Figura 20: Estufa utilizada para os corpos de prova

A massa aferida, em gramas (g), do corpo de prova seco foi nomeada como  $m_1$  e tabelada. Posteriormente etiquetados e imersos em um tanque com água, a temperatura ambiente, durante 24 h (Figura 21).

Após esse tempo, foram retirados da água, enxugados superficialmente com um pano levemente umedecido e pesados novamente, antes de decorridos 3 minutos, obtendo-se assim a massa do corpo de prova saturado  $m_2$  (ABNT, 2012).



Figura 21: Ensaio de absorção de água com tijolos imersos por 24 horas

#### 3.2.4.4 Teste de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no ensaio de compressão foram faceados com o auxílio de uma retificadora industrial, com o intuito de garantir o paralelismo entre as faces e evitar o efeito do atrito causado pela superfície dos corpos de prova com as placas do equipamento.

A resistência mecânica dos compósitos foi determinada através de ensaios de compressão mecânica conforme recomendações das normas NBR 15270-2-2023: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria/Parte 2: Métodos de ensaios, e da NBR 8492-2012: Compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento.

Os parâmetros de comparação dos resultados dos ensaios foram consultados na norma já citada na seção 3.2.4.3 e expressas nas Tabelas 05 e 06.

O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica computadorizada, modelo EMIC 20000 (Máquina de Ensaio Universal), com célula de carga de 200 kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min (Figura 22). Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em cinco corpos de prova de cada formulação da Tabela 04.

Primeiro o corpo de prova é aferido novamente e seus parâmetros dimensionais proporções de mistura são lançados no software da EMIC. Ao final do ensaio é gerado um

relatório com todos os resultados de resistência à compressão alcançada pelos corpos de prova.



Figura 22: Máquina de Ensaio Universal (EMIC 20000)

A resistência à compressão dos corpos de prova é determinada pela da Equação 7.

$$F_c = \frac{N}{A_i} \quad (\text{Equação 7});$$

Onde:

$F_c$  = é a resistência à compressão, em megapascal (MPa).

$N$  = é a força máxima do carregamento, em newton (N).

$A_i$  = é a área da seção transversal inicial das amostras em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ).

### 3.2.4.5 Espectroscopia de infravermelho dos corpos de prova

A espectroscopia na região do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) permitiu investigar grupos funcionais e tipos de ligações de bandas características de absorção, associadas à vibração e à rotação molecular.

Foi realizada análise de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) no equipamento Perkin Elmer Frontier (Figura 23), usando acessório de reflexão atenuada (ATR), com 16 varreduras em comprimento de onda variando de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ .



Figura 23: Equipamento Perkin Elmer Frontier

### 3.2.4.6 Termogravimetria (TGA) dos corpos de prova

A Análise Termogravimétrica (TGA) teve como objetivo avaliar a perda de massa das amostras com a variação da temperatura.

Esta análise foi realizada, para os polímeros puros, areia e tijolo pronto (compósito), em um equipamento Perkin Elmer TGA 4000, Figura 24, com uma taxa de aquecimento de 20 ° C/min sob atmosfera de nitrogênio (50 ml/min) em uma rampa de aquecimento de 30 ° C até 900 ° C.



Figura 24: Equipamento Perkin Elmer  
TGA 4000

#### 3.2.4.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova

As amostras foram fraturadas no ensaio de compressão e o MEV foi realizado em um Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM TM3000, Hitachi), operando com voltagem aceleradora de 15 Kv, preparado com uma fita de carbono, com ampliação de 300 x. As amostras foram ensaiadas na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Campus Pato Branco.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 AREIA

O módulo de finura da areia foi determinado pela soma das porcentagens retidas cumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100, conforme NBR 7211/2022, resultando em 2,16 na zona utilizável inferior, com o diâmetro máximo característico determinado em 0,60 mm, caracterizando a areia fina, de acordo com a Tabela 7, onde verifica-se as porcentagens acumuladas e passante em cada peneira de acordo com seus diâmetros.

Tabela 7: Porcentagem de grãos de areia passantes em cada peneira.

Peneira ASTM	Abertura de malha (mm)	Massa retida (g)	Retido na peneira (%)	Massa retida acumulada (g)	Acumulado retido nas peneiras (%)	Percentual passante (%)
20	0,84	0,847	0,28%	0,85	0,28%	99,72%
30	<b>0,59</b>	122,931	40,98%	123,78	<b>41,26%</b>	58,74%
40	0,42	63,057	21,02%	186,83	62,28%	37,72%
50	0,297	51,09	17,03%	237,92	<b>79,31%</b>	20,69%
70	0,21	34,49	11,50%	272,41	90,80%	9,20%
100	0,149	12,42	4,14%	284,84	<b>94,95%</b>	5,05%
140	0,105	8,25	2,75%	293,08	97,69%	2,31%
200	0,074	4,61	1,54%	297,70	99,23%	0,77%
Fundo		2,31	0,77%	300,00	100,00%	0,00%
		300		FM*	<b>2,16</b>	

Fonte: a autora

A Curva Granulométrica, que representa as porcentagens retidas acumuladas em cada peneira em relação à dimensão da abertura de sua malha, é representada na Figura 25 em escala natural (ordenada) e a abertura da peneira em escala logarítmica (abscissa).

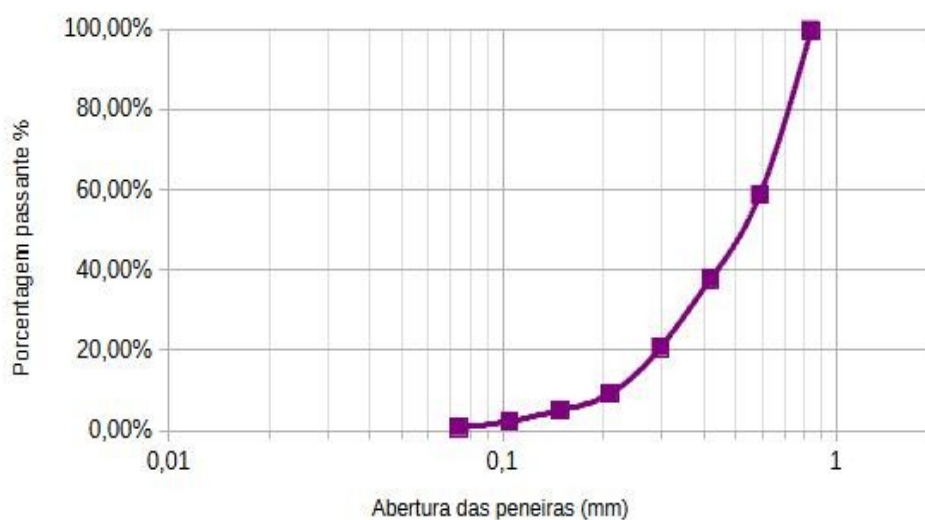
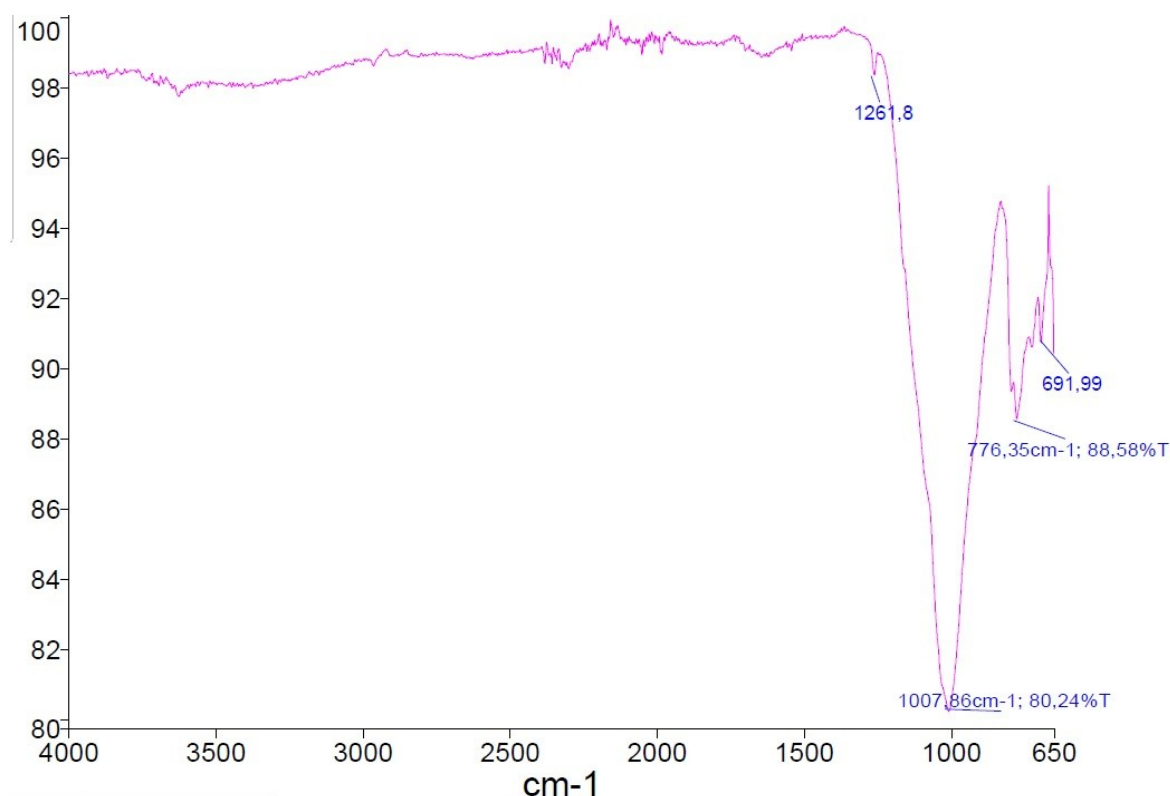


Figura 25: Curva de distribuição granulométrica da areia.

O espectro FTIR da areia, correspondente à Figura 26, apresenta as bandas de  $1007\text{ cm}^{-1}$  e  $776\text{ cm}^{-1}$  que, de acordo com a literatura, correspondem ao estiramento assimétrico dos grupos Si–O–Si e ao estiramento simétrico de Si–O, respectivamente. A banda em  $692\text{ cm}^{-1}$  corresponde à vibração de dobramento simétrico para o quartzo na forma cristalina (VOLKOV; ROGOVA; PROSKURNIN, 2021; LIU; QIANG; ZHAO, 2015; SELVARAJU; ANITHA; ANANDALAKSHMI, 2022; ANBALAGAN; PRABAKARAN; GUNASEKARAN, 2010; OJURI; SHAI; ADERIBIGBE, 2017).

A densidade da areia da amostra foi determinada pela Equação 3 e resultou em como  $1,943\text{gr/cm}^3$ . Esta característica varia de acordo com a distribuição granulométrica das partículas.



## 4.2 RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Na análise do FTIR dos RPs, na Figura 27, é possível constatar bandas bem próximas às encontradas por Hamzah e colaboradores ao estudarem amostras de LDPE, com picos  $2950,63\text{ cm}^{-1}$  e  $2848,47\text{ cm}^{-1}$  para estiramento C-H, bandas em  $1462,62\text{ cm}^{-1}$  para dobramento de  $\text{CH}_2$  (HAMZAH; ALKHAF AJ, 2022).

O que condiz com Pavia et. al (2015) que infere que o estiramento do C-H em  $3000\text{ cm}^{-1}$  ocorre em alcanos (com exceção de compostos com anéis tensionados), a absorção de C-H  $\text{sp}_3$  sempre ocorre em frequências mais baixas que  $3000\text{ cm}^{-1}$  ( $3000\text{-}2840\text{ cm}^{-1}$ ).

Grupos metileno ( $\text{CH}_2$ ) têm uma absorção de dobramento próxima de  $1465\text{ cm}^{-1}$  (PAVIA et al., 2015). O que também é abordado por Neto (2024), que sugere que o estiramento vibracional simétrico da ligação H-C-H, é comumente encontrado na faixa de  $2853 \pm 10\text{ cm}^{-1}$  enquanto a banda que deve ocorrer próxima de  $1466\text{ cm}^{-1}$  descreve a divisão angular do grupo  $\text{CH}_2$ .

A banda acentuada com picos em 730,470 e 717,75  $\text{cm}^{-1}$ , caracteriza o polietileno que aparece em função do movimento de rocking (deformação angular do tipo swing) associado com quatro ou mais grupos  $\text{CH}_2$  em uma cadeia aberta ocorre aproximadamente a 720  $\text{cm}^{-1}$  (denominada banda de cadeia longa) (NETO et al., 2024).

Foram constatadas bandas de absorção que sugerem a presença do polipropileno, como a banda em 2.950  $\text{cm}^{-1}$  que sugere o alongamento assimétrico do grupo metil ( $-\text{CH}_3$ ).

Em 2.915  $\text{cm}^{-1}$ , alongamento assimétrico de  $-\text{CH}_2$ , em 2848  $\text{cm}^{-1}$  o alongamento simétrico do grupo metil ( $-\text{CH}_3$ ), dobrando picos de  $\text{CH}_2$ - e  $-\text{CH}_3$  estão em 1471,99  $\text{cm}^{-1}$  e 1376,23  $\text{cm}^{-1}$  também sugerem o polipropileno (TARIQ et al., 2020).

A banda situada na região de 1167  $\text{cm}^{-1}$  se refere ao estiramento das ligações C-C, enquanto a deformação angular dos grupos CH se localizam em 890  $\text{cm}^{-1}$  (LIMA et al., 2012).

O pico fraco em 805,95  $\text{cm}^{-1}$  corresponde à deformação angular do C-H fora do plano, o pico em 841,94  $\text{cm}^{-1}$ , ao estiramento C-C do grupo isopropil ( $-\text{HC}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ ), a 973,11  $\text{cm}^{-1}$  e 997,90  $\text{cm}^{-1}$ , ao estiramento C-C do grupo  $\text{CH}_2$  e do  $\text{CH}_3$ , respectivamente, enquanto a banda em 1303,8  $\text{cm}^{-1}$  corresponde as vibrações do grupo  $\text{CH}_2$  (SANTOS, 2011).

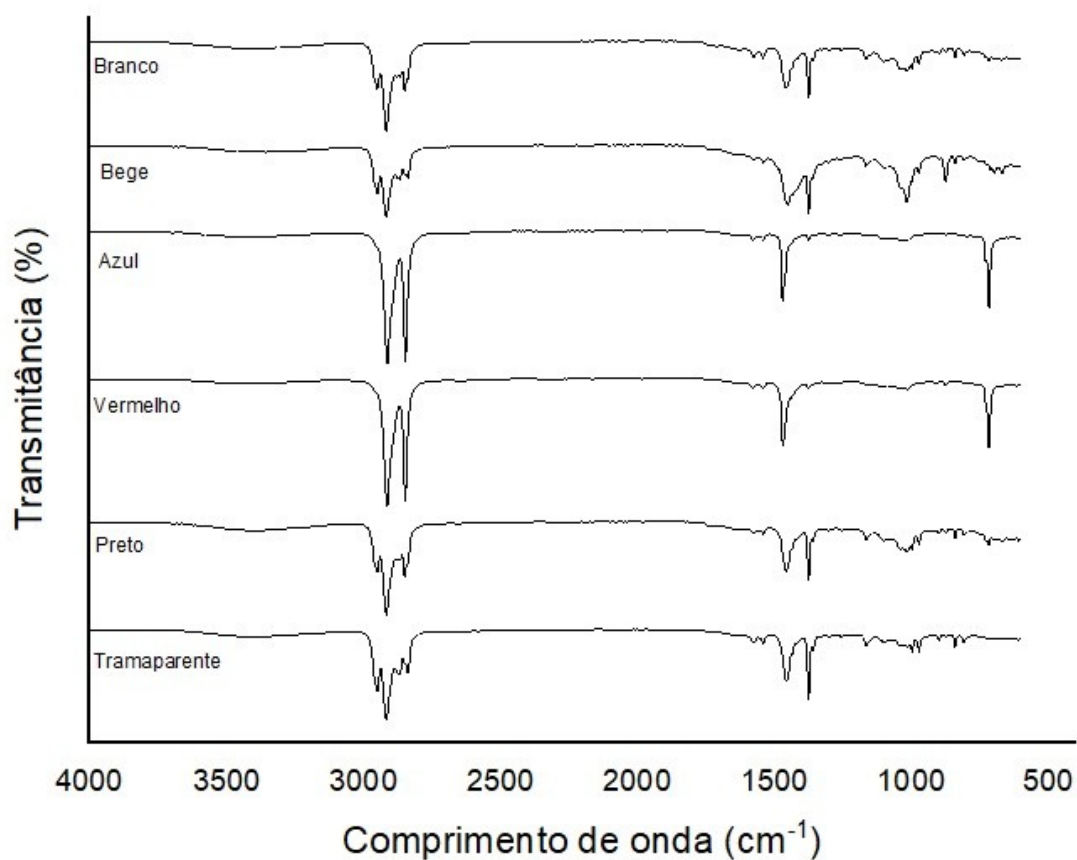


Figura 27: Espectro infravermelho do resíduo polimérico de referência.

#### 4.3 TIJOLO COMPÓSITO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS E AREIA (RP/A)

Os tijolos, após vinte e quatro horas de moldagem e cura em temperatura ambiente, foram deformados, aferidos e retificados para sua caracterização (Figura 28).

A microestrutura do tijolo retificado exibe uma notável semelhança com a de uma rocha basáltica, amplamente empregada na construção civil e em pavimentação. A morfologia do basalto em seu estado natural, após a extração, é rústica e pode ser observada na Figura 28A e 28B.



Tijolo compósito RP/A



A



B

Pedra natural basáltica

Figura 28: Imagem dos tijolos compósito (acima) em comparação com rocha basalto (abaixo)

### 4.3.1 Dureza dos tijolos RP/A

Os resultados de dureza dos compósitos estão apresentados na Tabela 8 e Figura 29.

Observa-se que a Amostra A0 (sem areia) tem uma dureza média de 64,20 na escala de dureza ShoreA, no compósito A1 a dureza média foi 71,63, o equivalente a 11,6% de acréscimo na dureza, mas observa-se que mesmo aumentando a quantidade de areia A2, A3 e A4 não houve um incremento linear, mas sim um aumento de forma discreta.

A dureza em relação ao A0 variou de 11,6 % a 15,8% (A4). Proporção semelhante também foi observada por GARBACZ, et.al (2024) ao testar um compósito de PP (70%) com areia (30%) e verificando um incremento de 15% na dureza de indentação Vickers comparado ao PP puro.

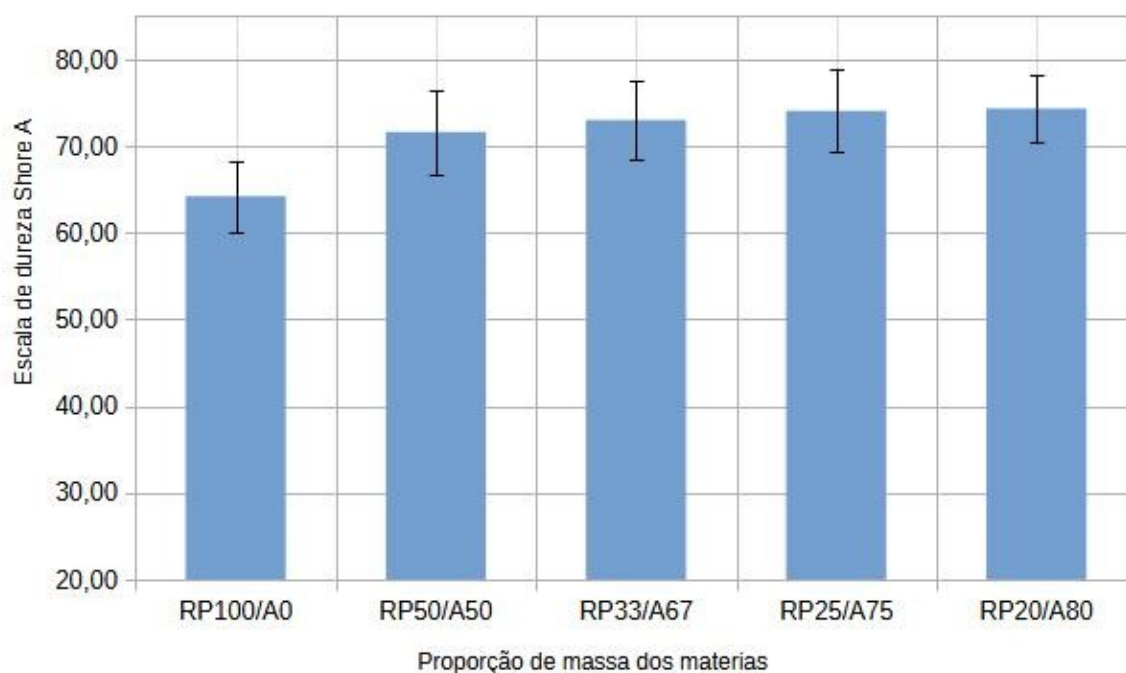


Figura 29: Dureza do tijolo em função da proporção dos materiais.

Tabela 8: Dados levantados com o durômetro nos tijolos de acordo com a composição

Dosagem	1/0			1/1			1/2			1/3			1/4		
	Ensaio Nº	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º
Teste 1	62	59	54	73	81	62	76,5	66,5	63,5	76	65	81	73	76	71
Teste 2	69	61	65	78	79	82	80,5	72,5	65,5	78	62	70	77	72	65
Teste 3	60	67	60	71	77	68	75,5	80,5	79,5	83	67	80	78	71	68
Teste 4	71	66	68	72	72	64	65,5	79,5	69,5	72	79	76	77	71	74
Teste 5	69	66	72	64	66	61	77,5	73,5	60,5	73	78	72	75	70	79
Teste 6	72	60	72	69	67	76	74,5	73,5	68,5	82	70	78	77	67	70
Teste 7	70	61	69	82	80	62	68,5	81,5	64,5	71	81	71	78	83	76
Teste 8	65	55	67	80	75	63	74,5	71,5	73,5	76	73	63	83	85	72
Teste 9	56	62	56	73	65	64	65,5	75,5	79,5	82	69	79	81	74	81
Teste 10	64	60	68	75	75	73	80,5	83,5	69,5	70	64	81	67	73	67
Média	65,8	61,7	65,1	73,7	73,7	67,5	73,9	75,8	69,4	76,3	70,8	75,1	76,6	74,2	72,3
Desvio Padrão	4,4	2,84	5,08	4,04	4,96	5,8	4,44	4,36	4,9	3,96	5,56	4,88	2,96	4,28	4,16
Dureza	64,2			71,63			73,03			74,07			74,37		

A dureza do compósito RPs, aparentemente, está relacionada com o tamanho e a quantidade de partículas dispersas na matriz polimérica GARBACZ, et.al (2024) o que também foi confirmado por Padilha (2000) o qual observou que a dureza e as propriedades mecânicas de um compósito estão intrinsecamente relacionadas ao seu conjunto matriz/fase dispersa. Observa-se que a incorporação de partículas duras e rígidas a uma matriz dúctil contribui para a melhoria significativa das propriedades mecânicas do material final.

A composição mineralógica das partículas desempenha um papel fundamental na dureza e, conseqüentemente, nas propriedades do compósito (LOPES, 2019).

Neste estudo, observou-se que o aumento da proporção de areia contribuiu para a elevação da dureza, provavelmente devido a uma distribuição mais eficiente das partículas na matriz.

Também fica claro que apesar do crescimento da dureza ser não linear, ele tende a se estabilizar em valores de enchimento mais elevados. Garbacz et al. (2024) corroboram essa observação, indicando que a estabilização ocorre quando a proporção de areia atinge cerca de 60%, o que reflete uma homogeneidade ideal do compósito.

#### 4.3.2 Densidade dos tijolos RP/A

A densidade de um compósito é um parâmetro crítico, dependente do grau de cristalinidade dos polímeros termoplásticos e, em particular, da fração volumétrica de suas fases cristalinas. Quanto maior essa fração, maior será a densidade do material. Os materiais cerâmicos, de modo geral, são mais densos que os poliméricos. Para eles, a densidade é praticamente independente da microestrutura, desde que a estrutura cristalina e a fração volumétrica das fases presentes sejam mantidas constantes (FRASCA; PARAGUASSU, 2017).

Na Figura 30 é possível aferir que a densidade dos compósitos aumentaram em função do aumento do teor de areia uma vez que areia é mais densa que o polímero.

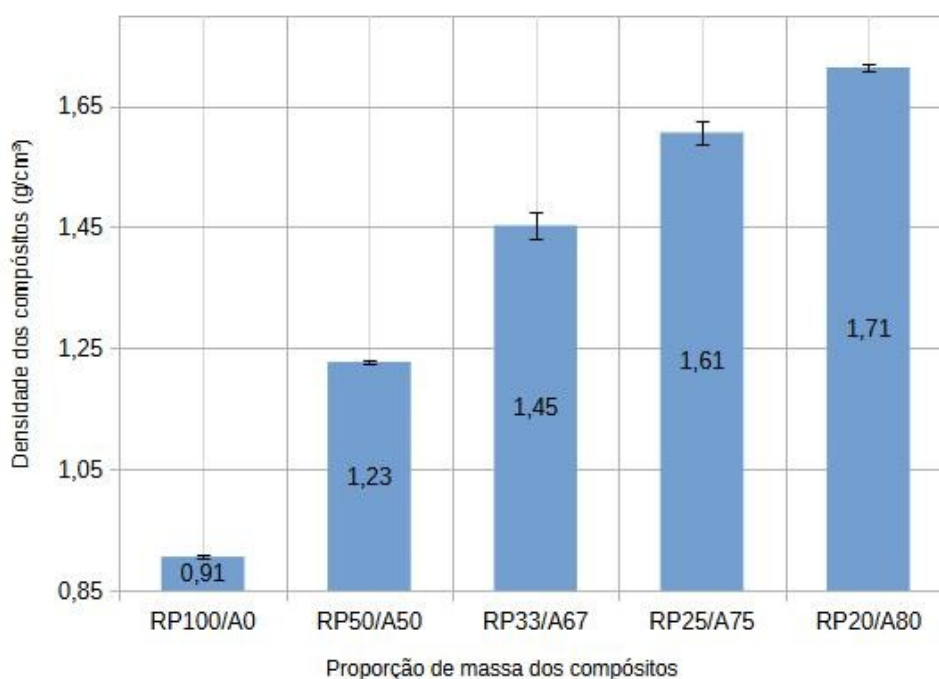


Figura 30: Curva da densidade do tijolo em função da proporção dos materiais.

A menor densidade pode ser observada na amostra com 100% de resíduo plástico,  $0,91 \text{ g/cm}^3$ . Já a amostra com 80% areia utilizada apresenta a maior densidade ( $1,71 \text{ g/cm}^3$ ). Variação semelhante também foi verificada por Garbacz, que testou PP e areia encontrando a máxima densidade ( $1,81 \text{ g/cm}^3$ ) com o maior teor de areia (GARBACZ et. al, 2024).

Gouden et al. (2024), ao misturar areia com resíduos de PEAD, observaram que a densidade do compósito aumentava com o acréscimo de areia e a concomitante redução do teor de polímero. Tais resultados corroboram as observações deste estudo, sugerindo que a adição de cargas reduz os vazios da matriz polimérica. Esse aumento na densidade dos compósitos pode, por sua vez, impactar positivamente suas propriedades mecânicas.

#### 4.3.3 Absorção de água dos tijolos RP/A

A Figura 31 ilustra a determinação do índice de absorção de água dos compósitos em função da proporção de seus materiais componentes. O tijolo composto por 100% de RPs obteve uma absorção média de 0,29% em relação ao seu peso, demonstrando a baixa proporção de água retida em um intervalo de 24 horas. Já o tijolo com 80% de areia e 20% de plástico apresentou uma média de 0,14% de absorção.

De forma geral, a absorção de água não excedeu 1% em nenhuma das composições analisadas. Esse resultado é particularmente relevante, pois, de acordo com Solomon et al. (2023), tijolos de RPs com adição de areia que apresentam absorção de água inferior a 0,70% podem ser considerados com índice de absorção nulo. Essa característica confere aos tijolos uma maior resistência em temperaturas baixas, uma vez que não serão afetados por danos causados pelo congelamento.

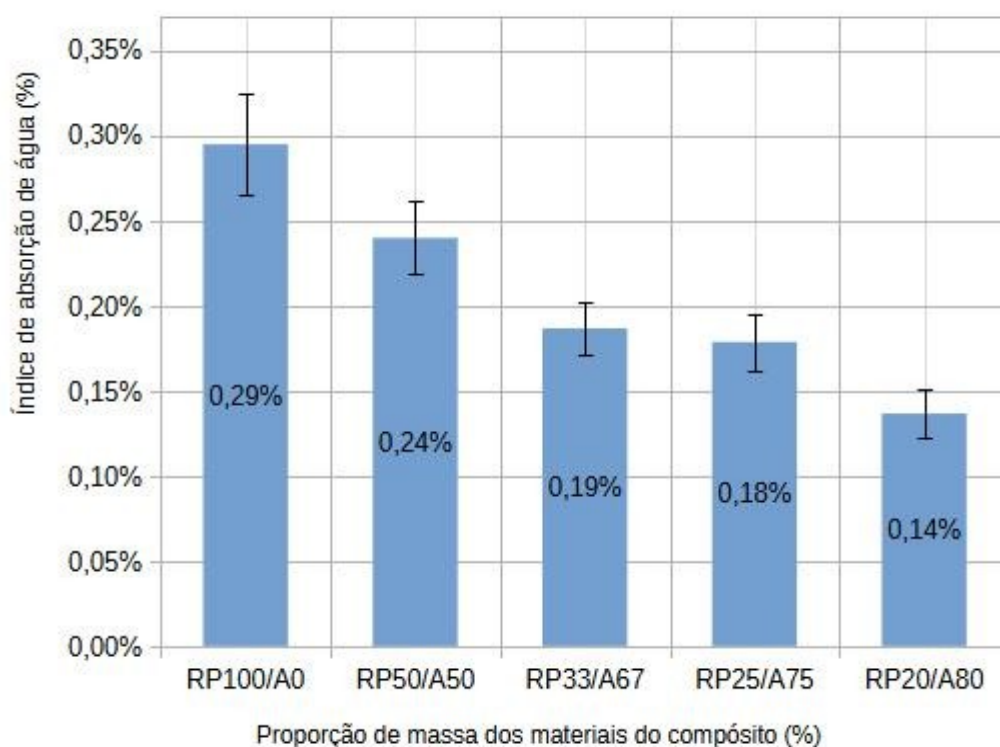


Figura 31: Determinação do índice de absorção de água dos tijolos em função da composição.

O ensaio de absorção de água revelou uma variação entre 0,15% e 0,31% nos compósitos, resultados que corroboram os achados de Padilha (2000) e de outros estudos. Segundo o autor, índices tão baixos de absorção se devem à estabilidade dos polímeros em meios líquidos, como água e soluções inorgânicas ácidas ou básicas, e também em atmosferas agressivas. No entanto, é importante destacar que mesmo os polímeros como o polietileno absorvem pequenas quantidades de água (cerca de 0,1% a 0,2% em 24 horas de exposição) (PADILHA, 2000).

De acordo com Sahani et al. (2022), a absorção de água em tijolos de areia/plástico é considerada nula, independentemente da proporção de polímero termoplástico. Essa característica, associada à ausência de eflorescência, é atribuída à natureza hidrofóbica do plástico, que repele as moléculas de água.

Além disso, a boa interação entre a areia e o polímero resulta em um mínimo de vazios dentro do tijolo, o que impede uma absorção significativa.

Essas observações são complementadas pelos estudos de Hamzah e Alkhafaj (2022), que relatam que o aumento da quantidade de areia no compósito diminui a absorção de água.

Eles sugerem que, à medida que a porcentagem de areia aumenta, ocorre um preenchimento dos vazios na massa polimérica. Embora pequenas quantidades de areia se dispersem entre as cadeias poliméricas, um aumento maior na proporção leva à aglomeração dos grânulos, que são envolvidos pelo polímero, fechando os poros e, assim, reduzindo a absorção (HAMZAH; ALKHAF AJ, 2022).

De forma semelhante, Aneke e Shabangu (2021) também relatam que a adição de areia à matriz polimérica reduz os espaços porosos e, conseqüentemente, a absorção de água, devido à boa interação entre os materiais.

De acordo com Agyeman et. al (2019), a baixa capacidade de absorção de água inerente aos RPs viabiliza a produção de blocos de pavimentação para aplicações de baixa carga. Esses blocos são particularmente adequados para ambientes úmidos ou alagados, como calçadas, quadras e áreas de edifícios, em que a resistência à água é um requisito funcional.

Os resultados obtidos neste estudo estão em total conformidade com as conclusões dos pesquisadores apresentados, confirmando que o compósito formado pela matriz polimérica de RPs e areia possui baixa permeabilidade e absorção de água, uma característica atribuída, principalmente, à presença de polímeros semicristalinos.

#### 4.3.4 Resistência mecânica à compressão dos tijolos RP/A

A Figura 32 ilustra um corpo de prova após ruptura por compressão. A coleta de dados foi iniciada em 0,3 mm, uma deformação considerada aceitável para a maioria das aplicações, conforme demonstrado por Koppula e Schuster (2023).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 7 e na Figura 33, os corpos de prova com 100% de RPs exibiram as maiores deformações antes da ruptura, seguidos pelas amostras com 50% e 33% de RPs, respectivamente. Isso sugere que uma maior proporção de RPs confere maior ductilidade ao compósito. Em contrapartida, a resistência à compressão aumenta com o teor de areia (HAMZAH; ALKHAF AJ, 2022). A resistência à compressão é determinada principalmente pela concentração da areia, que atua como fase

dispersa, sendo mais dura e resistente do que a fase contínua e funcionando como material de reforço. A geometria do reforço também é um parâmetro fundamental para determinar a eficácia do compósito (VERMA et al., 2013).

Entre as proporções testadas, o corpo de prova A3 (25% RPs e 75% areia) atingiu o maior valor de resistência à compressão, com uma média de 33,40 MPa e um valor individual de 40 MPa (Tabela 9). Esse resultado, na mesma proporção, é comparável, e em muitos casos até superior, aos valores reportados na literatura para tijolos compósitos de RPs, se comparado a extensa revisão de SINGH et al. (2023), aos 30 MPa obtidos por Jayaram et al. (2021) e aos 13 MPa de Chauhan et.al, (2019).



Figura 32: Compósito sendo testado à compressão.

Tabela 9: Resistência à compressão dos compósitos, em função da proporção de areia

Mistura RPs/areia (%)	Proporção RPs/Areia (massa)	A0	A1	A2	A3	A4	Desvio Padrão	Resistência à compressão (média) (MPa) f (x)	$X = a + 1$  a = areia
100/0	1:0	19	18	21	18	27	3,8	20,6	1
50/50	1:1	33	26	25	30	34	4,0	29,6	2
33/67	1:2	30	33	26	31	30	2,5	30,0	3
25/75	1:3	29	35	29	34	40	4,6	33,4	4
20/80	1:4	36	37	39	28	26	5,8	33,2	5

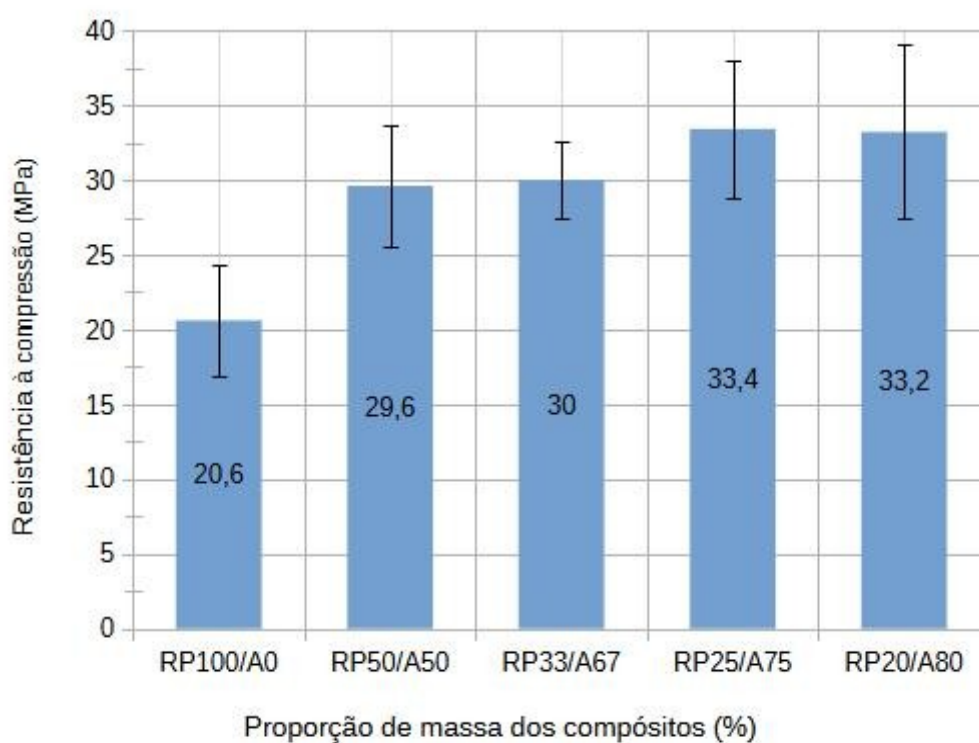


Figura 33: Resistência à compressão em função da proporção de RPs e areia.

Aparentemente a adição da areia como reforço da matriz polimérica contribuiu com o aumento da resistência mecânica do compósito pois à medida que houve o incremento de areia, a resistência à compressão também aumentou em relação ao RPs puro, que apresentou a menor resistência (20,6 MPa).

Kumi-Larba e colaboradores, em seus estudo verificaram que os resíduos plásticos fundidos ao envolverem os grãos de areia, conferem a função aglutinante proporcionando a adesão entre o par areia/polímero com um resultado de resistência à compressão de 27,3 Mpa, quando utilizaram 25/75 respectivamente de polímero e areia. Observaram que a areia estava totalmente envolvida pelo polímero fundido, promovendo uma ótima interação interfacial entre as partículas, o que ocasionou um menor índice de vazios (KUMI-LARBI JR et al., 2018; GOUDEN et. al, 2023).

No gráfico da Figura 33 se observa que as proporções de 1:3 e 1:4 RPs/A, tendem a estabilizar a resistência à compressão, e que possivelmente teores menores que 20% de polímero, podem acarretar a diminuição da resistência uma vez que a falta de polímero pode prejudicar a interação interfacial entre o polímero areia deixando o compósito frágil.

Ikechukwu e colaboradores observaram que a proporção de resíduo plástico menor que 20%, apresenta uma tendência de perda da conexão interfacial das partículas, mesmo com o aumento da densidade, pois verificaram que 'a densidade dos tijolos pode estar relacionada à sua resistência, mas não de maneira direta e invariável' o mesmo sendo observado por GOUDEN et. al, (2024) e IKECHUKWU; SHABANGU, (2021).

Um dos resultados mais significativos deste trabalho é a alta resistência à compressão (33,4 MPa) alcançada utilizando uma matriz polimérica composta por uma mistura heterogênea e não triada de RPs, predominantemente PE e PP. Este resultado é particularmente notável, pois contraria um dos maiores desafios da reciclagem mecânica: a imiscibilidade entre poliolefinas. Conforme detalhado por Schyns & Shaver (2021), a mistura de PE e PP normalmente resulta em um material com fases separadas e baixa adesão interfacial, comprometendo o desempenho mecânico.

Além da alta resistência, a significativa economia de tempo no processo de fabricação é uma vantagem adicional, pois o compósito de RPs atinge mais de 80% de sua resistência final em apenas um dia .

A hipótese para o sucesso do compósito aqui desenvolvido é que a presença da areia como carga majoritária (75%) altera fundamentalmente a dinâmica do sistema. A matriz polimérica funciona como um filme fino que encapsula e une as partículas. Neste arranjo, a adesão na interface polímero areia torna-se mais crucial do que a coesão entre as fases poliméricas imiscíveis, permitindo que o compósito atinja alta resistência.

#### 4.3.4.1 Resistência máxima teórica $f(x)$ em função da proporção de areia

Em posse dos resultados apresentados na Tabela 9, foi possível traçar uma linha de tendência e obter uma relação, com a ressalva de ser específica para esse trabalho, entre o teor de areia e de resíduos plásticos com a resistência à compressão, expressa pelas equações 8 e 9,

$$f(x) = -1,117x^2 + 9,615x + 12,8 \quad \text{Equação 8;}$$

e

$$x = a + rp \quad \text{ou} \quad x = a + 1 \quad \text{Equação 9;}$$

Onde,

$f(x)$  = resistência à compressão do compósito;

$x$  = proporção total dos materiais (areia e resíduo plástico);

$a$  = número de partes de areia em relação a proporção total dos materiais;

$rp = 1$  = proporção de resíduo plástico pré fixada no estudo;

A Equação 8 resultou em um  $R^2 = 0,995$  (fator de correlação) próximo de 1 (um), confirmando a relação entre a porcentagem de materiais (%) e resistência à compressão (MPa).

A principal finalidade da Equação 8 e 9, foi obter a proporção de areia ( $a$ ), que geraria a resistência máxima teórica  $f(x)$  para o presente estudo. Mantendo a proporção de RPs constante em 1, seria possível chegar a 76,5% de areia no compósito (1:3,3), resultando na resistência teórica de 33,5 MPa. A partir desse ponto, possivelmente a resistência reduzirá progressivamente, com o aumento da proporção de areia, devido à insuficiência do volume e espessura da pasta de RPs, que encapsula e une os grãos de areia.

A insuficiência de aglomerante causa deficiência de aderência entre os grãos e a formação de bolsões de ar, que facilitam a ruptura por cisalhamento e diminuem a resistência à compressão (KUMI-LARBI JR et al., 2018), (HAMZAH; ALKHAF AJ, 2022).

Aparentemente a areia atua como reforço eficaz, conferindo maior resistência conforme aumenta seu acréscimo à matriz polimérica, uma vez que os polímeros são frequentemente modificados ou preenchidos pela adição de outros materiais na forma de

partículas com a finalidade específica de aumentar a resistência mecânica ou rigidez (PADILHA, 2000).

A granulometria da areia fina, também pode ter contribuído com o bom desempenho mecânico do compósito, visto que Segundo Ikechukwu e colaboradores, constataram, ao testar vários tamanhos de partículas de vidro em matriz polimérica e constataram que quanto menor o diâmetro das partículas dispersas, maior será a resistência mecânica do compósito devido a menor ocorrência de vazios.

Eles também verificaram a influência direta entre a proporcionalidade dos materiais do compósito e a sua porosidade na determinação da resistência pois obtiveram os maiores resultados com as maiores proporções do enchimento (1:3) (IKECHUKWU; NAGHIZADEH, 2021; IKECHUKWU; SHABANGU, 2021).

Resultado muito semelhante obteve Worku e colaborador (2021) quando também usou vidro triturado em vez de areia e concluiu que a resistência à compressão do compósito aumenta com o acréscimo da porcentagem de enchimento devido à alta rigidez do mesmo.

O enchimento aumentará a rigidez geral do material. Embora a matriz do polímero se deforme com a carga, o enchimento que é altamente mais rígido, suportará maior carga do que a matriz polimérica e conseqüentemente aumentará a resistência à compressão do material composto (WORKU; WUBIENEH, 2021) o que é extremamente promissor e correlato já que o vidro quando descartado, assim como o RP, é por vezes desprezado, quando poderia substituir a areia por ter a origem química muito semelhante (LIOTTO; SANTANA, 2020).

#### 4.3.4.2 Relação tensão deformação dos tijolos RP/A

Uma vantagem fundamental do compósito desenvolvido, que transcende a sua resistência à compressão, é o seu comportamento de ruptura dúctil, em nítido contraste com a fragilidade de materiais cerâmicos e cimentícios que apresentam ruptura abrupta. Esta ductilidade foi evidenciada pela clara deformação pós-pico observada nos ensaios de compressão descrita na Figura 34. O mesmo também foi verificado por Aneke e Shabangu (2021) e Ikechukwu e Naghizadeh (2021).

Aparentemente, a ductilidade do compósito é atribuída à natureza viscoelástica da matriz polimérica (RPs), que confere ao material a capacidade de absorver energia e

deformar-se plasticamente antes de uma falha completa. Esse comportamento de endurecimento por deformação é o que permite ao material resistir ao alongamento, mesmo após atingir sua tensão máxima, uma característica notada por Ikechukwu e Shabangu, (2021). Este princípio é análogo ao observado por Sultana e Prasad (2012) na modificação de ligantes asfálticos, onde o plástico aumenta a coesão e a resiliência do sistema.

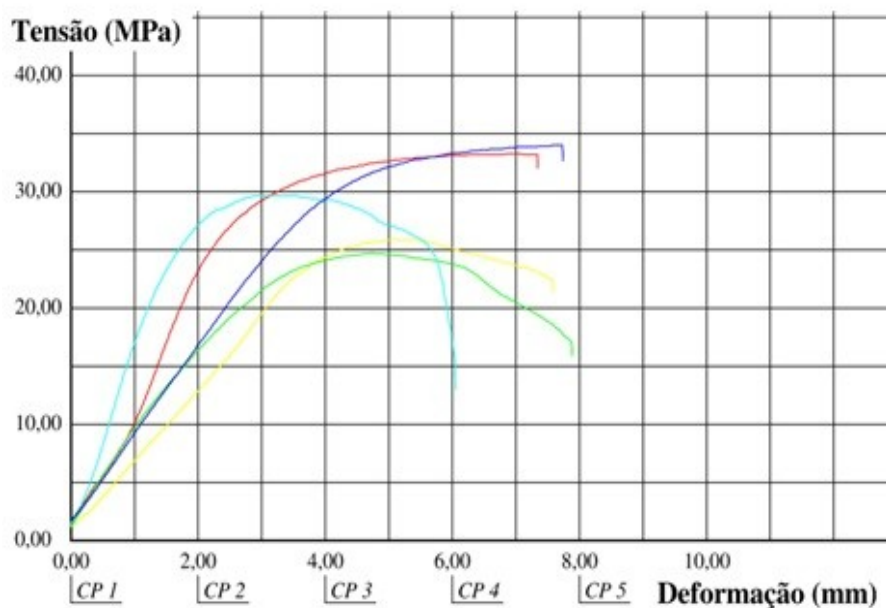


Figura 34: Relação tensão deformação dos corpos de prova do compósito (1:1) demonstrando seu comportamento viscoelástico

Fonte: a autora

Esta característica se traduz em maior segurança e estabilidade estrutural. A distribuição aleatória e as porcentagens adequadas dos RPs derretidos na matriz criam múltiplos planos de ductilidade que redistribuem as tensões. Com isso, uma alvenaria construída com este material teria uma capacidade superior de redistribuir tensões (Figura 35/A), sob condições adversas como impactos, vibrações ou pequenos movimentos sísmicos, deformando lentamente (Figura 35/B) e evitando uma falha súbita e catastrófica como nas estruturas rígidas (Figura 35/C).

Este comportamento resiliente é uma característica marcante de compósitos de matriz polimérica, que demonstram alta capacidade de deformação antes da ruptura (KUMI-

LARBI JR et al., 2018). De forma prática, a estrutura poderia deformar mantendo-se estável por um tempo maior, possibilitando uma evacuação segura.

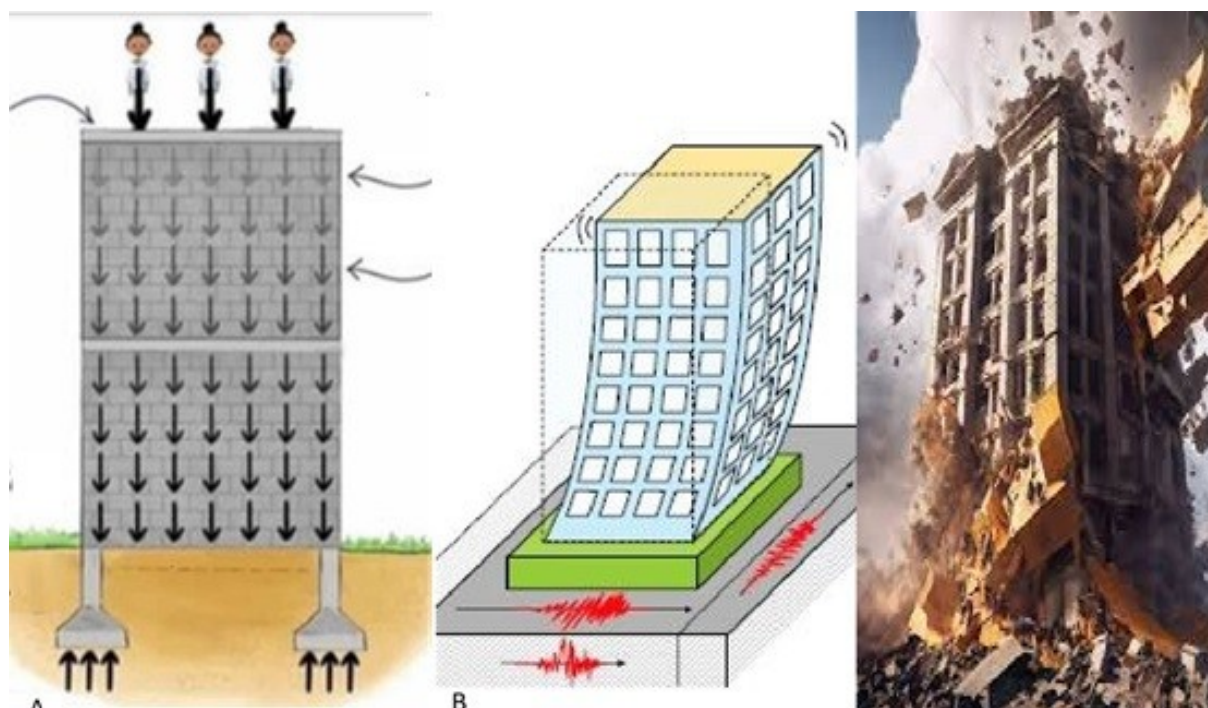


Figura 35: Comportamento das estruturas: A) Distribuição das tensões; B) Deformação dúctil, frente às adversidades e C) Estrutura rígida e ruptura abrupta.

Fonte: autora

#### 4.3.5 Espectroscopia de infravermelho dos tijolos RP/A

A Figura 36 é apresenta os espectros de infravermelho da areia, RP e os compósitos. Observa-se que o pico mais intenso ocorre entre  $3000$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$ , nos compósitos s e resíduos poliméricos. Isso confere com a observação de Appiah e colaboradores, que verificaram que a intensidade dos estiramentos e dobramentos observados, variam de acordo com o do tipo de polímero e da proporção de mistura do compósito (APPIAH; BERKO-BOATENG; TAGBOR, 2017). Nas análises espectrométricas observa-se nos compósitos, picos entre  $1471,99\text{ cm}^{-1}$  e  $1376,23\text{ cm}^{-1}$  que sugerem que o polietileno e o polipropileno são os principais constituintes dos resíduos plásticos desde o  $-\text{CH}_2$  e  $-\text{CH}_3$ .

Tulashie e colaboradores (2020), também observaram o mesmo e sugerem que é viável combinar pó de pedra com resíduos termoplásticos para formar blocos para pavimentação.

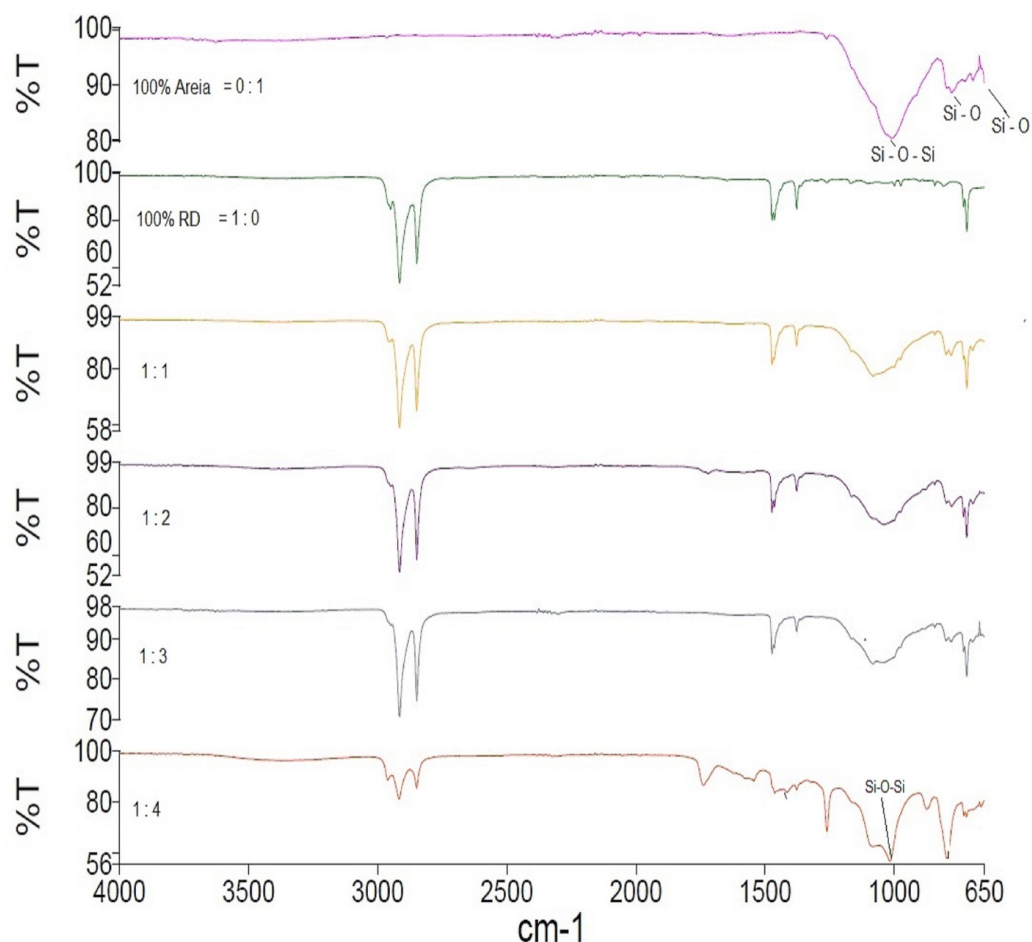


Figura 36: Espectros infravermelhos da areia, dos (RPs) e dos compósitos, em todas as porcentagens testadas.

#### 4.3.6 Termogravimetria (TGA) dos tijolos RP/A

O ensaio de termogravimetria (TGA) permitiu a avaliação da degradação térmica dos materiais através da variação da massa da amostra durante os ciclos de temperatura.

Na Figura 37 é apresentada a curva de TG/DTG da matriz polimérica, amostra do tijolo 100% de resíduo polimérico (1:0), onde pode-se observar que o material não apresenta mudança em sua massa até a temperatura de 454°C. A partir dessa temperatura, observa-se uma diminuição acentuada de sua massa inicial. Nesse intervalo de temperatura, a amostra perde 97% de sua massa inicial, devido à degradação do polímero.

A temperatura onde a velocidade de degradação do polímero foi máxima, medida no pico da curva DTG, foi de 490°C.

Nas Figuras 38 a 41, constam as curvas de TG/DTG dos compósitos produzidos. As temperaturas iniciais de degradação foram consideradas a partir da intersecção entre a tangente da curva de degradação e a linha base.

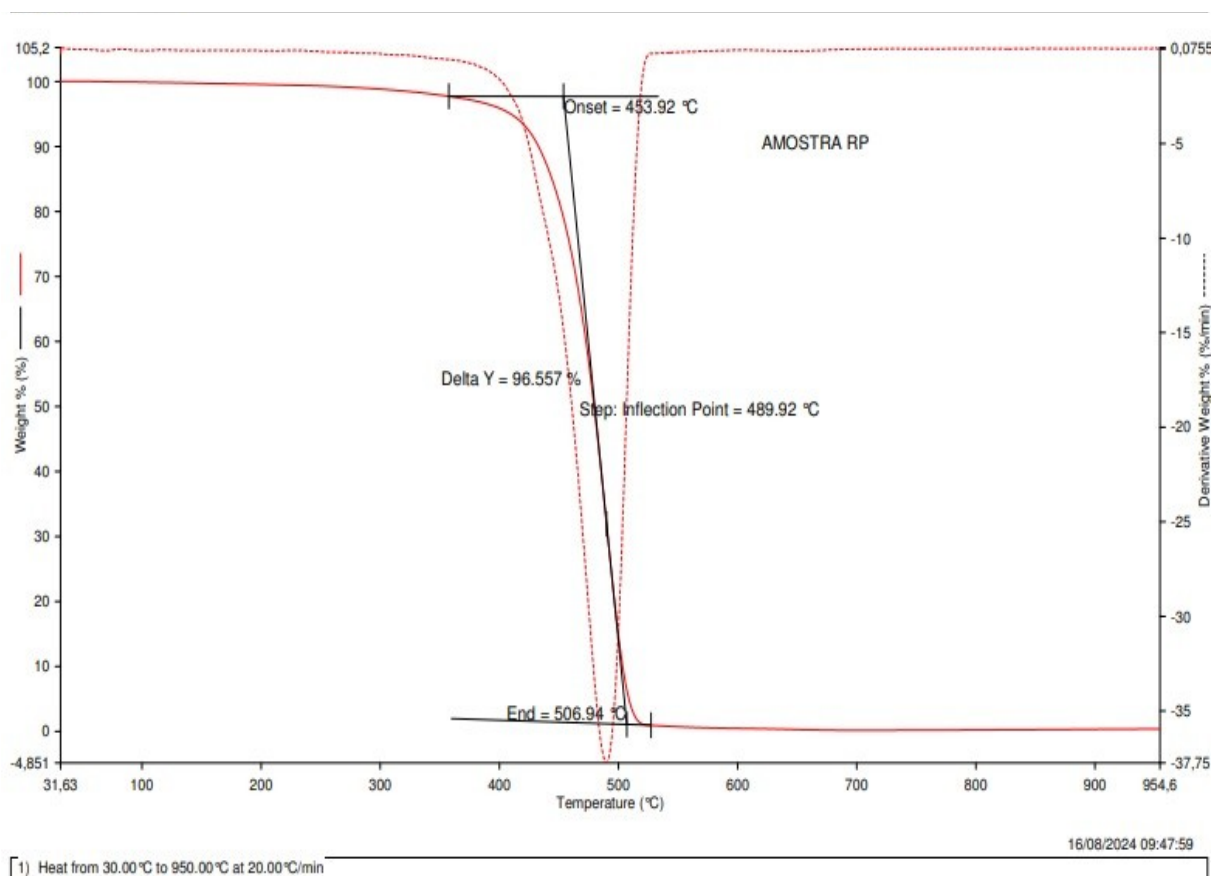


Figura 37: Curva TG e sua derivada, para a amostra do tijolo 100% de resíduo polimérico 1:0.

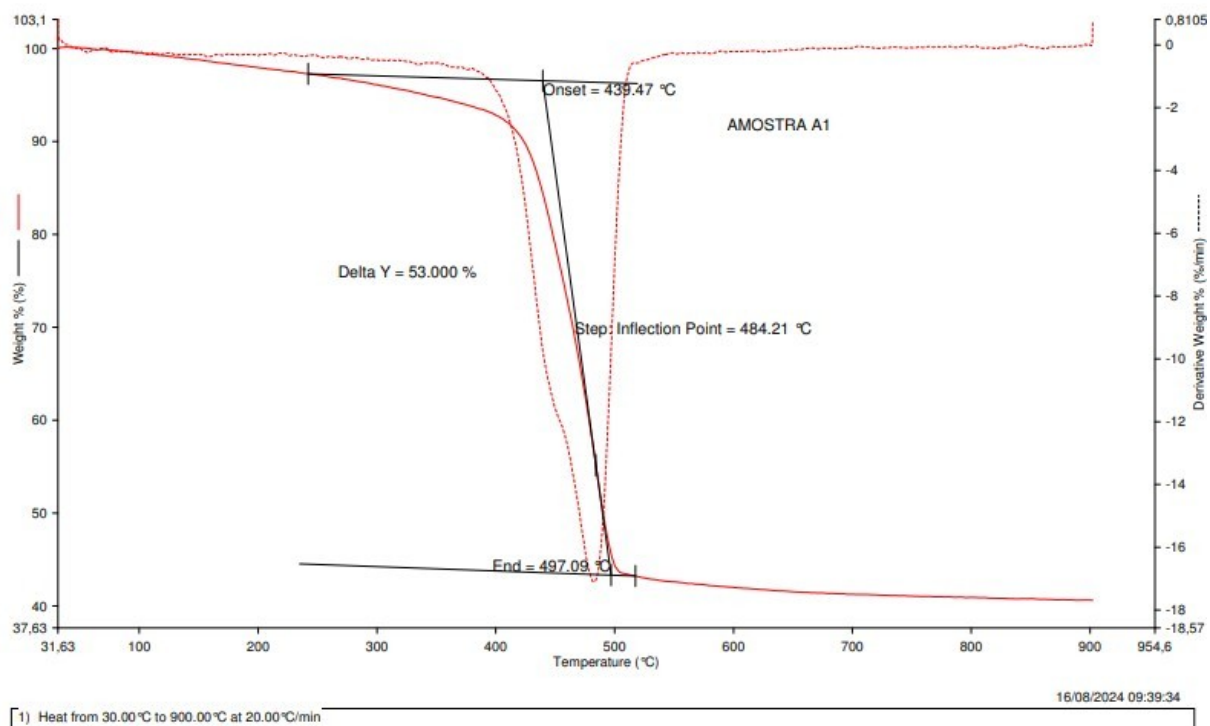


Figura 38: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia na proporção 1:1.

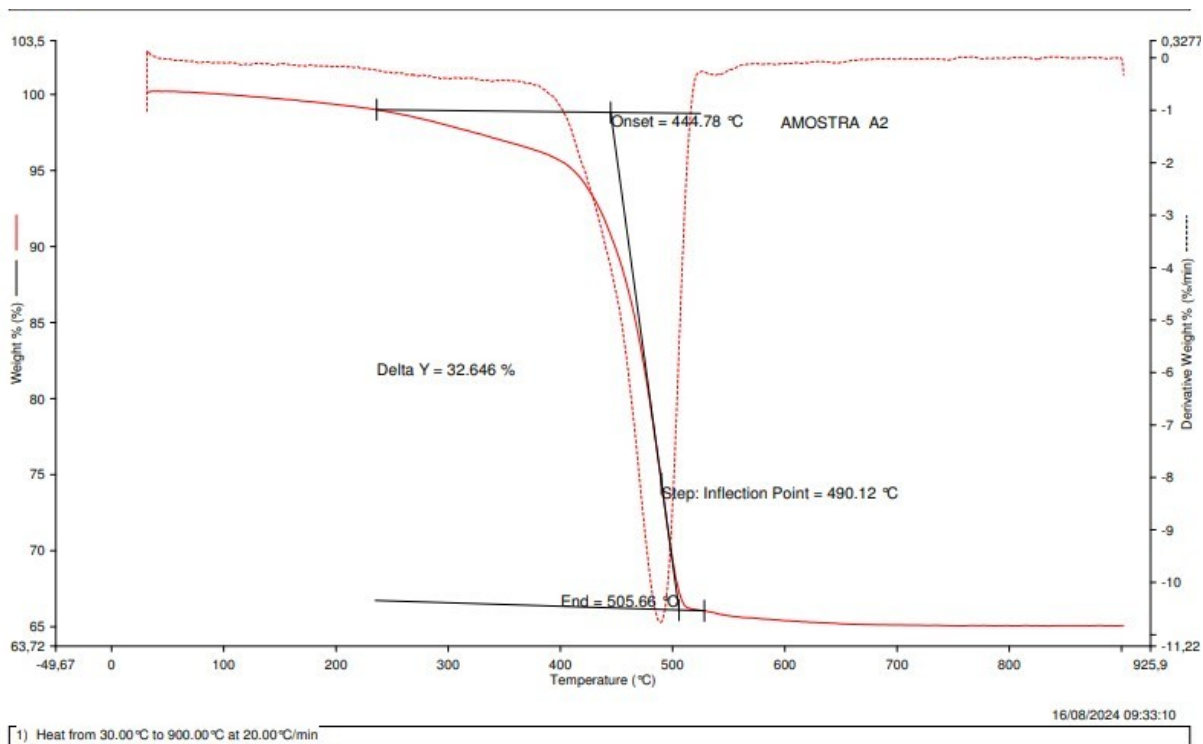


Figura 39: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia, na proporção 1:2.

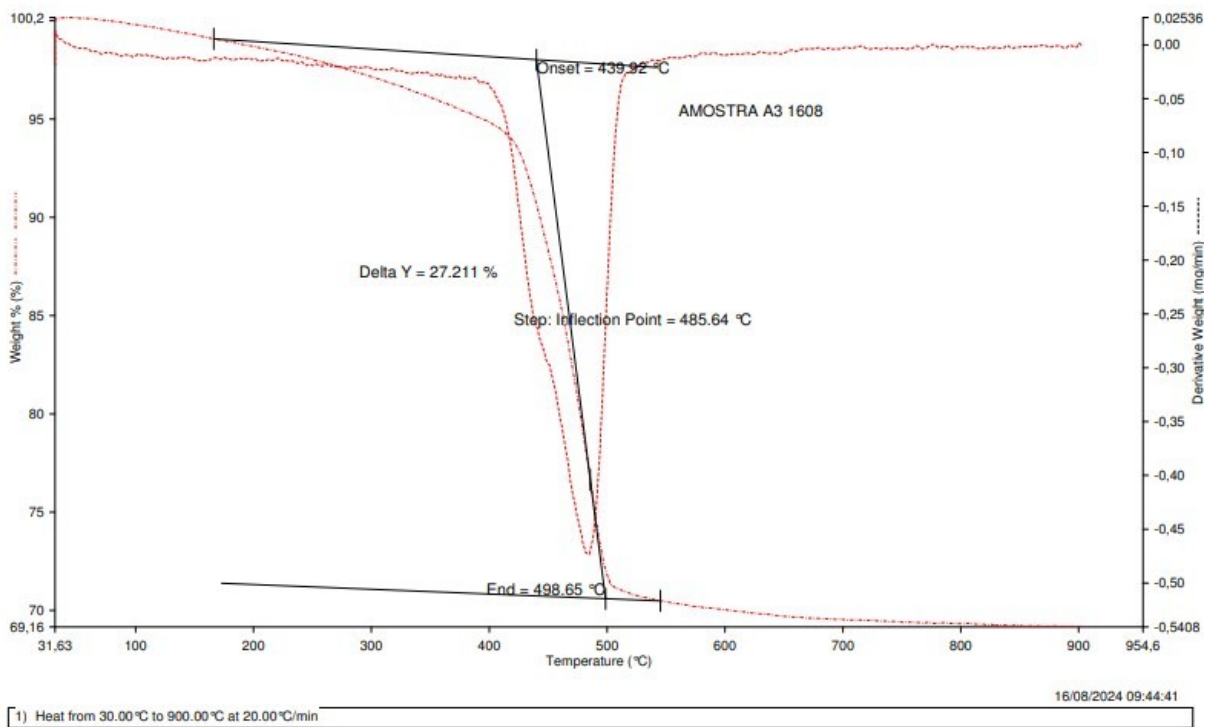


Figura 40: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia na proporção 1:3.

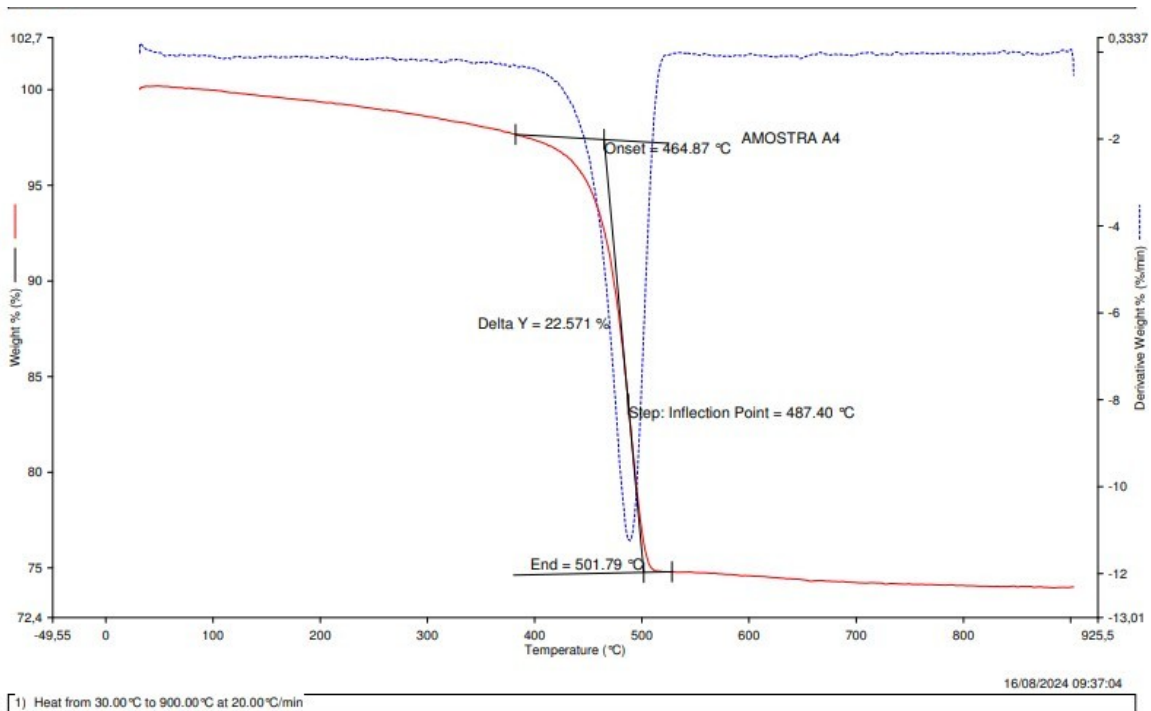


Figura 41: Curva TG e sua derivada, do compósito RP e areia na proporção 1:4.

Na Tabela 10 é possível verificar que a areia não interfere na estabilidade térmica do polímero, independentemente da proporção de areia adicionada.

Tabela 10: Resultados da análise termogravimétrica dos compósitos

Proporção de massa das amostras (RPs : A)	<b>1:0</b>	<b>1:1</b>	<b>1:2</b>	<b>1:3</b>	<b>1:4</b>
Temperatura inicial de degradação (Onset) (°C)	454	440	445	440	465
Temperatura no máximo da derivada (Step) (°C)	490	484	490	486	487
Temperatura final de degradação (End) (°C)	507	497	506	499	502
Perda de massa do polímero (%)	97	53	33	27	22
Variação de massa residual (%)	3	47	67	77	88

#### 4.3.7 Morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os aspectos morfológicos das superfícies de fratura dos compósitos são mostrados nas figuras seguintes.

Na Figura 42, as superfícies de fratura dos compósitos apresentam evidências da presença de grãos de areia (seta vermelha). Os compósitos apresentam boa distribuição das partículas de areia na matriz polimérica, não se observa vazios intersticiais nas misturas, possivelmente devido à aderência do polímero fundido nos grãos de areia e o ancoramento mecânico das partículas na matriz pode ser evidenciado pelas partes brilhantes arredor dos grânulos.

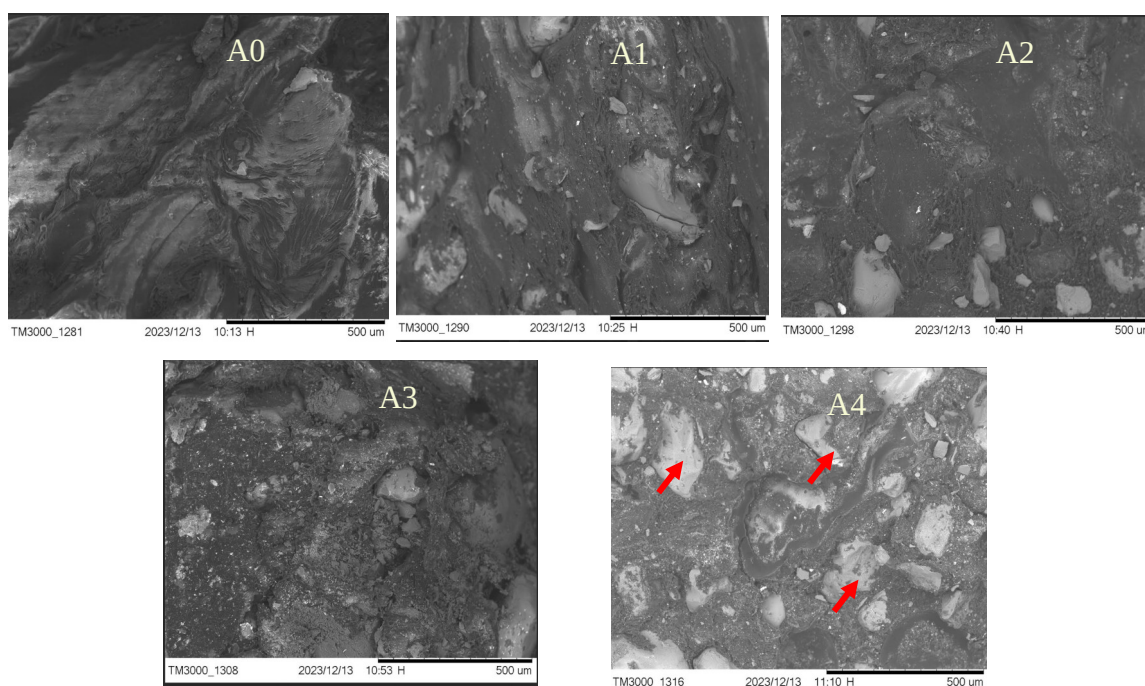


Figura 42: Micrografia de fratura, dos resíduos poliméricos fundidos (A0) e de seus compósitos (A1;A2;A3 e A4) ampliados 150 X.

Na Figura 43 se observa pequenas partículas dispersas no polímero fundido, possivelmente devido a contaminação do resíduo polimérico uma vez que o mesmo é resíduo de descarte podendo ter contaminação por termorrígidos, grânulos metálicos ou cargas de enchimento, setas amarelas. Na análise de TGA se observou que o resíduo polimérico apresentou um resíduo após 900 °C de 3 %, podendo ser esta contaminação que se observa na micrografia.

As morfologias das superfícies de fratura dos compósitos mostraram uma larga distribuição do tamanho de partículas de areia, o que já era esperado. O tamanho da partícula da areia deve ser levado em consideração, como também a sua interação com a matriz, por serem fatores importantes no comportamento mecânico, quanto menor o tamanho da partícula mais efetiva é a sua atuação como reforço para os compósitos (HAMZAH e ALKHAFI,2022).

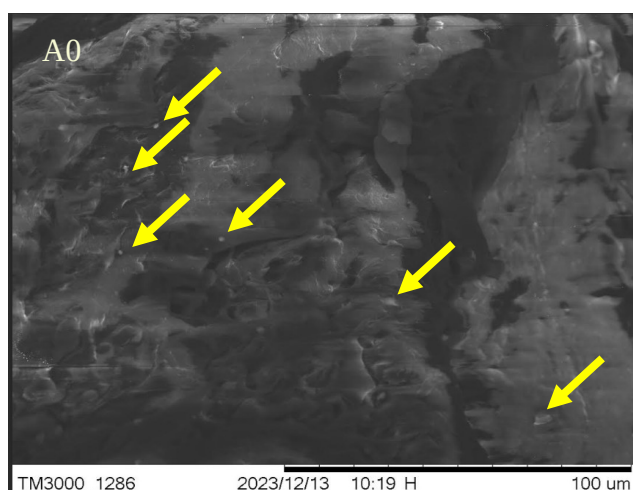


Figura 43: Micrografia de fratura do tijolo de resíduos plásticos ampliado 5000X.

#### 4.3.8 Desempenho dos tijolos RP/A em função dos requisitos de norma

Como a análise da literatura indica, a resistência à compressão do compósito é diretamente influenciada pela proporção de areia, que atua como principal material de reforço. Em contrapartida, a ductilidade do material é uma propriedade dependente da porcentagem de resíduos poliméricos na matriz.

Dessa forma, fazendo uma correlação com o maior valor de resistência a compressão, requerido pela norma tal na Tabela 6 (14 MPa), é possível aferir que as proporções 1:1 ou 1:2 (RP/A), já oferecem desempenho mecânico superior (29,6 MPa e 30 MPa), maximizam a utilização de RPs e sua capacidade de distribuição de tensões, proporcionando maior estabilidade estrutural.

No entanto, se o escopo do projeto priorizar a máxima resistência mecânica pelo menor custo ou ainda, no caso da alta disponibilidade do agregado particulado em detrimento aos RPs, a proporção de 1:3 (33,4 MPa) desponta como a melhor opção.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, o desenvolvimento de um compósito à base de areia e resíduo polimérico misto demonstrou ser uma alternativa viável para a fabricação de tijolos sustentáveis de alto desempenho, alinhados com a temática da economia circular.

A pesquisa validou a possibilidade de utilizar resíduos plásticos mistos pós-consumo como aglutinante, que não apenas contribuem para a redução de custos e de impacto ambiental, mas também conferem ao material propriedades mecânicas desejáveis e superiores as exigências das normas para tijolos.

A análise do compósito revelou que o aumento da proporção da carga de areia resulta em um material mais resistente e rígido, indicando uma otimização na distribuição de tensões e uma interação eficaz entre a matriz e o reforço. As análises termogravimétricas confirmaram a viabilidade do uso dos RPs, com a degradação ocorrendo apenas em temperaturas bem acima desse limite, garantindo a estabilidade e a segurança do material em condições de uso.

Pode-se concluir que o compósito de areia e resíduos poliméricos mistos é uma solução promissora. Ele não só promove a circularidade de materiais ao transformar resíduos em produtos de valor, mas também atende aos critérios de desempenho técnico e sustentabilidade, representando um passo significativo em direção a uma construção civil mais eficiente e ecologicamente responsável.

## 6 PREVISÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, a continuidade da pesquisa com o compósito de resíduo polimérico é fundamental para a sua validação e eventual aplicação em larga escala. Nesse contexto, vislumbra-se a possibilidade de investigações futuras com foco nas seguintes propostas:

**Avaliação da durabilidade do compósito frente a radiação UV:** A exposição prolongada a intempéries, particularmente à radiação ultravioleta, pode comprometer a integridade da matriz polimérica. É crucial investigar o efeito desse fator na degradação das propriedades mecânicas e na estabilidade da cor do material.

**Determinação da energia de ativação da degradação e previsão da vida útil:** A realização de testes de envelhecimento acelerado, combinada com análises cinéticas de degradação como as equações de Arrhenius, OFW, Friedman, Coats-Redfern, Kissinger e KAS, é essencial. Isso permitirá a determinação da energia de ativação da degradação, um parâmetro crucial para prever o tempo de vida útil do compósito em condições de serviço e sua viabilidade a longo prazo (Wang et.al,2023).

**Avaliação da substituição da fase dispersa por agregados de resíduos de construção civil e termofixos:** Uma das grandes vantagens do material é a sua flexibilidade. Investigar o uso de outros agregados, como os resíduos da construção civil ou resíduos de termofixos, pode ampliar o escopo da reciclagem de materiais, contribuindo para uma solução ainda mais abrangente para a gestão de resíduos.

**Análise do desempenho em temperaturas extremas:** O desempenho do compósito em diferentes ambientes térmicos ainda não foi explorado. É relevante avaliar sua resistência em condições de congelamento e descongelamento, assim como o comportamento em altas temperaturas, o que pode influenciar sua aplicação em diferentes climas.

## 7 REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil. p. 6, 2022. Disponível em:<<https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2022abiplast/>> Acesso em: 23 abr. 2023.

ABNT. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Associação Brasileira De Normas Técnicas** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016.

ABNT. **NBR 7211 Agregados para concreto Requisitos.** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022.

ABNT. **NBR 7217: Agregados, Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987.

ABNT. **NBR 8491: Tijolo Solo Cimento, Requisitos.** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012.

ABNT. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água, Método de ensaio.** Rio de Janeiro, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio Janeiro, 2012.

ABNT, **NBR. 10545-3, “Placas cerâmicas, parte 3: determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente”.** Ass. Bras. Normas Técn., Rio Janeiro, 2020.

ABNT. **NBR 15270-1: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria (Parte 1: Requisitos).** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023.

ABNT. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria (Parte 2: Métodos de ensaio).** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023

ABNT. **NBR 16697, Cimento Portland: Requisitos.** Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018.

ABNT. **NBR 17054 Agregados Determinação da composição granulométrica Método de ensaio**. Rio de Janeiro -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download/67708/>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

AGYEMAN, S. et al. Exploiting recycled plastic waste as an alternative binder for paving blocks production. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. 1–7, 2019.

ALMSSAD, A.; ALMUSAED, A.; HOMOD, R. Z. Masonry in the Context of Sustainable Buildings: A Review of the Brick Role in Architecture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 22, p. 18, 2022.

ALVES, R. A. A. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos cerâmicos e cerâmico-poliméricos destinados a restauração de monumentos históricos fabricados em esteatito (pedra-sabão)**. [s.l: s.n.].

ANBALAGAN, G.; PRABAKARAN, A. R.; GUNASEKARAN, S. Spectroscopic characterization of indian standard sand. **Journal of Applied Spectroscopy**, v. 77, n. 1, p. 86–94, 2010.

ANEKE, F. I.; SHABANGU, C. Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. 1–13, 2021.

APPIAH, J. K.; BERKO-BOATENG, V. N.; TAGBOR, T. A. Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 1–7, 2017.

AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. 1–11, 2020.

BORIES, C. et al. Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 143, p. 186–196, 2014.

BOURGUIGNON, D. Plastics in a circular economy. **Implementing the Circular Economy for Sustainable Development**, n. September 2018, p. 1, 2018.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022. **Presidência da República**, p. 188, 2022.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Literature review: Reuse of construction and demolition waste in the construction industry. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

BUCKNALL, D. G. Plastics as a materials system in a circular economy: Plastics in the Circular Economy. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 378, n. 2176, p. 1–35, 2020.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 91–108, 2017.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2018.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 1, p. 1–15, 2009.

CHAUDHURY, R.; SHARMA, U. Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 1–8, 2023.

CHAUHAN, S. S. et al. Fabrication and Testing of Plastic Sand Bricks. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 691, n. 1, p. 1–13, 2019.

CIMEN, O. Resumo: Construção e ambiente construído na economia circular : uma revisão da literatura. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, p. 1–11, 2021.

CONAMA. **Resolução CONAMA 369/2006. RESOLUÇÃO CONAMA nº 369**, 2006. Disponível em: <[https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com\\_sisconama&view=processo&id=1584](https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=processo&id=1584)>. Acesso em: 4 mar. 2024

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 01–13, 2003.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4<sup>a</sup> ed. Harlow, England: Pearson Education, 2013.

FIRMINO, H. C. T. et al. Caracterização de compósitos particulados de polietileno de alta densidade/pó de concha de molusco. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, p. 1–12, 2017.

FONSECA, L. D. O.; MORAIS, I. L. H. Avaliação de impactos ambientais causados pela extração de argila para a indústria ceramista na região de Monte Carmelo - MG. **Revista de Geografia**, v. 39, n. 2, p. 19, 2022.

FRASCA, M. H. B. DE O.; PARAGUASSU, A. B. Caracterização de agregados e de materiais rochosos para construção. In: OLIVEIRA, A. M. DOS S.; MONTICELI, J. J. (Eds.). **Geologia de engenharia e ambiental**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo – SP: Assoc. Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2017. v. 2p. 109–126.

GARBACZ, Ł; ZBYSZYŃSKI, W; SADOWSKI, T. Modern Recycled Polypropylene Highly Filled with Sand, Analysis of Physical Properties and Interface Area of the Composite. **Analysis of Physical Properties and Interface Area of the Composite**, 2024.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, p. 1–5, 2017.

GEYER, Roland. Production, use, and fate of synthetic polymers. In: **Plastic waste and recycling**. Academic Press, 2020. p. 13-32.

GLANCEY, J. **História da Arquitetura**. [s.l.] Edicoes Loyola, 2007. v. 1

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. About silica and its particularities. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, p. 22, 2018.

GOUNDEN, K.; MWANGI, F. M.; MOHAN, T. P. A Perspective on Four Emerging Threats to Sustainability and Sustainable Development. **Earth (Switzerland)**, v. 3, n. 4, p. 1207–1236, 1 dez. 2022.

GOUNDEN, Kimendren et al. The use of recycled high-density polyethylene waste to manufacture eco-friendly plastic sand bricks. **SPE Polymers**, v. 5, n. 1, p. 20-34, 2023.

GOUNDEN, Kimendren et al. Improving the performance properties of plastic-sand bricks with Kaolin Clay. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-24, 2024.

GROTZINGER, John P.; JORDAN, Thomas H. Para entender a terra. 8. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2023.

HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. Embodied energy and carbon in construction materials. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy**, v. 161, n. 2, p. 87–98, 2008.

HAMZAH, A. F.; ALKHAF AJ, R. M. An investigation of manufacturing technique and characterization of low-density polyethylene waste base bricks. **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 724–733, 2022.

IKECHUKWU, A. F.; NAGHIZADEH, A. Conversion of auxiliary wastes for production of masonry bricks: towards conservation of natural clay. **International Journal of Applied Science and Engineering**, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2021.

IKECHUKWU, A. F.; SHABANGU, C. Strength and durability performance of masonry bricks produced with crushed glass and melted PET plastics. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. 1–15, 2021.

ISWA. O Futuro Do Setor De Gestão De Resíduos: Tendências, Oportunidades E Desafios Para a Década (2021-2030). **International Solid Waste Association**, p. 1–30, 2022.

KOPPULA, N. K.; SCHUSTER, J. Fabrication and Experimental Analysis of Bricks Using Recycled Plastics and Bitumen. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 3, p. 1–17, 2023.

KUMAR, R. et al. A review on utilization of plastic waste materials in bricks manufacturing process. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 6775–6780, 2020.

KUMI-LARBI JR, A. et al. Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks. **Angewandte Chemie International Edition**, p. 1–25, 2018.

KUMI-LARBI JNR, Alexander et al. Recycling waste plastics into plastic-bonded sand interlocking blocks for wall construction in developing countries. **Sustainability**, v. 15, n. 24, p. 16602, 2023.

KUMI-LARBI JNR, Alexander et al. Reuse of waste plastics in developing countries: properties of waste plastic-sand composites. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, n. 9, p. 3821-3834, 2022.

KUNTZ, L. K. C. **Pegada Hídrica Na Construção Civil: Uso E Impactos De Alvenarias**. SINOP, 2021.

KWAN, W. S. et al. Pore pressure generation under different transient loading histories. **NCEE 2014 – 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering**, p. 12, 2014.

LIMA, A. et al. Síntese e Caracterização de Copolímeros de Propeno. **Polímeros**, v. 22, n. 3, p. 253–259, 2012.

LIMA, W. F. DE; GUTJAHR, A. L. N.; PONTES, A. N. Environmental impacts from pottery activities in Brazilian regions. **Environmental Scientiae**, v. 3, n. 2, p. 13–17, 2021.

LIOTTO, Pedro Felix; SANTANA, Genilson Pereira. O uso do vidro em concreto: revisão. **Scientific Amazonia**, v. 9, n. 2, p. C1-C12, 2020.

LIU, W.; QIANG, Z.; ZHAO, L. Collaborative Adsorption and Flotation of N-dodecyl Ethylenediamine with Short Chain Alcohol on Quartz. **International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE**, p. 1–12, 2015.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, 2019.

MARÇAL, R. **Avaliação Da Permeabilidade Em Geomembranas De Polietileno De Alta Densidade (Pead)**. p. 32, 2012.

MIRANDA, Luana Varela; NASCIMENTO, José Wallace Barbosa do; VALDES, Julio R. Hot mix method for the manufacture of sand-polymer bricks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, p. e17410, 2023.

MORICI, E.; DINTCHEVA, N. T. Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity. **Polymers**, v. 14, n. 19, p. 1–12, 2022.

NI, Yelin et al. Toward recycling polyolefin wastes via single-step solid-state friction extrusion. **Polymer Engineering & Science**, v. 64, n. 7, p. 3379-3387, 2024.

NCUBE, L. K. et al. An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 1–25, 2021.

NETO, J. R. DE V. et al. Adsorção dos Metais Pb 2+, Cu 2+, Cd 2+ e Ni 2+ em Microplástico Polietileno Tratado com Peróxido de Hidrogênio. **Revista Virtual de Química**, p. 1–9, 2024.

NUNES, A. C. N.; RESENDE, S. DA S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha. SENAI-MG**, 2013.

OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options Organisation for Economic Co-operation and Development. **OECD publishing**, Paris: [s.n.]. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/de747aef-en>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

OJURI, O. O.; SHAI, J.; ADERIBIGBE, A. D. Spectroscopic characterization of a Nigerian standard sand: Igbokoda sand. **International Journal of GEOMATE**, v. 12, n. 29, p. 89–98, 2017.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia – Estrutura e propriedades**. Curitiba, PR: Hemus, 2000.

PAVIA, D. L. et al. **Introdução à Espectroscopia**. 5ª ed. São Paulo – SP: Cengage Learning, 2015.

POTTINGER, A. Samuel et al. Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050. **Science** 386, 1168–1173 2024.

REDDY, Simon; LAU, Winnie; TRUSTS, PEW Charitable. Breaking the plastic wave: top findings for preventing plastic pollution. **Pew Research Center** <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/articles/2020/07/23/breaking-theplastic-wave-top-findings>, Acesso em: 1 mar. 2024, v. 23, p. 2020, 2020.

ROY R, MOTTAGHI M, WOODS M, PEARCE JM. Life Cycle Carbon Emissions Savings of Replacing Concrete with Recycled Polycarbonate and Sand Composite. **Sustainability**. v. 17, n. 3, p. 839, 2025.

SAHANI, K. et al. Mechanical Properties of Plastic Sand Brick Containing Plastic Waste. **Advances in Civil Engineering**, p. 1–10, 2022.

SALEEM, JUNAID et al. Assessing the environmental footprint of recycled plastic pellets: A life-cycle assessment perspective. **Environmental Technology & Innovation**, v. 32, p. 103289, 2023.

SALES, J. G. et al. Estudo comparativo sobre a utilização de blocos sustentáveis na construção civil. **São Judas - Unimonte**, p. 1–28, 2022.

SANTOS, A. F. **Efeito da irradiação por feixes de elétrons sobre as propriedades físicas e químicas do polipropileno**. [s.l.: s.n.]. 2011.

SCHNEIDER, Cecília Maria; MOREIRAS, Sérgio Trajano Franco. Produção de tijolos cerâmicos vazados com redução da temperatura de queima. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28848-28853, 2021.

SCHYNS, Z. O. G.; SHAVER, M. P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 42, n. 3, p. 1–27, 2021.

SELVARAJU, R.; ANITHA, B.; ANANDALAKSHMI, K. Spectral studies on SIPCOT area soil samples by FTIR and X-ray diffraction methods. **NeuoQuantology**, v. 20, n. 10, p. 23, 2022.

SINAN, MAZEN; BUBSHAIT, ABDULAZIZ. Using Plastic Sand as a Construction Material toward a Circular Economy: A Review. **Sustainability**. 14. 6446. 10.3390/su14116446, 2022.

SINGH, A. et al. Utilization of Plastic Waste for Developing Composite Bricks and Enhancing Mechanical Properties: A Review on Challenges and Opportunities. **Hindawi Advances in Polymer Technology**, p. 1–24, 2023.

SODRÉ, F. F. Química de Solos: Uma introdução. **Grupo de Automação, Quimiometria e Química Ambiental (AQQUA)**, n. January 2012, p. 1–14, 2014.

SOLOMON, A. Arun; SHELTON, J. Joel; DANIEL, C. Turning low-density polyethylene plastic waste into plastics bricks for sustainable development. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SPINACÉ, M. A. DA S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65–72, 2005.

STEFANINI, R. et al. Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 4, p. 767–784, 2021.

SULTANA SK, A.; PRASAD, K. S. B. Utilization of Waste Plastic as a Strength Modifier in Surface Course of Flexible and Rigid Pavements. **International Journal of Engineering Research and Aplicações (IJERA)**, v. 2, n. 4, p. 1185–1191, 2012.

TARIQ, A. et al. Study of thermal, morphological, barrier and viscoelastic properties of PP grafted with maleic anhydride (PP-g-MAH) and PET blends. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 10, p. 11, 2020.

TULASHIE, Samuel Kofi et al. Plastic wastes to pavement blocks: A significant alternative way to reducing plastic wastes generation and accumulation in Ghana. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118044, 2020.

USP **Propriedades Físicas Do Solo**. São Paulo, SP, Brasil, 2010. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2749790/mod\\_resource/content/1/Apostila\\_LSN\\_310\\_Física do Solo.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2749790/mod_resource/content/1/Apostila_LSN_310_Física_do_Solo.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2024

VERMA, A. et al. Manufacturing of Brick by Waste Plastic. **International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)**, v. 9, n. 6, p. 2456–1290, 2022.

VERMA, D. et al. Coir fibre reinforcement and application in polymer composites: A review. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 4, n. 2, p. 263–276, 2013.

VOET, V. et al. **Plastics in the Circular Economy**. 1<sup>a</sup> ed. Berlin, Germany: Gruyter, 2021. v. 1

VOLKOV, D. S.; ROGOVA, O. B.; PROSKURNIN, M. A. Temperature dependences of ir spectra of humic substances of brown coal. **Agronomy**, v. 11, n. 1822, p. 26, 2021.

WANG, Yang et al. A review of degradation and life prediction of polyethylene. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 3045, 2023.

WANG, Z.; PRAETORIUS, A. Integrating a Chemicals Perspective into the Global Plastic Treaty. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 9, n. 12, p. 1000–1006, 2022.

WU J, YE X, CUI H. Recycled Materials in Construction: Trends, Status, and Future of Research. **Sustainability**. v. 17, n. 6, p. 2636, 2025.

WORKU, B. G.; WUBIENEH, T. A. Mechanical Properties of Composite Materials from Waste Poly(ethylene terephthalate) Reinforced with Glass Fibers and Waste Window Glass. **International Journal of Polymer Science**, v. 2021, p. 1–14, 2021.

WWF. Solving plastic Pollution: Transparency and Accountability. **WWF – World Wide Fund For Nature**, p. 1–50, 2019.

XANTHOS, D.; WALKER, T. R. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 118, n. 1–2, p. 17–26, 2017.

YADAV, KUNDAN; SINGH, ABHINANDAN; NAZIR, OVAIS; SHARMA, R. Transforming waste into innovation: a review of plastic bricks as sustainable construction materials. **Discover Civil Engineering**. v1, n. 1, p. 38, 2024.

ZEIFMAN, L. et al. A World of 8 Billion. **United Nations Department of Economic and Social Affairs**, v. 140, n. 140, p. 1–4, 2022.