



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– DOUTORADO –

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS À BASE DE
POLIPROPILENO RECICLADO PRODUZIDO A PARTIR DE
MISTURA À QUENTE**

Por

Luana Varela Miranda

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2024



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**
– DOUTORADO –

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS À BASE DE
POLIPROPILENO RECICLADO PRODUZIDO A PARTIR DE
MISTURA À QUENTE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Luana Varela Miranda

Orientador: Prof. Dr. Givanildo A. Azeredo

João Pessoa – Paraíba


Fevereiro de 2024

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS À BASE DE POLIPROPILENO
RECICLADO PRODUZIDO A PARTIR DE MISTURA À QUENTE**


Luana Varela Miranda

Tese aprovada em 02 de fevereiro de 2024.


Período Letivo: 2023.2

Documento assinado digitalmente
 **GIVANILDO ALVES DE AZEREDO**
Data: 06/02/2024 08:39:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof(a). Dr(a). Givanildo Alves de Azeredo – UFPB
Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **NORMANDO PERAZZO BARBOSA**
Data: 23/02/2024 10:00:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Normando Perazzo Barbosa – UFPB
Examinador(a) Interno(a)


Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO LEAL PIMENTEL**
Data: 16/02/2024 11:38:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Roberto Leal Pimentel – UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA FERNANDES DE MELO**
Data: 25/02/2024 22:11:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Fernanda Fernandes de Melo – UFCG
Examinador(a) Externo(a)

Prof(a). Dr(a). José Wallace Barbosa do Nascimento – UFCG
Examinador(a) Externo(a)

Documento assinado digitalmente
 **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO**
Data: 23/02/2024 23:41:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M672d Miranda, Luana Varela.

Desenvolvimento de blocos pré-moldados à base de polipropileno reciclado produzido a partir de mistura à quente / Luana Varela Miranda. - João Pessoa, 2024.
143 f. : il.

Orientação: Givanildo A. Azeredo.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Concreto. 2. Blocos pré-moldados - Polímero. 3. Construção civil - Resistência. I. Azeredo, Givanildo A. II. Título.

UFPB/BC

CDU 691.3(043)

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

A finalização dessa tese implica em tantos agradecimentos que fica difícil de expressar em palavras minha gratidão a Deus por ter colocado pessoas tão especiais na minha jornada do doutorado. Inicialmente, agradecer aos amigos espirituais que se que me ajudaram bastante na inspiração e equilíbrio necessários para execução desse trabalho. Em segundo lugar, agradecer a minha família que sempre me apoiou e foram meu porto seguro nos momentos de medos e incertezas. À minha mãe, Giuliana, toda a minha gratidão pelo incentivo aos estudos desde tenra idade e educação que me fizeram chegar até aqui. Em especial ao professor e pesquisador Marconi Farias pela disponibilidade, colaboração e maestria na parte mecânica do experimento e desenvolvimento da fôrma do bloco polimérico, como também meu grande amor e companheiro de vida, Marrison Murilo, pela presença constante nas viagens necessárias a João Pessoa, pegando peso em laboratório e nas discussões internas em casa sobre metodologia e resultados comigo. Seu apoio é fundamental e esse título é nosso meu amor.

Assim como em todo trabalho, muitas mãos são necessárias para chegar até o topo, portanto, aqui não seria diferente. Amigos preciosos que me emprestaram seu tempo, carinho e dedicação fizeram parte desse trabalho e terão minha eterna gratidão pelos momentos compartilhados. Entre eles preciso destacar Gypson, Branco, Talita, Francisco, Dener, Socorro, professor Wallace, professor Kennedy e professora Crislene.

Por fim, preciso destacar meu agradecimento ao meu orientador Givanildo Azeredo, pois enfrentamos a barreira do deslocamento e da comunicação virtual, onde uma pandemia no início do doutorado ainda estava instaurada. Meus sinceros agradecimentos pela paciência, lealdade e contribuições ao longo do caminho.

RESUMO

No intuito de garantir compósitos ambientalmente sustentáveis, o presente estudo tem o objetivo de desenvolver um novo material constituído de pó de pedra e cascalhinho no formato de bloco, aglutinados por polipropileno reciclado através de tratamento térmico visando a aplicação em alvenarias na construção civil. Uma revisão sistemática foi feita para incorporar no estudo uma ampla visão dos dados disponíveis na literatura acerca da manufatura e caracterização de compósitos poliméricos. Com o foco principal de promover estudos no compósito utilizando o polímero em diferentes proporções - 15%, 25% e 35% por peso - como forma otimizadora para futuras aplicações em prol de alta resistência e baixa permeabilidade, os blocos foram moldados e prensados em um maquinário próprio desenvolvido para este fim e a pesquisa foi adequada a partir de metodologia adaptada envolvendo os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, absorção de água por imersão, microscopia ótica, entre outros ensaios para caracterização dos materiais envolvidos, como a fluência do polipropileno e análises térmicas de termogravimetria e sua derivada (TGA E DTG) e análise térmica diferencial (DTA). Diferentes teores de agregados – 28%, 37,5% e 57% - foram utilizados para o preparo do compósito. Os resultados mostraram que a resistência mecânica do bloco se tornou cada vez mais dependente do teor de polipropileno, atingindo cerca de 18 MPa para a resistência à compressão e 4 MPa para a resistência à tração na flexão, à medida que os vazios são preenchidos com polímero, atingindo uma absorção máxima de cerca de 5% e um grau de saturação máximo de 28%. Por outro lado, observou-se que a graduação dos agregados desempenha um papel significativo na resistência dos blocos. Assim, destaca-se que os compósitos, principalmente do tipo 35% de polipropileno reciclado com granulometria fina apresentaram comportamento satisfatório em parâmetros de resistências, como também nos padrões de compacidade e absorção de água, que justificam sua utilização em estruturas e em elementos construtivos.

PALAVRAS-CHAVE: concreto, polímero, resistência.

ABSTRACT

In order to guarantee environmentally sustainable composites, the present study aims to develop a new material consisting of stone dust and gravel in brick format, bound together by recycled polypropylene through heat treatment aiming for application in masonry in civil construction. A systematic review was carried out to incorporate into the study a broad view of the data available in the literature regarding the manufacture and characterization of polymer composites. With the main focus of promoting studies on the composite using the polymer in different proportions - 15%, 25% and 35% by weight - as an optimizing form for future applications in favor of high resistance and low permeability, the blocks were molded and pressed in an own machinery developed for this purpose and the research was based on an adapted methodology involving tests of simple compressive strength, flexural tensile strength, water absorption by immersion, optical microscopy, among other tests to characterize the materials involved, such as the creep of polypropylene and thermal analyzes of thermogravimetry and its derivative (TGA AND DTG) and differential thermal analysis (DTA). Different aggregate contents – 28%, 37.5% and 57% – were used to prepare the composite. The results showed that the mechanical strength of the brick became increasingly dependent on the polypropylene content, reaching around 18 MPa for compressive strength and 4 MPa for flexural tensile strength, as the voids were filled with polymer, reaching a maximum absorption of around 5% and a maximum degree of saturation of 28%. On the other hand, the gradation of the aggregates was found to play a significant role in the strength of the bricks. Thus, it is noteworthy that the composites, mainly of the 35% recycled polypropylene type with fine grain size, showed satisfactory behavior in terms of resistance parameters, as well as in terms of compactness and water absorption standards, which justify their use in structures and construction elements.

KEYWORDS: concrete, polymer, strength.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
1.4 METODOLOGIA GERAL.....	16
1.5 REFERENCIAL TEÓRICO	17
1.5.1 <i>Os compostos cimentícios e suas problemáticas</i>	17
1.5.2 <i>Polímeros e meio ambiente</i>	18
1.5.3 <i>A reciclagem do resíduo polimérico</i>	20
1.5.4 <i>Compósitos poliméricos</i>	21
1.5.5 <i>O uso de resíduos minerais em compósitos</i>	23
1.5.6 <i>Energia incorporada</i>	23
1.5.7 <i>Custos para produção de concreto polimérico</i>	25
1.5.8 <i>Compósito reciclável</i>	25
1.5.9 <i>Pastas poliméricas</i>	26
2 REVISÃO SISTEMÁTICA.....	27
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
2.2 METODOLOGIA.....	27
2.2.1 <i>Identificação do estudo</i>	28
2.2.2 <i>Seleção de trabalhos e aplicação de filtros</i>	31
2.2.3 <i>Extração dos dados e síntese</i>	32
2.3 RESULTADOS DA REVISÃO.....	33
2.3.1 <i>Caracterização dos Estudos</i>	35
2.3.2 <i>Caracterização Metodológica</i>	36
2.3.3 <i>Parâmetros analisados</i>	40
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	52
3.2 METODOLOGIA.....	52
3.2.1 <i>Planejamento Experimental</i>	54
3.2.2 <i>Quantitativo e coleta dos materiais</i>	56

3.2.3	<i>Caracterização dos materiais</i>	59
3.2.3.1	<i>Distribuição granulométrica</i>	59
3.2.3.2	<i>Massa unitária</i>	60
3.2.3.3	<i>Absorção de água</i>	60
3.2.3.4	<i>Ensaio de Fluência do Polipropileno reciclado</i>	60
3.2.4	<i>Produção dos blocos de concreto polimérico</i>	61
3.2.5	<i>Propriedades do bloco compósito</i>	68
3.2.5.1	<i>Análises térmicas</i>	68
3.2.5.2	<i>Microscopia ótica</i>	70
3.2.5.3	<i>Análise de densidades</i>	70
3.2.5.4	<i>Absorção de água</i>	71
3.2.5.5	<i>Índice de vazios</i>	72
3.2.5.6	<i>Estudo de compacidade</i>	73
3.2.5.7	<i>Grau de saturação</i>	74
3.2.5.8	<i>Porosidade permeável</i>	74
3.2.5.9	<i>Resistência à tração na flexão</i>	75
3.2.5.10	<i>Resistência à compressão dos blocos</i>	76
3.2.5.11	<i>Módulo de Elasticidade</i>	77
3.2.5.12	<i>Energia de fratura</i>	78
3.2.6	<i>Elaboração de pasta polimérica compatível com o concreto polimérico</i>	78
3.2.7	<i>Propriedades da pasta polimérica</i>	79
3.2.7.1	<i>Índice de consistência</i>	80
3.2.7.2	<i>Absorção de água</i>	81
3.2.7.3	<i>Resistência à compressão axial</i>	82
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
3.3.1	<i>Caracterização dos componentes do compósito</i>	83
3.3.1.1	<i>Análise granulométrica</i>	83
3.3.1.2	<i>Massa unitária dos agregados</i>	85
3.3.1.3	<i>Absorção de água dos agregados</i>	86
3.3.1.4	<i>Ensaio de Fluência do Polipropileno reciclado</i>	86
3.3.2	<i>Blocos compósitos de concreto polimérico</i>	87
3.3.2.1	<i>Análises térmicas</i>	87
3.3.2.2	<i>Microscopia ótica</i>	96
3.3.2.3	<i>Análise de densidades</i>	100
3.3.2.4	<i>Absorção de água</i>	101
3.3.2.5	<i>Índice de vazios</i>	103
3.3.2.6	<i>Estudo de compacidade</i>	106
3.3.2.7	<i>Porosidade permeável</i>	107
3.3.2.8	<i>Grau de Saturação</i>	108
3.3.2.9	<i>Resistência à tração na flexão</i>	109
3.3.2.10	<i>Resistência à compressão simples</i>	117
3.3.2.11	<i>Módulo de Elasticidade</i>	119
3.3.2.12	<i>Energia de fratura</i>	122
3.3.3	<i>Pasta polimérica compatível com o concreto polimérico</i>	124
3.3.3.1	<i>Índice de consistência</i>	124
3.3.3.2	<i>Absorção de água</i>	124
3.3.3.3	<i>Resistência à compressão</i>	125
3.4	CONCLUSÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	128
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130

4.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da revisão sistemática	34
Figura 2 - Fluxograma das etapas da pesquisa	53
Figura 3 - Polipropileno utilizado na pesquisa	57
Figura 4 - Pó de pedra utilizado na pesquisa	57
Figura 5 - Agregado cascalhinho utilizado na pesquisa	58
Figura 6 - Resina epóxi e catalisador utilizado na pesquisa	58
Figura 7 - Conjunto de peneiras e mesa vibratória utilizadas na análise granulométrica ...	59
Figura 8 - Plastômetro para medição do índice de fluidez	61
Figura 9 - Bloco do compósito polimérico produzido na pesquisa	62
Figura 10 - Tentativa de execução bloco compósito com furos	62
Figura 11 - Bloco compósito com furos demonstrando falhas em sua estrutura.....	63
Figura 12 - Etapa construtiva do equipamento de moldagem dos blocos	64
Figura 13 - Equipamento pronto para moldagem dos blocos compósitos (A), vista superior (B) e vista frontal (C).....	64
Figura 14 - Esquema de moldagem dos blocos compósitos.....	65
Figura 15 - Pesagem da mistura agregado + polímero	65
Figura 16 - Etapa de moldagem e prensagem.....	66
Figura 17 - Vazamento de polipropileno pelos cantos inferiores e pela tampa.....	67
Figura 18 - Evolução dos blocos produzidos	68
Figura 19 - Equipamento TGA/DTA	69
Figura 20 - Microscópio utilizado na pesquisa.....	70
Figura 21 - Ensaio de absorção de água em blocos poliméricos	72
Figura 22 - Ensaio de resistência à tração na flexão do bloco polimérico	75
Figura 23 - Blocos cortados para realização do ensaio de resistência à compressão	76
Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão do bloco polimérico	77
Figura 25 - Pasta polimérica no estado fresco	79
Figura 26 - Corpo de prova da pasta polimérica no estado endurecido (50 mm de altura e 25 mm de diâmetro).....	79
Figura 27 - Ensaio de consistência para a pasta polimérica	81
Figura 28 - Ensaio de resistência à absorção por imersão da pasta polimérica.....	81
Figura 29 - Ensaio de resistência à compressão da pasta polimérica	82
Figura 30 - Curva granulométrica dos agregados e suas combinações utilizadas no estudo	84
Figura 31 - Curva TGA/DTG para o polipropileno reciclado utilizado na pesquisa	88
Figura 32 - Curva TGA/DTG para o compósito 15%_Gran. Grossa	89
Figura 33 - Curva TGA/DTG para o compósito 15%_Gran. Fina	89
Figura 34 - Curva TGA/DTG para o compósito 35%_Gran. Grossa	90
Figura 35 - Curva TGA/DTG para o compósito 35%_Gran. Fina	90
Figura 36 - Curva TGA/DTG para o compósito 25%_Gran. Média	90
Figura 37 - Curva DTA para o polipropileno reciclado utilizado na pesquisa.....	92
Figura 38 - Curva DTA para o compósito 15%_Gran. Grossa	92
Figura 39 - Curva DTA para o compósito 15%_Gran. Fina	93
Figura 40 - Curva DTA para o compósito 35%_Gran. Grossa	93
Figura 41 - Curva DTA para o compósito 35%_Gran. Fina	94
Figura 42 - Curva DTA para o compósito 25%_Gran. Média	94
Figura 43 - Imagens microscópicas do material dos blocos com 6 vezes de aproximação. 96	

Figura 44 - Imagens microscópicas do material dos blocos com 20 vezes de aproximação	97
Figura 45 – Imagens microscópicas do material dos blocos com 60 vezes de aproximação	98
Figura 46 – Imagem microscópica do material do bloco 15_Gran. Grossa com 50 vezes de aproximação.....	99
Figura 47 - Imagem microscópica do material dos blocos com 150 e 350 vezes de aproximação, respectivamente.....	99
Figura 48 - Densidade dos blocos compósitos	100
Figura 49 - Absorção de água para blocos compósitos poliméricos	101
Figura 50 - Superfície de resposta para absorção de água.....	103
Figura 51 - Índice de vazios para blocos compósitos poliméricos	104
Figura 52 - Superfície de resposta para índice de vazios	105
Figura 53 - Porosidade para blocos compósitos poliméricos	106
Figura 54 - Porosidade permeável para blocos compósitos poliméricos.....	107
Figura 55 - Grau de saturação para blocos compósitos poliméricos	108
Figura 56 - Resistência à tração na flexão em 3 pontos para blocos compósitos poliméricos	110
Figura 57 - Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão	112
Figura 58 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 15%_Gran. Grossa.....	112
Figura 59 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 15%_Gran. Fina.....	113
Figura 60 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 25%_Gran. Média	113
Figura 61 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 35%_Gran. Grossa.....	114
Figura 62 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 35%_Gran. Fina.....	114
Figura 63 - Blocos compósitos seccionados com 15% de polipropileno reciclado.....	115
Figura 64 - Blocos compósitos seccionados com 35% de polipropileno reciclado.....	116
Figura 65 - Bloco compósito seccionado com 25% de polipropileno reciclado	116
Figura 66 - Resistência à compressão para blocos compósitos poliméricos	117
Figura 67 - Superfície de resposta para a resistência à compressão simples.....	119
Figura 68 - Módulo de Elasticidade para blocos compósitos poliméricos	120
Figura 69 - Superfície de resposta para o Módulo de Elasticidade	121
Figura 70 - Energia de Fratura para blocos compósitos poliméricos	122
Figura 71 - Superfície de resposta para a Energia de Fratura.....	123
Figura 72 - Absorção de água da pasta polimérica.....	125
Figura 73 - Resistência à compressão da pasta polimérica	126
Figura 74 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 30% de resina	126
Figura 75 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 35% de resina	127
Figura 76 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 40% de resina	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Etapas da Revisão Sistemática	28
Tabela 2 - Termos de busca utilizados	29
Tabela 3 - Combinações de termos de busca utilizadas	30
Tabela 4 - Critérios de Exclusão.....	32
Tabela 5 - Estudos da pesquisa na base de dados.....	33
Tabela 6 - Estudos selecionados para revisão sistemática.....	35
Tabela 7 - Caracterização geral dos estudos.....	36
Tabela 8 - Caracterização metodológica dos estudos inseridos	38
Tabela 9 - Comparativo de dados da resistência à compressão dos artigos incluídos na revisão sistemática.....	41
Tabela 10 - Comparativo de dados da resistência à tração dos artigos incluídos na revisão sistemática	41
Tabela 11 - Comparativo de dados da resistência à flexão dos artigos incluídos na revisão sistemática	42
Tabela 12 - Comparativo de dados da resistência ao desgaste/abrasão dos artigos incluídos na revisão sistemática	42
Tabela 13 - Comparativo de dados da resistência à absorção de água dos artigos incluídos na revisão sistemática	43
Tabela 14 - Comparativo de dados da análise térmica dos artigos incluídos na revisão sistemática	43
Tabela 15 - Comparativo de dados da análise microscópica dos artigos incluídos na revisão sistemática	44
Tabela 16 - Propostas de cada artigo e principais conclusões.....	46
Tabela 17 - Valores reais e codificados das variáveis independentes	54
Tabela 18 - Matriz delineamento do planejamento experimental estatístico fatorial.....	55
Tabela 19 - Relação peso e volume do teor de polipropileno reciclado no compósito	55
Tabela 20 - Delineamento experimental para pasta polimérica	56
Tabela 21 - Distribuição das partículas dos grãos e determinação de dimensão máxima característica e módulo de finura.....	84
Tabela 22 - Massa unitária do pó de pedra e cascalhinho	85
Tabela 23 - Absorção de água do pó de pedra e cascalhinho	86
Tabela 24 - Dados do índice de fluidez do polipropileno reciclado.....	86
Tabela 25 - Dados resumos TGA/DTG.....	91
Tabela 26 - Dados resumos DTA	94
Tabela 27 - Análise de variância para avaliação da absorção de água do bloco compósito	102
Tabela 28 - Análise de variância para avaliação do índice de vazios do bloco compósito	104
Tabela 29 - Análise de variância para avaliação da resistência à tração na flexão do bloco compósito	111
Tabela 30 - Análise de variância para avaliação da resistência à compressão do bloco compósito	118
Tabela 31 - Análise de variância para avaliação do módulo de elasticidade do bloco compósito	120
Tabela 32 - Análise de variância para avaliação da energia de fratura do bloco compósito	123
Tabela 33 - Índice de consistência da pasta polimérica.....	124

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

O estudo dos compósitos poliméricos desempenha um papel crucial na busca por soluções sustentáveis, representando uma alternativa inovadora e ecologicamente consciente em diversos setores da indústria. A utilização desses materiais proporciona uma redução significativa na dependência de recursos não renováveis, uma vez que muitos compósitos poliméricos incorporam componentes reciclados ou de origem renovável. Além disso, a aplicação desses compósitos em substituição a materiais tradicionais pode contribuir para a diminuição da pegada de carbono, pois muitos polímeros possuem ciclos de vida mais sustentáveis, desde a produção até a disposição final (Bala *et al.*, 2022).

A investigação aprofundada desses compósitos também abre portas para a criação de produtos mais leves e duráveis, proporcionando ganhos em eficiência energética ao longo do ciclo de vida dos materiais (Alam; Singh; Kumar, 2022). Reduzir o peso dos materiais em aplicações como transporte e construção não apenas economiza energia durante a produção, mas também contribui para a diminuição do consumo de combustíveis fósseis durante a utilização desses produtos. Em última instância, o estudo dos compósitos poliméricos no contexto da sustentabilidade representa um esforço valioso para promover a inovação e desenvolvimento de tecnologias que minimizem o impacto ambiental, alinhando-se com a busca por soluções mais responsáveis e ecoeficientes em diferentes setores industriais.

A incorporação de uma variedade de materiais nas construções busca aprimorar a eficiência e a economia na construção, ao mesmo tempo em que respeita as características específicas de cada projeto. A utilização de resíduos como material alternativo tem se revelado uma estratégia eficaz para mitigar o impacto do consumo desenfreado de matérias-primas e a redução das áreas de disposição, especialmente diante do crescente volume de resíduos gerados globalmente a cada ano (WWF, 2019). Entre os resíduos com alto índice de descarte, destaca-se o polipropileno, amplamente empregado na indústria de embalagens.

Os polímeros desempenham um papel diversificado na construção civil, sendo utilizados para reduzir o peso de estruturas como pontes, estacionamentos, pilares e vigas, além de apresentarem resistência química, propriedades mecânicas adequadas, flexibilidade e baixo custo quando provenientes de resíduos poliméricos.

Apesar do custo elevado, os concretos poliméricos têm despertado interesse devido às suas propriedades mecânicas superiores e à resistência significativa a agentes químicos agressivos, como ácidos e sulfatos. A substituição do cimento Portland por materiais poliméricos pode ser uma medida positiva para a composição do concreto, uma vez que reutiliza plásticos, reduzindo o consumo de clínquer, principal causador da emissão de gases poluentes na atmosfera (Ali; Saidur; Hossain, 2011).

A possibilidade da introdução de resíduos como pó de vidro, resíduos de mármore, agregados de vidro reciclado e plásticos eletrônicos destaca o concreto polimérico como um material ecologicamente compatível com o desenvolvimento sustentável. Uma vez que a escassez de agregados naturais nas proximidades das cidades tem impulsionado a busca por agregados residuais, como o pó de pedra, um resíduo proveniente de pedreiras.

Portanto, a incorporação de elementos poliméricos ao concreto, atuando como ligantes, sem adição de água, pode melhorar as propriedades reológicas dos blocos e reduzir a susceptibilidade à expansão, resultando em maior resistência mecânica e prolongando a vida útil de elementos construtivos.

A redução na absorção de água é uma característica marcante da mistura de polipropileno reciclado e pó de pedra, já que os agregados de origem natural são inertes e o polímero também se caracteriza como um repelente de água, tornando-a adequada para aplicações em que a presença de água infiltrada é indesejável.

A criação de blocos de pó de pedra aglutinados por polímeros reciclados, por meio de tratamento térmico de baixa temperatura, pode ser uma solução relevante para a preservação de recursos naturais e a melhoria da qualidade ambiental, contribuindo para a redução do consumo de energia na produção de materiais de construção. A substituição do cimento por polímeros reciclados pode representar uma medida eficaz na redução do impacto ambiental associado à indústria da construção civil, uma das principais causadoras de devastação ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver blocos compósitos à base de polipropileno reciclado com características físicas e mecânicas satisfatórias à construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de cumprir o objetivo geral estabelecido, este trabalho tem como objetivos específicos:

- ✓ Realizar uma revisão sistemática no contexto de compósitos poliméricos para comparação de resultados obtidos e metodologia utilizada nos estudos;
- ✓ Determinar a influência de parâmetros na metodologia de moldagem do compósito, como o tempo e temperatura de aquecimento, forma que a mistura é realizada, proporção de agregados e polímeros e a compactação aplicada;
- ✓ Realizar a caracterização físico-mecânica do bloco compósito;
- ✓ Comparar as propriedades físicas e mecânicas do compósito polimérico com a literatura existente no tema;
- ✓ Verificar a viabilidade de aplicação dos blocos compósitos na construção civil na forma de pré-moldados.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura desta tese foi organizada em capítulos conforme suas principais contribuições, contando com quatro capítulos.

O primeiro capítulo aborda a introdução do trabalho, destacando o contexto, a motivação e a justificativa da pesquisa, juntamente com os objetivos. Apresenta a metodologia geral do trabalho e o referencial teórico.

O segundo capítulo enfoca a revisão sistemática elaborada do estudo teórico, abrangendo contextualização, metodologia, resultados e conclusões.

O terceiro capítulo trata do programa experimental, além da metodologia com a caracterização de materiais e ensaios realizados, apresentando os resultados e principais conclusões.

O quarto capítulo aborda as considerações finais do estudo, fornecendo uma síntese das contribuições das pesquisas realizadas.

1.4 Metodologia Geral

Com o objetivo claro de definir o escopo do tema e fornecer contribuições para o estado atual do conhecimento, conduziu-se uma revisão sistemática da literatura. Nesse processo, adotou-se uma abordagem sistemática para coletar e sintetizar trabalhos academicamente relevantes relacionados aos compósitos poliméricos.

Posteriormente, ao identificar as lacunas e adotar uma abordagem objetiva na avaliação do desempenho de concretos à base de polímeros, desenvolveu-se um programa experimental neste estudo. Dentro desse programa, procedeu-se com a caracterização dos materiais, com o intuito de destacar suas principais propriedades, que seriam posteriormente utilizadas nas discussões. Finalmente, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, tração na flexão, absorção de água, entre outros, para avaliar a resistência e o comportamento dos compósitos.

Com base nas evidências teóricas e experimentais coletadas, realizou-se a síntese e apresentação de considerações finais em um capítulo dedicado a isso.

1.5 Referencial Teórico

1.5.1 Os compostos cimentícios e suas problemáticas

Devido ao progresso tecnológico e ao desenvolvimento econômico ao longo dos últimos séculos, enfrentam-se diversas consequências, como o aumento no uso de recursos, o aumento na geração de resíduos e a emissão de gases prejudiciais à saúde humana. Esses desafios são, em parte, resultado do crescimento populacional. Atualmente, o concreto se destaca como um dos recursos mais empregados na indústria da construção. E o cimento, um dos principais componentes do concreto, é associado a uma considerável emissão de dióxido de carbono (CO₂) em sua produção.

A demanda por cimento na construção impulsiona um crescimento constante na sua produção. Na última década, houve um rápido aumento na produção anual, atingindo a marca de 3,4 bilhões de toneladas (Khan *et al.*, 2014).

A fabricação de cimento requer processos intensivos de energia e consome quase 15% da demanda total de energia na indústria (Avami; Sattari, 2007). Em média, para produzir uma tonelada de cimento, são necessários 3,4 GJ de energia térmica (no processo seco) e 110 kWh de energia elétrica (Madloul *et al.*, 2013). Além disso, a fabricação de uma tonelada de cimento libera de 0,73 a 0,99 toneladas de CO₂ (WBCSD, 2011), que depende principalmente da proporção de clínquer para cimento e de outros fatores.

Estudos indicam que aproximadamente 8% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) de origem humana têm sua origem na produção de cimento (Andrew, 2019). Essa significativa contribuição decorre principalmente da intensidade energética associada ao aquecimento do calcário para a produção de clínquer no processo de fabricação do cimento (Suhendro, 2014).

O concreto apresenta limitações que incluem a baixa resistência à tração e a susceptibilidade à absorção de água, evidenciada pelo seu índice de vazios. Esses aspectos tornam as estruturas vulneráveis à infiltração e percolação de água, resultando em necessidade de manutenções dispendiosas e inconvenientes. Essas limitações sugerem que o concreto cimentício não apenas não contribui para a sustentabilidade dos materiais de construção, mas também apresenta obstáculos em sua aplicação.

Diante desse cenário, é imperativo explorar formas adicionais de reduzir as emissões, indo além das medidas controladas pelo setor cimenteiro. Uma alternativa viável seria a pesquisa de materiais substitutos que possam, em breve, parcial ou totalmente, substituir as emissões de gases associadas ao efeito estufa e às mudanças climáticas. Nesse contexto, os concretos poliméricos e geopoliméricos têm despertado considerável interesse na comunidade científica, visando promover a sustentabilidade no setor da construção.

As vantagens do concreto polimérico em comparação com o concreto de cimento Portland são suas alta resistência à compressão, flexão e tração, cura rápida, baixa permeabilidade e melhor proteção contra corrosão (Akin; Polat, 2022). A resistência química (especialmente a durabilidade) do concreto polimérico é significativamente melhor do que a do concreto de cimento Portland (Mohammed *et al.*, 2022).

Considerando essas constatações, torna-se inquestionável a urgência de adotar materiais alternativos capazes de superar as limitações relacionadas à resistência à tração na construção. Além disso, a demanda por materiais que resistam de forma mais eficiente aos efeitos da exposição à água, juntamente com a utilização de agregados com destinação ambientalmente adequada, destaca-se como uma necessidade premente. Essas circunstâncias ressaltam a importância de direcionar esforços para o desenvolvimento de novas tecnologias em todos os aspectos do setor da construção.

1.5.2 Polímeros e meio ambiente

A taxa de produção de resíduos plásticos está aumentando a um ritmo alarmante. Nos EUA, o volume total de resíduos plásticos dentro dos resíduos sólidos cresceu de 0,5% para 12,5% entre 1960 e 2010 (US EPA, 2011). Globalmente, as estimativas revelam que 75% de todo o plástico já produzido se tornou lixo, com um terço desse plástico (100 milhões de toneladas) participando como poluição terrestre ou marinha (WWF, 2019). Um adicional de aproximadamente 100 milhões de toneladas está previsto até 2030 se medidas consideráveis não forem implementadas (WWF, 2019). Existe, portanto, uma urgência em encontrar estratégias alternativas para a reutilização de resíduos plásticos.

A produção de materiais tradicionais utilizados na engenharia civil (por exemplo, concreto, aço) requer grandes quantidades de energia e gera poluição (Cao; Dai; Liu, 2016). Por exemplo, a fabricação de cimento Portland consome 10,5 EJ de energia mundial (Tanaka; Stigson, 2009) e a emissão de uma porcentagem significativa de gases poluentes e de efeito estufa (Ali; Saidur; Hossain, 2011). Portanto, a busca por materiais alternativos e inovadores, particularmente reciclados, para reduzir custos e impactos ambientais associados à construção aumentou nos últimos anos (Bernardi *et al.*, 2014; Javadi; Badiee; Sabermahani, 2018). De fato, edifícios e pavimentos têm sido alvo de incorporar uma gama diversificada de materiais para melhorar o desempenho e reduzir os custos de construção (por exemplo, Bulut; Sahin, 2017; Zimmermann; Zattera, 2013; Bensaada; Soudani; Haddadi, 2021). Além disso, o desenvolvimento da construção moderna de engenharia civil gerou uma forte demanda para modificar as propriedades do concreto e produzir novos materiais à base de agregados (por exemplo, Gu; Ozbakkaloglu, 2016; Hossain *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2019; Jafari; Toufigh, 2017; Hameed; Hamza, 2019; Mohammed; Hama 2022; Souza Junior *et al.*, 2022).

A aplicação de polímeros (resíduos de plástico ou virgem) no concreto ainda não progrediu significativamente nem recebeu visibilidade na indústria do concreto. Portanto, pesquisa e inovação para desenvolver novos produtos para substituir os plásticos descartáveis são necessárias para prevenir e reduzir a poluição por plásticos. O uso de polímeros como substitutos de agregados naturais e até do ligante tem um potencial considerável. A incorporação de polímeros pode melhorar significativamente certas propriedades, pois possui alta capacidade térmica e baixa condutividade térmica, alta tenacidade e bom comportamento à abrasão (Mohammed *et al.*, 2022).

Segundo Oliveira (2015), o polipropileno se tornou um dos mais importantes, e continua em ascensão devido à sua versatilidade de processamento e ótimas propriedades mecânicas, aliado ao baixo custo quando comparado aos outros polímeros de aplicação tecnológica.

O presente estudo é motivado por problemas ambientais associados aos resíduos plásticos e pelo desejo simultâneo de desenvolver materiais sustentáveis para uso na construção. No estudo atual, agregados e polipropileno reciclado, um resíduo plástico quase onipresente, são misturados para produzir compósitos sólidos; aqui chamados de tijolos (blocos) de polímero e areia. Esses blocos são fabricados por meio de tratamento térmico, pelo qual o polímero amolecido adere aos grãos de areia mineral, produzindo um sólido após o resfriamento. No trabalho atual, o material é misturado e aquecido

simultaneamente em dispositivo simples, porém robusto (descrito adiante), e depois comprimido no molde. O protocolo de aquecimento durante a mistura permite o amolecimento homogêneo do polímero e, portanto, tijolos relativamente grandes de alta resistência podem ser produzidos rapidamente. Além disso, constata-se por estudos anteriores que o volume de vazios pode ser reduzido drasticamente nesse compósito uma vez que o polímero vai preencher os vazios e torná-lo praticamente totalmente maciço.

1.5.3 A reciclagem do resíduo polimérico

No contexto do concreto convencional, a presença de cimento contribui para uma emissão significativa de dióxido de carbono, exercendo um impacto ambiental substancial. Ao optar pela substituição completa do cimento por um ligante de resina polimérica ou pelo próprio polímero reciclado, obtemos o que é conhecido como concreto sustentável. O termo "sustentável" refere-se à capacidade de atender às necessidades da geração atual sem comprometer a habilidade das gerações futuras de suprirem suas próprias demandas. Em termos simples, a abordagem 3R reflete a hierarquia de resíduos, ou seja, "Reduzir, Reutilizar e Reciclar". A reciclagem implica o processamento de materiais utilizados para a criação de novos produtos, visando evitar o desperdício de materiais potencialmente valiosos, reduzir a demanda por matérias-primas frescas, minimizar o consumo de energia e diminuir a poluição resultante do descarte de resíduos (Kiruthika; Prabha; Neelamegam, 2021).

O desenvolvimento sustentável tornou-se uma preocupação global proeminente em muitos países, recebendo considerável atenção ao longo da última década. Torna-se imperativo desenvolver estratégias adequadas para a gestão de diversos tipos de resíduos, como plásticos, pneus, borracha e vidro.

Neste aspecto sustentável, falar da substituição da água e do cimento por materiais poliméricos reciclados significa a redução de gases e poluentes atmosféricos que impactam negativamente o meio em que se vive. O processo de reciclagem envolve a transformação de materiais usados em novos produtos, a fim de evitar o descarte de materiais com potencial de serem ainda reutilizados e reduzindo o consumo de matéria-prima nova, provocando a redução da poluição. Portanto, quanto maior a porcentagem de material polimérico utilizado no compósito em estudo, menos resíduos gerando lixo teremos dispostos nos mares e meio ambiente.

As embalagens de polipropileno descartáveis, assim como copos de plástico, recipientes para alimentos e cadeiras, entre outros itens, levam em média cerca de 10 anos

para se decompor em moléculas sintéticas sob a ação da natureza (Blass, 2001). Em vez de considerarmos esses materiais apenas como resíduos em decomposição, podemos explorar a possibilidade de unir suas partículas para formar compósitos com propriedades físicas e mecânicas adequadas para aplicação na construção, proporcionando durabilidade.

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico, o que significa que pode ser reciclado várias vezes por meio do mesmo processo ou por outros métodos de transformação. Quando submetido a temperaturas adequadas, o plástico amolece, funde e pode ser moldado novamente (Blass, 2001). Atualmente, esse resíduo é comumente utilizado em embalagens, que eventualmente se tornam resíduos. Por esse motivo, o polipropileno tem recebido atenção especial na reciclagem, pois respeita os princípios dos três pilares da sustentabilidade, transformando-se em um recurso versátil. Ele pode ser empregado em novas embalagens e atuar como aditivo em materiais de construção, proporcionando melhorias em suas propriedades e tornando seu uso economicamente mais viável. Além de suas características atrativas para o mercado da construção civil, como alta resistência química e a solventes, facilidade de moldagem e coloração, resistência elevada à fratura por flexão ou fadiga, impacto e boa estabilidade térmica (Sarde; Patil, 2019).

1.5.4 Compósitos poliméricos

O concreto polimérico tem sido objeto de estudo em grande parte da pesquisa, sendo uma composição que combina uma resina polimérica com agregados. As vantagens desse novo material, quando comparado ao concreto convencional de matriz cimentícia, incluem sua elevada resistência à compressão, flexão e tração, rápida cura, baixa permeabilidade, aumento na proteção contra a corrosão das armaduras e eficiente amortecimento de vibrações (Bedi; Chandra; Singh, 2014). No entanto, é importante reconhecer que o concreto polimérico apresenta suas próprias limitações, como a falta de familiaridade por parte dos empreiteiros e o custo inicial mais elevado em comparação ao concreto cimentício. Mesmo assim, o concreto polimérico destaca-se como um material singular para o reparo de infraestruturas de concreto, como fundações, pontes, barragens e superfícies de pavimentos, graças às suas propriedades excepcionais (Bedi; Chandra; Singh, 2014).

Além disso, observa-se uma crescente tendência em pesquisas que exploram o uso de diversos materiais residuais que, de outra forma, se tornariam resíduos, proporcionando um destino mais benéfico para esses materiais. Isso é evidenciado em estudos como o

conduzido por Bulut e Sahin (2017), que examinou as propriedades mecânicas do concreto polimérico incorporando resíduos de plástico eletrônico.

Outros estudos também se concentram na comparação de resíduos provenientes da demolição e materiais de construção de baixo custo, avaliando sua aplicação como substitutos de agregados no concreto cimentício (Hameed; Hamza, 2019). Moodi *et al.* (2018) investigaram o desempenho de um concreto polimérico que continha resina poliéster e resina epóxi, utilizando proporções de 10 e 20% de poliéster e 10% de resina epóxi em relação ao peso dos agregados.

Numerosos estudos são dedicados à investigação de compósitos poliméricos que incorporam resinas como aglutinantes na composição. No estudo conduzido por Jozef *et al.* (2020), foi desenvolvido um concreto polimérico baseado em resina epóxi com preenchimentos, enquanto Jafari *et al.* (2018) buscou determinar a quantidade ideal de resina polimérica (epóxi) para obter propriedades aceitáveis a um custo reduzido. Sosoi *et al.* (2018) também examinou a influência de uma resina epóxi na coesão das partículas em um concreto polimérico, utilizando agregados como cinza volante, fragmentos de garrafas PET (polietileno tereftalato) e serragem de madeira, em um contexto semelhante ao estudo de Zanvettor *et al.* (2019).

As características do concreto polimérico, tanto em termos físicos quanto mecânicos, variam consideravelmente com base nas condições de preparação. Para um determinado tipo de concreto polimérico, suas propriedades são influenciadas pela porcentagem e tipo de polímero empregado, pela distribuição granulométrica dos agregados, pela técnica utilizada na mistura, pelas condições de cura, entre outras variáveis.

Entretanto, embora diversos estudos tenham explorado o uso de diversas resinas na substituição de agregados no concreto polimérico, poucos se debruçaram sobre a interação entre o agregado e o polímero reciclado, atuando como substituto do cimento na matriz. A incorporação de resíduos que, de outra forma, seriam descartados no meio ambiente, surge como uma alternativa promissora para a produção de um novo concreto polimérico com uma abordagem mais sustentável, mantendo suas propriedades físicas e mecânicas adequadas para aplicação na construção civil, bem como em outras aplicações mais nobres.

Nesse contexto, este estudo apresenta a perspectiva inovadora do polímero reciclado assumindo o papel principal como ligante no compósito, cujas propriedades serão minuciosamente examinadas à luz da literatura e da metodologia empregada.

1.5.5 O uso de resíduos minerais em compósitos

Quando se menciona o concreto, a associação imediata remete à utilização de brita como agregado graúdo, areia e filler para agregado miúdo. Contudo, o pó de pedra surge como uma alternativa viável devido ao seu baixo custo, ao mesmo tempo em que se consideram os danos ambientais causados pela exploração de areia. O pó de pedra, proveniente da exploração de pedreiras, possui um diâmetro máximo inferior a 4,8 mm, sendo caracterizado como uma areia média devido à sua curva granulométrica. Atualmente, esse resíduo não tem valor comercial de mercado e carece de uma destinação específica, permanecendo armazenado nos pátios das pedreiras, formando extensas pilhas que resultam em diversos impactos ambientais. Isso inclui a geração de poeira, a obstrução de canais de drenagem e, quando ocorre chuva, o assoreamento de rios.

A utilização de resíduos provenientes de pedreiras como materiais de construção não apenas reduziria os custos e a energia necessários nos processos de produção, mas também ofereceria uma abordagem eficiente e ecologicamente sustentável para lidar com os resíduos de pó de pedra, os quais, atualmente, representam um desafio ambiental sem solução alternativa (Cohen; Peled; Bar-nes, 2019). A incorporação mecânica das partículas de pó de pedra na matriz de argamassa contendo cinza volante resultou em um aumento significativo na resistência à compressão, à medida que a proporção de pó de pedra foi gradativamente aumentada.

Conforme demonstrado por Jafari *et al.* (2018), a distribuição dos agregados deve ser tal que permita um volume de vazios mínimo na mistura, promovendo um empacotamento denso. Esse empacotamento eficiente dos agregados na matriz do compósito polimérico resulta em propriedades aprimoradas. Isso pode ser alcançado minimizando o conteúdo vazio da mistura, reduzindo assim a proporção de aglutinante, ou adotando uma mistura de agregados fracamente compactada com uma quantidade maior de ligante. Um exemplo prático é encontrado no estudo de Jafari *et al.* (2018), que constatou que ao aumentar o tamanho dos agregados graúdos e a proporção de polímeros, a porosidade das amostras foi reduzida. Esse efeito é atribuído à diminuição da área superficial em relação ao volume com o aumento do tamanho das partículas, permitindo que o polímero revista completamente a superfície dos agregados.

1.5.6 Energia incorporada

A energia incorporada de um processo produtivo é definida como a energia necessária para a produção do material desde sua matéria-prima até o produto final. Esse

estudo se torna importante nesse contexto, uma vez que a proposta é substituir o cimento por um ligante polimérico a fim de se obter um compósito de características funcionais similares, mas com uma pegada ecológica, visando reduzir os impactos no meio em que vivemos no que diz respeito à economia energética, financeira e ambiental.

Ao contrário de muitas outras indústrias, na indústria do cimento, o consumo de energia não é o condutor dominante das emissões de CO₂. Mais de 50% das emissões são o resultado do processo de calcinação, no qual o carbonato de cálcio é quebrado em cal e dióxido de carbono (Mokhtar; Nasooti, 2020).

A substituição de material é viável quando os custos ambientais e/ou energéticos são menores do que os associados ao material que está sendo substituído (Hafez *et al.*, 2020; Alam; Singh; Kumar, 2022). Em particular, a energia incorporada associada à fabricação de tijolos de argila e tijolos de polímero de areia é amplamente governada pelo aquecimento. A energia necessária para aquecer um corpo de T₁ a T₂ é $E = \Delta T \rho c$, onde ρ é a densidade de massa, c é a capacidade específica de calor e $\Delta T = T_2 - T_1$. As seguintes aproximações podem ser feitas. Para tijolos queimados, $E \approx 2000 \text{ kg/m}^3 \cdot 800 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)} \cdot (900^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 1400 \text{ MJ/m}^3$. Para tijolos de polímero e pó de pedra, $E \approx 1900 \text{ kg/m}^3 \cdot 1400 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)} \cdot (170^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 400 \text{ MJ/m}^3$. Portanto, tijolos de polímero poderiam ser produzidos usando apenas $400/1400 \approx 30\%$ da energia usada para produzir tijolos queimados (Miranda *et al.*, 2024).

Além da economia de energia incorporada, os tijolos de polímero não requerem o uso de água (como os tijolos de argila). A substituição de água e cimento por resíduos de materiais poliméricos traduz-se também numa redução de gases do efeito de estufa e poluentes (Cao; Dai; Liu, 2016; Tanaka; Stigson, 2009; Ali; Saidur; Hossain, 2011).

Os polímeros têm a propensão de liberar compostos orgânicos voláteis (VOC) à medida que se degradam. O polipropileno, polímero aqui utilizado, não libera VOCs quando degradado abaixo de 200 °C, mas gera compostos olefínicos acima de 200°C, cuja quantidade aumenta com a temperatura (Cáceres; Canevarolo, 2009). Em temperaturas muito mais altas, ou seja, acima de 330 °C, os principais produtos gasosos obtidos da degradação térmica de compósitos de polipropileno/biomassa são H₂O, CO₂, CO, formaldeído, metanol, ácido acético, ácido fórmico e metano (Parparina *et al.*, 2014). Esses resultados são encorajadores, pois a degradação do polipropileno não gera quantidades coletáveis de compostos orgânicos voláteis a 170°C, que corresponde à temperatura imposta para produzir tijolos de polímero neste estudo.

1.5.7 Custos para produção de concreto polimérico

O custo de produção de um tijolo ou bloco para a construção depende do custo da matéria-prima, operação, combustível ou energia necessária para fabricação, administração e despesas legais da empresa, além das perdas que devem ser consideradas (Alam; Singh; Kumar, 2022).

Na estimativa para a fabricação de um compósito de plástico com pó de pedra (também um resíduo) pode-se prever que será um custo reduzido quando comparadas com técnicas de tijolos de barro cozidos tradicionais ou mesmo concreto, pois envolverá temperaturas mais baixas no processo (170 a 180°C), o que significa um menor gasto de energia. A matéria-prima será toda residual (livre disponibilidade), provavelmente menos trabalhadores necessários e menos processos envolvidos (Hafez *et al.*, 2020; Alam; Singh; Kumar, 2022).

Tendo em vista tais fatores, considerando o ciclo de vida dos componentes da mistura de um compósito polimérico, além de considerar uma baixa demanda ainda por materiais poliméricos recicláveis e por residuais de pedreiras, espera-se que o custo final a longo prazo seja inferior ao que se tem nos dias de hoje na indústria concreteira. No entanto, deve-se levar em consideração o alto valor agregado do produto final, sem falar no seu custo inicial elevado.

Enfim, trata-se de cálculos de valores de oportunidades que não serão detalhados neste trabalho, porém que cabe a reflexão para a ênfase do impacto que pode ser esperado com a inserção de um produto inovador no mercado da construção que conta com características mecânicas e físicas atraentes à construção e valores acessíveis quando considerados os prazos de manutenção e resistência.

1.5.8 Compósito reciclável

As características mais atrativas oferecidas pelos compósitos termoplásticos são o potencial de produção a baixo custo, boa resistência ao impacto, boa resistência a propagação de micro trincas, fácil controle de qualidade e a possibilidade de reciclagem de matéria-prima (Oliveira, 2013). Nesse estudo, a reciclagem da matéria-prima se torna a reciclagem do próprio compósito.

Além das vantagens já mencionadas do compósito proposto neste estudo, vale ressaltar a capacidade de reciclabilidade não apenas dos componentes em si, mas sim do próprio compósito como um todo, visto que se trata de plástico moldável por temperatura. Uma vez fundido, o polipropileno volta a ser fluido e a mistura pode ser novamente

moldada e reaproveitada, pois o outro componente (pó de pedra ou cascalhinho) é inerte e estará pronto para ser remodelado e envolvido pelo plástico para nova função.

A reciclabilidade de um compósito polimérico passa a ser equiparada a um RCD (resíduo de construção e demolição). Porém com características suficientes para adquirir nova robustez perante as construções, assumindo novamente o papel de protagonista como o ligante, por exemplo, de um novo compósito, já que se trata de material termoplástico. Para isso, estudos na engenharia de materiais acerca da degradação do polipropileno e com ciclos de aquecimento e congelamento já são feitos para analisar o quanto essa religação dos componentes após nova moldagem é eficiente ou não.

Isto posto, entende-se que os compósitos poliméricos apresentam uma vantagem à frente dos compósitos de matriz cimentícia. No entanto, se faz relevante a pesquisa dos efeitos e consequências do constante amolecimento e endurecimento da matriz polimérica de forma cíclica.

1.5.9 Pastas poliméricas

A argamassa (ou pasta) de polímero foi desenvolvida pela primeira vez na década de 1950, e depois se tornou amplamente conhecido na década de 1970. A composição da argamassa é determinada pelas suas aplicações sendo sua resistência estabelecida em função da razão entre agregado e resina. A argamassa polimérica tem sido bastante empregada com eficiência em componentes pré-moldados para edifícios, painéis de ponte, contentores de resíduos perigosos e bases de máquinas (Reis; Motta, 2014).

As argamassas poliméricas encontradas no mercado são constituídas geralmente de um composto polimérico, cargas minerais, aditivos químicos, agentes microbicidas e água. Sua fórmula diferenciada apresenta como principais vantagens a economia de cerca de 60% no assentamento de alvenarias, blocos e tijolos de concreto ou cerâmicos; a não utilização de areia, cal e cimento; maior rapidez e agilidade na mão de obra; rápida secagem; maior flexibilidade, produtividade e resistência; menor custo por m²; redução no peso estrutural; sem desperdício de material e ecologicamente correta. Sua utilização vem sendo cada vez mais difundida através de diferentes estudos que visam investigar sua viabilidade no mercado e comparar suas propriedades com as argamassas cimentícias (Martínez-Lopes *et al.*, 2021).

2 REVISÃO SISTEMÁTICA

2.1 Considerações iniciais

Para início de discussão deste trabalho e mais ampla visão dos dados disponíveis na literatura acerca da manufatura e caracterização de compósitos poliméricos a fim de utilização na construção civil sem a utilização do componente cimento Portland, foi utilizada a estratégia da revisão sistemática, trazendo evidências da importância e aplicabilidade do tema proposto, além de corroborar com a segurança do estudo através de um processo sistematizado e padronizado de pesquisa.

Uma revisão sistemática tem como objetivo minimizar erros, coletando estudos confiáveis acerca do assunto com conclusões pertinentes e dando suporte às justificativas de decisões pelo autor do presente estudo.

Nesse contexto, alguns passos essenciais são necessários para uma satisfatória revisão sistemática, como uma definição de objetivos claros, o estabelecimento de critérios para eleger os artigos mais adequados ao estudo, o ajuste de uma metodologia replicável, uma busca sistemática eficaz que consiga coletar os artigos elegíveis e a apresentação de forma resumida dos dados de interesse através de discussão comparativa dos resultados.

2.2 Metodologia

Para desencadear a condução da revisão sistemática, foram definidas estratégias de busca para identificar os artigos relevantes através dos critérios de exclusão e desenvolvimento dos métodos de síntese dos artigos utilizados.

Com o objetivo de uniformizar e ressaltar o processo pelo qual esta revisão foi conduzida, a Tabela 1 apresenta as fases percorridas nesse método, acompanhadas de suas características e passos principais, além dos resultados finais alcançados ao término desse procedimento.

O primeiro passo foi a definição da pergunta motivadora, a qual é justificada pela necessidade de oferecer uma contribuição satisfatória ao estado da arte de concretos poliméricos em paralelo com os objetivos definidos do trabalho. A designação da pergunta motivadora visa estreitar o campo de atuação desse estudo e limitar as pesquisas, direcionando para os estudos que realmente serão úteis na discussão e comparação dos resultados. A pergunta motivadora definida foi: *Como se comporta e quais são os parâmetros adequados para o uso de concreto polimérico na construção civil?*

Tabela 1 - Etapas da Revisão Sistemática

Passos	Descrição
Definição da pergunta motivadora	Como se comporta e quais são os parâmetros adequados para o uso de concreto polimérico na construção civil?
Definição da base de dados	Scopus
Escolha de palavras-chave e definição das combinações de busca	Tabela 2
Estratégias de busca	Pesquisa por título, resumo e palavras-chave, combinação com operadores booleanos AND e OR (Tabela 3)
Coleta de trabalhos na base de dados	Leitura de títulos e resumos com coleta de artigos relevantes e exclusão de trabalhos não relevantes
Seleção dos trabalhos e aplicação dos filtros	Aplicação de critérios de exclusão (Tabela 4)
Extração de dados	Leitura, classificação e organização dos dados
Análise dos resultados	Avaliação e discussão sobre a pergunta motivadora
Síntese da revisão	Síntese dos resultados e escrita da revisão

Fonte: Autoria própria.

Para a pesquisa dos estudos a serem utilizados na revisão sistemática, foi utilizada a base de dados *Scopus*, com nome oficial de *SciVerse Scopus*, da editora Elsevier Science de 2004. Esta base de dados foi escolhida tendo em vista seu notável destaque na quantidade de pesquisas que é coberta na literatura, além da confiabilidade através da revisão por pares a que estes artigos são submetidos antes de sua publicação.

2.2.1 Identificação do estudo

A identificação do estudo tem início com a definição da pergunta motivadora e reflexão acerca dos principais conceitos envolvidos no contexto dos concretos poliméricos, o que caracterizam eles e quais são as principais propriedades geralmente analisadas nesse campo de estudo, além das principais aplicações envolvidas. Após essa etapa, automaticamente, as palavras-chave relacionadas começam a surgir e serem percebidas nos títulos e resumos dos artigos recorrentes ao tema proposto. Para a escolha mais adequada das palavras-chave nos termos de busca, foram utilizadas palavras ou combinações de expressões que melhor representassem o resultado pretendido.

Portanto, de posse das palavras-chave ou expressões que representam o estudo em foco, foi possível organizá-las de forma a organizar os termos de busca por meio dos

operadores booleanos *AND* e *OR*. A Tabela 2 a seguir destaca os termos de busca utilizados na realização da pesquisa e a justificativa de cada combinação utilizada no contexto dos concretos poliméricos que se deseja aprofundar.

Tabela 2 - Termos de busca utilizados

#	Termos de busca	Justificativa
A	(epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)	Restringir a estudos que tratem de concretos/compósitos poliméricos e que contenham polímeros em sua composição.
B	Polypropylene	Restringir a estudos com o polipropileno na composição do compósito polimérico.
C	(artificial stone) OR (concrete brick)	Abranger pesquisas que utilizem esse tipo de nomenclatura para compósitos.
D	(granite) OR (stone dust) OR (quarry dust)	Afunilar a estudos que incorporem materiais reforçados com agregados, pó de pedra e suas variações, como geralmente é denominado em pesquisas da língua inglesa.
E	(recycled) OR (reuse) OR (waste)	Restringir a estudos que contenham materiais residuais em sua composição.
F	(physical characterization) OR (mechanical characterization) OR (wear characterization)	Captar estudos que tratem de caracterização física e mecânica do concreto polimérico.
G	(melted polymer) OR (molten polymer)	Captar estudos que tratem de polímeros que precisaram ser fundidos para conformar o compósito.

Fonte: Autoria própria.

Após a definição e devido agrupamento das palavras-chave, elas foram combinadas de forma a definir a estratégia de busca mais adequada aos resultados esperados dentro do cenário dos concretos poliméricos e suas propriedades. A Tabela 3 vai detalhar as 8 pesquisas definidas de acordo com as cooperações pré-estabelecidas feitas dentro da plataforma Scopus. Como já mencionado, tal ambiente virtual foi escolhido para a realização das pesquisas, dada a sua elevada e considerável abrangência e relevância científica e acadêmica.

Portanto, os termos foram inseridos no campo de busca e foi selecionada a demanda no título, resumo e palavras-chave na base de dados para recuperação dos estudos que interessem e venham a somar na pesquisa.

Tabela 3 - Combinações de termos de busca utilizadas

Pesquisas	Combinações	Primeiro campo	Operador	Segundo campo
1	$A \cap B$	(epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)	AND	Polypropylene
2	$A \cap C$	(epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)	AND	(artificial stone) OR (concrete brick)
3	$B \cap C$	Polypropylene	AND	(artificial stone) OR (concrete brick)
4	$A \cap D$	(epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)	AND	(granite) OR (stone dust) OR (quarry dust)
5	$(A \cap B) \cap E$	((epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)) AND (Polypropylene)	AND	(recycled) OR (reuse) OR (waste)
6	$(A \cap B) \cap F$	((epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)) AND (Polypropylene)	AND	(physical characterization) OR (mechanical characterization) OR (wear characterization)
7	$(C \cup D) \cap B \cap E$	((artificial stone) OR (concrete brick)) OR ((granite) OR (stone dust) OR (quarry dust)) AND (Polypropylene)	AND	(recycled) OR (reuse) OR (waste)
8	$A \cap G$	(epoxy concrete) OR (polymer concrete) OR (epoxy composite) OR (polymer composite) OR (polymer-based) OR (epoxy matrix) OR (polymer matrix)	AND	(melted polymer) OR (molten polymer)

Fonte: Autoria própria.

Durante a fase de recolhimento de trabalhos, não foram impostas restrições quanto ao número de palavras, estilo de linguagem, intervalo temporal ou afinação de parâmetros

de busca. Isso foi feito com o propósito de realizar uma pesquisa mais abrangente nesta etapa, pois posteriormente a aplicação de filtros seria necessária de toda forma.

2.2.2 Seleção de trabalhos e aplicação de filtros

Após a pesquisa e coleta dos estudos, a etapa de aplicação dos filtros foi realizada em duas partes: através de critérios que priorizaram a qualidade da revisão sistemática e critérios que focaram na elegibilidade de cada artigo quando relacionado à pergunta motivadora.

Dessa forma, os critérios foram organizados em 7 tópicos, como apresentados na Tabela 4 a seguir. Do primeiro ao quarto critério são basicamente filtros de exclusão relacionados à qualidade da revisão sistemática, priorizando trabalhos diretamente relacionados à tópicos da engenharia publicados em revistas, disponíveis de forma gratuita e na língua inglesa. Essa primeira parte da filtragem foi realizada ainda dentro da plataforma Scopus, em que os artigos restantes após esses primeiros quatro filtros, foram exportados para o ambiente de gerenciamento de referências Mendeley® a fim de simplificar a seleção e aplicação dos outros filtros mais praticamente.

Antes de se proceder à aplicação dos outros 3 critérios de exclusão, foi necessário verificar a duplicidade dos estudos para que não trabalhássemos com duplicatas. Assim, dentro do Mendeley, com o auxílio de uma ferramenta destinada a essa eliminação de artigos duplicados, foi possível excluir os estudos que foram captados mais de uma vez pelas combinações de palavras-chave e também dos artigos que faziam parte de um mesmo estudo geral com dados semelhantes ou que se tratavam do mesmo grupo de pesquisa. Portanto, visando evitar o comprometimento das conclusões apresentadas no resultado final da revisão sistemática, os artigos em duplicata foram devidamente eliminados, suprimindo fontes de possíveis erros.

Na segunda etapa de aplicação dos critérios de exclusão dos artigos, no Mendeley, após eliminação de artigos duplicados, apenas os resumos e títulos foram lidos de forma dinâmica a fim de selecionar os que realmente teriam alinhamento com a pergunta motivadora. Assim, foram selecionados os ensaios e os trabalhos onde se tratassem de compósitos poliméricos sem a participação do cimento, já que se trata de um dos pilares do trabalho atual, visando a produção de um compósito “verde” e ecologicamente correto.

Os artigos que despertassem algum tipo de dúvida, partiriam para a etapa final de triagem para, através da leitura completa, chegar-se a uma conclusão mais assertiva acerca da elegibilidade do mesmo em etapas posteriores.

Tabela 4 - Critérios de Exclusão

#	Critério	Justificativa
1	Trabalhos que não sejam da área Engineering na base Scopus.	Focar na área de conhecimento da Engenharia.
2	Trabalhos que não sejam artigos publicados em revistas (journal papers).	Priorizar trabalhos de maior relevância.
3	Trabalhos não publicados em língua inglesa.	Coletar trabalhos que sejam relevantes em todo o mundo.
4	Trabalhos não disponíveis completos e gratuitamente na versão eletrônica.	Recursos limitados para incluí-los na revisão.
5	Trabalhos que não sejam relacionados com a pergunta motivadora.	Evitar trabalhos dispersos que saiam do foco da pergunta motivadora.
6	Trabalhos que não considerem ensaios mecânicos ou físicos ao concreto polimérico.	Evitar trabalhos que não tragam contribuições expressas na discussão da pergunta motivadora.
7	Trabalhos que na composição do concreto polimérico contenham cimento Portland.	Evitar trabalhos que não possam ser equiparados.

Fonte: Autoria própria.

É importante justificar que não houve a priorização na utilização do critério de estudos publicados apenas nos últimos 5 anos, uma vez que limitaria ainda mais a busca por artigos dentro do tema, pois o desenvolvimento de compósitos poliméricos, ainda que insuficiente, é um tópico que vem evoluindo desde 1950, aproximadamente (Niaki, Ahangari e Pashaian, 2022).

Depois da leitura dinâmica dos títulos e resumos, a análise passou a ser mais aprofundada com a leitura completa dos artigos pré-selecionados observando a relevância e impactos desses estudos, além de perceber se os seus objetivos eram similares aos objetivos propostos no estudo atual. Para isso, um crivo crítico de análise foi necessário para avaliar a real utilidade do artigo na pesquisa, uma vez que muitos artigos captados eram relacionados à compósitos poliméricos com destinação à biomedicina, ou à blendas da engenharia de materiais. Por isso, ao fim do estudo, percebeu-se a insipiência ainda no tema pesquisado.

2.2.3 Extração dos dados e síntese

No estágio da extração dos dados, os artigos selecionados foram revistos atentamente, a fim da obtenção de dados relevantes relacionados à pergunta de interesse e

preferencialmente que contemplassem ensaios similares aos propostos neste trabalho. Os dados qualitativos e quantitativos foram extraídos em planilhas de acordo com os tópicos primordiais.

Em cada artigo, a seleção de dados relevantes para este trabalho, foi um ponto sensível, procurando identificar o polímero específico e a proporção usada em cada mistura. Adicionalmente, saber quais os componentes secundários (agregados) utilizados na mistura também se torna importante em termos de comparação. Sobre a metodologia, além dos ensaios, é imprescindível destacar a temperatura, pressão e tempo em que é feita a moldagem das amostras de cada estudo. Os ensaios mais visados para a análise nesse estudo foram a resistência à compressão, a resistência à tração, a resistência á flexão, os ensaios de abrasão (desgaste), as análises térmicas envolvendo DTA (análise térmica diferencial), análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG), a absorção de água e análises microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ademais, o objetivo de cada estudo e suas principais conclusões foram tomadas nota a fim de corroborar com a síntese final desta revisão sistemática.

2.3 Resultados da Revisão

Na Tabela 5 abaixo é possível notar que a pesquisa no geral retornou uma captação de 18798 artigos, que é resultado das 8 combinações de termos de busca escolhidos, dos quais restaram 7496 após a aplicação do primeiro filtro relacionado aos estudos focados na área de engenharia. Esse foi o filtro que mais eliminou artigos da pesquisa. Após essa primeira seleção, os 6 critérios restantes foram aplicados conforme destacado na Figura 1.

Tabela 5 - Estudos da pesquisa na base de dados

Pesquisas realizadas	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Artigos no Scopus	13732	540	78	358	1347	832	65	1846	18798
Artigos após foco na área de Engenharia	5238	406	56	225	500	345	43	683	7496
Excluídos	8494	134	22	133	847	487	22	1163	11302

Fonte: Autoria própria.

Assim sendo, após a limitação à área de estudo da engenharia e passar pela triagem inicial de mais 3 critérios, sendo eles a limitação a artigos publicados em revistas (journal papers), trabalhos em língua inglesa e artigos disponíveis completos gratuitamente

online, além da remoção de trabalhos duplicados, restaram 739 estudos para leitura de título e resumo para que passassem pela análise dos critérios 5 a 7, que envolvem a relação com a pergunta motivadora, os ensaios incluídos e a não inclusão do cimento Portland.

Finalmente, após a aplicação de todos os filtros destacados e feita a triagem final através da leitura completa dos artigos, foram selecionados 15 estudos que tratam de diferentes metodologias de compósitos poliméricos na engenharia.

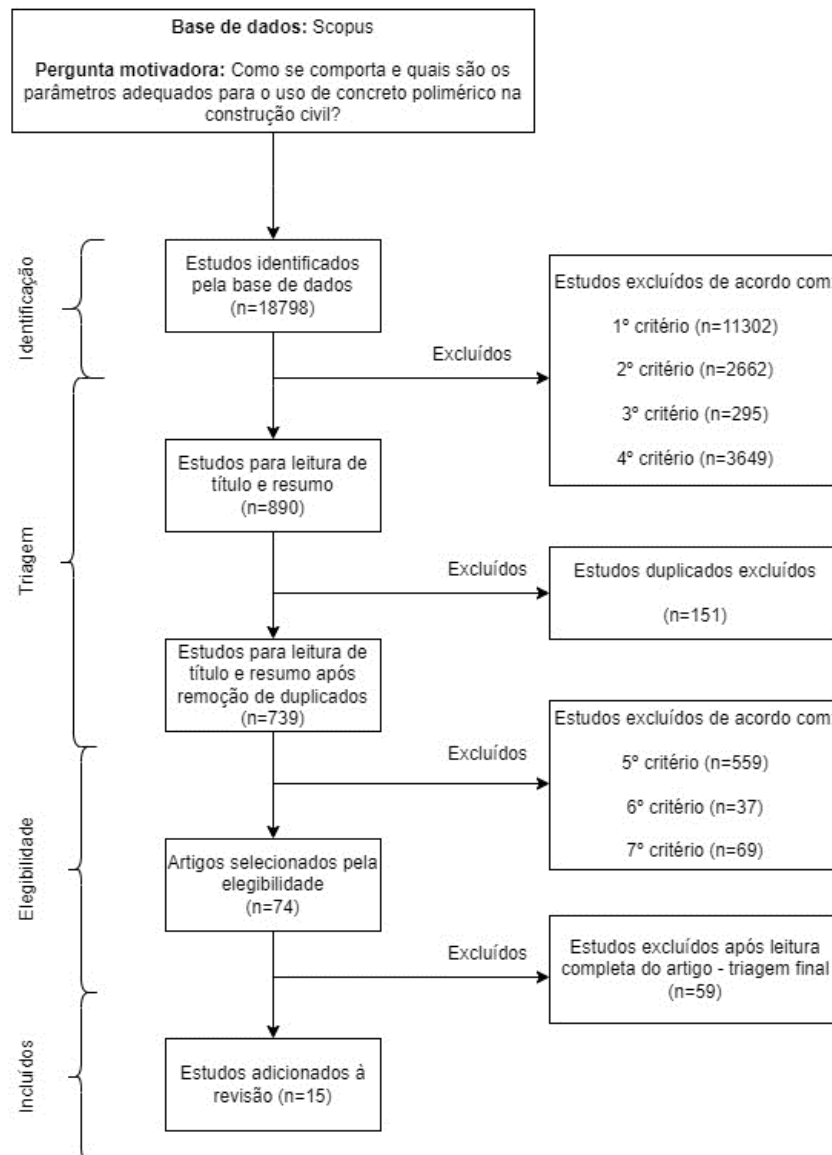


Figura 1 - Fluxograma da revisão sistemática

Fonte: Autoria própria.

2.3.1 Caracterização dos Estudos

A Tabela 6 apresenta os artigos selecionados para compor esta revisão sistemática. Os autores, ano de publicação e o título são destacados nas colunas da tabela, e serão utilizados na identificação dos estudos no decorrer do texto.

Tabela 6 - Estudos selecionados para revisão sistemática

Ref.	Citação	Título
1	Fomina & Khozin (2021)	Compatibilization of polymer mixtures during processing of waste products from thermoplastics
2	Azeko <i>et al.</i> (2023)	Eco-friendly green composites reinforced with recycled polyethylene for engineering applications
3	Salaou <i>et al.</i> (2021)	Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Laterite Masonry Bricks
4	Sarkar <i>et al.</i> (2008)	Polypropylene-clay composite prepared from Indian bentonite
5	Phuong <i>et al.</i> (2010)	Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp/bamboo fiber composites
6	Gupta <i>et al.</i> (2012)	Mechanical, Thermal Degradation, and Flammability Studies on Surface Modified Sisal Fiber Reinforced Recycled Polypropylene Composites
7	Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction
8	Lee <i>et al.</i> (2015)	Manufacture of polymeric concrete on the Moon
9	Romero <i>et al.</i> (2018)	Experimental assessment of the heal-ability of a polymer bonded sand
10	Miranda <i>et al.</i> (2017)	Solar bricks for lunar construction
11	Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	Characterization of compression strength of granite-epoxy composites using design of experiments
12	Carvalho <i>et al.</i> (2018)	Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite
13	Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites
14	Oh <i>et al.</i> (2021)	Sectioned processing of compaction self-assembly of an ultralow-binder-content particulate composite
15	Silva <i>et al.</i> (2023)	Characterization of artificial stone developed with granite waste and glass waste in epoxy matrix

Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Caracterização Metodológica

A Tabela 7 a seguir caracteriza os estudos abordados nessa revisão sistemática através da apresentação de alguns detalhes metodológicos dos estudos. Destes, nota-se que o intuito de aplicação do compósito polimérico para a indústria da construção civil representa cerca de 60% das pesquisas aqui consideradas, ou seja, a maior parte dos artigos são destinados ao desenvolvimento de novos materiais, sejam eles propostos para o uso na construção lunar ou no planeta terra. Apenas 1 artigo foi com destinação de uso na engenharia mecânica e outros 5 sem especificação de uso.

Observa-se através da Tabela 7 também, o quanto ainda é insipiente o tema de compósitos poliméricos sem a adição do cimento Portland com o intuito da substituição de materiais na construção civil, lembrando que na pesquisa inicial foram captados mais de 18000 artigos que pudessem ter alguma relação com compósitos poliméricos. No entanto, tão poucos chegaram a responder de fato a pergunta motivadora do trabalho. Por isso, pode-se dizer que o estudo de concretos e/ou compósitos poliméricos possui um potencial de exploração ainda crescente.

Tabela 7 - Caracterização geral dos estudos

#	Artigo	Aplicação	Polímero	Agregados	Temperatura	Pressão	Tempo
1	Fomina & Khozin (2021)	Produtos para construção	rPET e rPP e compatibilizante de copolímero (70:25:5 % por peso)	Farinha de calcário (50 a 85%)	240 °C	25 MPa	2 min
2	Azeko <i>et al.</i> (2023)	Indústria da Engenharia mecânica e civil na produção de blocos de construção, tijolos e pavimento.	rPE fundido	Laterita	130 °C	-	5 min
3	Salaou <i>et al.</i> , 2021	Indústria da construção	Fibra de Polipropileno (até 0,4%)	Laterita e água	Ambiente/ar	-	14 dias
4	Sarkar <i>et al.</i> (2008)	Não especifica	PP	Argila bentonítica e solvente xylene (5, 7,5 e 10%)	170 °C	10 Psi ≈ 0,069 MPa	1 hora
5	Phuong <i>et al.</i>	Não especifica	rPP e compatibilizante	Fibras de bambu	175 – 190 °C	-	-

	(2010)		te		tratadas ou não			
6	Gupta <i>et al.</i> (2012)	Não específica	rPP	Fibras de sisal com tratamento da superfície ou não	190 °C	80 kg/cm ² \cong 7,84 MPa	15 min	
7	Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	Indústria da construção	Resina isoftálica (14%)	Agregados graúdos, miúdos, fillers e fibras de polipropileno	-	-	-	
8	Lee <i>et al.</i> (2015)	Construção lunar	Polietileno em pó (10%)	Solo lunar artificial (90%)	230 °C	0,1 Torr \cong 0,00013 MPa	5 horas	
9	Romero <i>et al.</i> (2018)	Infraestrutura civil	Polietileno (2%)	Areia de sílica de granulação grossa uniformemente graduada	140 °C	10 kPa \cong 0,01 MPa	2 horas	
10	Miranda <i>et al.</i> (2017)	Construção lunar	Polietileno em pó (5 e 10%)	Imitação da granulometria do solo lunar	150 °C	-	60 min	
11	Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	Peças estruturais de máquinas e máquinas de medição por coordenadas	Resina polimérica epóxi	Pó de granito	-	-	-	
12	Carvalho <i>et al.</i> (2018)	Calçadas para tráfego de pedestres	Resina polimérica epóxi	Resíduos de granito de pedra em 85 e 90%	Ambiente	10 MPa	2 horas	
13	Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	Não específica	Resina polimérica epóxi	Resíduo de granito em pó (0, 30 e 50%)	-	-	-	
14	Oh <i>et al.</i> (2021)	Não específica	Resina polimérica epóxi (4%)	Areia (96%)	-	10, 40 e 100 MPa	1 min na pressão máxima	
15	Silva <i>et al.</i> (2023)	Indústria da construção	Resina epóxi (15%)	Resíduo de granito e de vidro (50/50%)	90 °C	3,68 MPa	20 min	

Fonte: Autoria própria.

Consoante a Tabela 7, diferentes tipos de polímeros foram aplicados em cada composto, dentre eles, as resinas poliméricas, polímeros em pó, em grânulos fundidos, polímeros reciclados e até fibras de polímero, podendo ainda ser polipropileno (PP),

polietileno (PE), resina epóxi, resina isoftálica ou politereftalato de etileno (PET). Apesar do estudo atual ser focado no uso do polipropileno reciclado, teve que ser considerada uma ampliação na busca de artigos com o uso do termo polimérico para que não ficássemos tão limitados nas comparações, reforçando mais uma vez a lacuna existente na literatura do tema abordado.

Nos estudos apresentados, nota-se uma variedade de integrantes complementares da mistura, que podemos chamar de agregados. Nos artigos, observa-se a aplicação do polímero com farinha de calcário, laterita, argila, fibras variadas, pó de granito e areias de diferentes graduações, mostrando o quão diversificadas são as aplicações em compósitos poliméricos. Percebe-se que geralmente quando o compósito é destinado à aplicação em construção civil, os agregados utilizados são agregados graúdos oriundos de britas, miúdos, fillers ou residual de materiais da própria construção.

Acerca da metodologia de moldagem das amostras de cada estudo, verifica-se que quando se trata de um estudo em que é necessária a fundição do elemento aglutinante (geralmente o polímero), a conformação do corpo de prova se dá através de temperaturas acima de 130 °C, como pode ser inferido na Tabela 7. Já as pressões aplicadas durante a conformação, se revelam com valores bastante distintos, variando de 0,000013 MPa (Lee *et al.*, 2015) até 100 MPa (Oh *et al.*, 2021). Tal variação na metodologia é frequentemente encontrada nesse tipo de estudo, pois cada autor vai priorizar uma determinada característica no seu compósito, levando a diferentes teores de vazios, que influencia diretamente na densidade e compacidade e resistência mecânica almejada. Constata-se também a tendência de maiores tempos de aplicação da força quando se tem menores valores de pressão.

Tabela 8 - Caracterização metodológica dos estudos inseridos

#	Artigo	Resistência à compressão	Resistência à tração	Resistência à flexão	Desgaste/ abrasão	Análise térmica	Absorção de água	Análise Microscópica
1	Fomina & Khozin (2021)	✓		✓		✓		
2	Azeko <i>et al.</i> (2023)	✓		✓				✓
3	Salaou <i>et al.</i> (2021)	✓	✓				✓	
4	Sarkar <i>et al.</i> (2008)		✓					✓

5	Phuong <i>et al.</i> (2010)		✓				✓	
6	Gupta <i>et al.</i> (2012)		✓			✓	✓	
7	Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	✓	✓	✓				
8	Lee <i>et al.</i> (2015)	✓						
9	Romero <i>et al.</i> (2018)	✓						
10	Miranda <i>et al.</i> (2017)	✓					✓	
11	Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	✓					✓	
12	Carvalho <i>et al.</i> (2018)			✓	✓		✓	
13	Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	✓	✓	✓			✓	
14	Oh <i>et al.</i> (2021)			✓			✓	
15	Silva <i>et al.</i> (2023)			✓	✓		✓	
		60,0%	40,0%	46,7%	13,3%	13,3%	20,0%	66,7%

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 traz o perfil metodológico dos estudos inseridos na revisão sistemática. Através dela, é possível perceber que 60% dos artigos captados na busca incluem o ensaio de resistência à compressão, 40% o ensaio de tração e 46,7% o ensaio de flexão, no qual é extraída a informação da resistência à tração de forma indireta, ou seja, os ensaios mecânicos se revelam como uma análise essencial dentro do estudo e desenvolvimento de compósitos poliméricos, visando trazer o comparativo quando submetidos a diferentes forças e formas de atuação dessas forças de acordo com sua aplicação na vida prática do compósito.

Para a caracterização física, a absorção de água e análise através de imagens de microscopia, seja ótica ou eletrônica de varredura, são geralmente as mais utilizadas e foram também adotadas no estudo atual, por isso foi concordado ser importante destacar

quantos e quais estudos trariam também essas análises. Portanto, vê-se pela Tabela 8 que 20% dos estudos incluídos na revisão incluem o ensaio de absorção de água, enquanto 66,7% trazem a análise microscópica como meio de comparação dos arranjos das partículas e interações entre elas, além da aglutinação e envolvimento dos agregados pelo polímero na mistura. Por fim, a análise térmica é a análise responsável pela compreensão da decomposição dos componentes da mistura, envolvendo os ensaios DTA, TGA e DTG, em que estiveram presentes em 13,3% dos estudos.

Tais condições corroboram com a falta de avaliação complementar em compósitos poliméricos envolvendo os ensaios de caracterização física e de resistência mecânica.

2.3.3 Parâmetros analisados

No que diz respeito aos critérios examinados nas pesquisas, nota-se uma variação no comportamento em relação aos estudos, visto que cada pesquisa adota uma abordagem metodológica distinta para abordar o tema, resultando na análise de diferentes critérios. Contudo, mesmo diante das abordagens divergentes, diversos critérios se manifestam de maneira recorrente em muitos dos trabalhos, refletindo os principais mecanismos de resistência associados aos concretos poliméricos.

Por isso, para a análise de cada parâmetro em particular, será discutido um comparativo dos dados extraídos de cada artigo presente na revisão sistemática a fim de que possamos confrontar os conhecimentos de cada estudo e compor uma concepção geral do desenvolvimento de concretos poliméricos.

Apesar da variedade de estudos presentes quando se tenta elaborar uma revisão sistemática dentro do conceito de concreto polimérico, é possível prever alguns comportamentos dentro desse nicho. Por exemplo, a Tabela 9 a seguir apresenta os resultados da resistência à compressão referentes a cada estudo incluído. Dentre os 9 artigos que realizaram esse ensaio, podem ser notados estudos com a inserção de materiais poliméricos nas mais diversas configurações, sejam através de resinas, com ou sem compatibilizantes, sejam através de polímeros em pó ou através de fibras de polipropileno como reforço.

Tabela 9 - Comparativo de dados da resistência à compressão dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Resistência à compressão
Fomina & Khozin (2021)	Sem compatibilizante - 45 MPa
Azeko <i>et al.</i> (2023)	40% Laterita + 60% PE - 25 MPa
Salaou <i>et al.</i> (2021)	0,23% fibra de PP - 7 MPa
Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	67 MPa reforçado com fibras
Lee <i>et al.</i> (2015)	12,9 MPa com 5 h de pré-aquecimento
Romero <i>et al.</i> (2018)	0,8 MPa
Miranda <i>et al.</i> (2017)	Solo mais miúdo com 5% de finos com 10% de PE - 8 MPa
Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	114,23 MPa com 20% de resina epóxi
Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	79,33 MPa com 50% de resina

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tabela 9 que os valores de resistência à compressão variaram de 0,8 MPa a 114,23 MPa, números bastante expressivos. No entanto, os valores mais elevados são referentes a estudos realizados com a mistura de resinas poliméricas, que apesar de serem estudos bastante interessantes e presentes na literatura, não se utilizaram de polímeros reciclados com a necessidade de aquecimento e fundição do elemento ligante. Isso porque quando se tem mais fatores que possam influenciar no processo de manufatura dos corpos de prova para os ensaios, como a temperatura utilizada, a pressão e o tempo decorrido no processo, existem maiores variações positivas e negativas possíveis de influenciarem os resultados da resistência mecânica. Dito isto, espera-se, portanto, que o bloco que será desenvolvido na pesquisa atual atinja um valor por volta de 10 a 25 MPa, baseando-se nos estudos de Azeko *et al.* (2023), Lee *et al.* (2015) e Miranda *et al.* (2017), que apesar de trabalharem com o polietileno mas utilizaram metodologias semelhantes na moldagem dos corpos de prova.

Já as tabelas 10 e 11 a seguir, trazem os dados referentes à resistência à tração direta e indiretamente, onde pode-se inferir que vai variar de 0,37 MPa a 43 MPa de acordo com a metodologia e materiais adotados.

Tabela 10 - Comparativo de dados da resistência à tração dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Resistência à tração
Salaou <i>et al.</i> (2021)	0,25% fibra de PP - 0,37 MPa
Sarkar <i>et al.</i> (2008)	5% argila - 43 MPa
Phuong <i>et al.</i> (2010)	22 a 31 MPa
Gupta <i>et al.</i> (2012)	30% fibra de sisal e 5% compatibilizante - 27,5 MPa
Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	13,8 MPa reforçado com fibras
Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	19,46 MPa com 50% de resina

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Comparativo de dados da resistência à flexão dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Resistência à tração na flexão
Fomina & Khozin (2021)	Com compatibilizante - 10,8 MPa
Azeko <i>et al.</i> (2023)	40% Laterita + 60% PE - 7,3 MPa
Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	13,5 MPa reforçado com fibras
Carvalho <i>et al.</i> (2018)	85% resíduo de pó de granito - 32 MPa
Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	27,68 MPa com 50% de resina
Oh <i>et al.</i> (2021)	23,5 MPa
Silva <i>et al.</i> (2023)	32,77 MPa

Fonte: Autoria própria.

Vale lembrar que a razão da resistência à compressão pela resistência à tração, com a exceção do estudo de Salaou *et al.* (2021), foi acima de 10%, o que mostra a capacidade do concreto polimérico de ultrapassar as barreiras das limitações impostas pelo cimento Portland.

Para a comparação dos estudos de desgaste e abrasão, os ensaios utilizados pelos estudos que traziam essa parte não utilizaram o cilindro de abrasão Los Angeles, e sim a redução da espessura do corpo de prova quando submetido ao desgaste. E, portanto, percebe-se que na Tabela 12 são apresentados valores variando de 0,57 a 0,96 mm de variação, o que seria o equivalente de 1,9% a 3,2% de redução da espessura dos corpos de prova ensaiados com resina epóxi em ambos os estudos.

Tabela 12 - Comparativo de dados da resistência ao desgaste/abrasão dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Desgaste/ abrasão
Carvalho <i>et al.</i> (2018)	Abrasão à 500 m - 90 % resíduo - 0,66 mm; 85% resíduo - 0,57 mm
Silva <i>et al.</i> (2023)	500 m - 0,96 mm

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 13 mostra o quanto a interferência polimérica pode ser eficaz na redução da porosidade através da redução do quanto é absorvido de água nos compósitos estudados, apresentando valores de 0,13 a 0,35% de absorção de água apenas. Tais resultados demonstram o quanto esses compósitos estão bem adensados e com baixo índice de vazios, se revelando adequados e preparados para aplicação na construção, uma vez que um dos grandes problemas na construção é a percolação de água através dos vazios existentes nas estruturas, permitindo a formação de cânulas de água no interior dos compósitos.

Tabela 13 - Comparativo de dados da resistência à absorção de água dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Absorção de água
Salaou <i>et al.</i> (2021)	Redução de mais de 50% de absorção de água com 0,23% fibra de PP
Carvalho <i>et al.</i> (2018)	90% resíduo de granito - 0,35%; 85% resíduo - 0,25%
Silva <i>et al.</i> (2023)	0,13%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Comparativo de dados da análise térmica dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Análise térmica
Fomina & Khozin (2021)	O efeito endotérmico da fusão foi observado na faixa de temperatura de 40 a 110°C com máximo em 75°C. Os processos de destruição termo-oxidativa começaram a 240°C.
Gupta <i>et al.</i> (2012)	A degradação térmica do polipropileno reciclado (rPP) começou em 356 °C com temperatura final de degradação de 460 °C. A perda de peso do rPP ocorreu em um processo de degradação de uma etapa de 356 °C a 450 °C. Acima de 400,6 °C, a perda de massa ocorre muito rapidamente e a quantidade de resíduos é quase zero ao final.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 acima trás os resultados referentes à análise térmica, em que se pode extrair dados úteis à análise quanto à temperatura de degradação do polipropileno e como se dá a perda de massa do polímero. Dados esses muito importantes quando se pensa no estudo dos materiais envolvidos nos compósitos e como irão se comportar diante da exposição à altas temperaturas, além das reações que acontecem gerando ou não novos componentes.

Na análise microscópica, diversas conclusões podem ser tomadas através da análise das imagens geradas pela interação entre a matriz e seus componentes. Azeko *et al.* (2023), por exemplo, chegou a perceber excelente ligação entre a matriz e o reforço de polietileno, mostrando que com essas espécies de “pontes”, haveria um impedimento para a propagação de fissuras nos compósitos e que sem essa ligação do polímero, a ligação entre partículas de laterita produziria diversas microfissuras no compósito.

A problemática das microfissuras também é destacada no estudo de Carvalho *et al.* (2018) na interface partícula/epóxi, tendendo a promover o descolamento interfacial, responsável pela falha prematura das pedras artificiais.

Outros estudos, como *Phuong et al. (2010)* e *Gupta et al. (2012)* focam na interferência que componentes como compatibilizantes ou tratamentos superficiais possam ter na adesão da interface das duas fases existentes nos compósitos.

A Tabela 15 vai detalhar com maior clareza os casos encontrados em cada artigo da revisão sistemática.

Tabela 15 - Comparativo de dados da análise microscópica dos artigos incluídos na revisão sistemática

Estudo	Análise microscópica
<i>Azeko et al. (2023)</i>	Ocorre a ligação matriz-polietileno, a desconexão matriz-polietileno e o aparecimento de microfissuras e fissuras secundárias. O compósito de polietileno com 40% em peso de lateritas e 60% em peso de PE possui excelente ligação entre a matriz e o reforço de PE. Das erosões, há evidências de pontes ligamentares em locais específicos, servindo assim como um impedimento para a propagação de fissuras. Quando o reforço de PE é pouco na mistura, o aglutinante de PE não consegue prender efetivamente todas as microfissuras no compósito, deixando excesso de laterita que é forçada a interagir entre si. A interação desta laterita-laterita produz diversas microfissuras no compósito.
<i>Sarkar et al. (2008)</i>	O aumento do teor de argila no compósito de polipropileno levou a grandes aglomerados e, portanto, a uma maior probabilidade de descolamento devido à fraca adesão interfacial.
<i>Phuong et al. (2010)</i>	Compósitos reforçados com fibras de bambu sem compatibilizante apresentam adesão muito fraca entre a superfície e a matriz das fibras de bambu. Existem muitos espaços vazios grandes entre as fibras de bambu e as fibras que não têm contato com a matriz devido à incompatibilidade destes componentes. Isto pode explicar as fracas propriedades mecânicas destes compósitos. A adição de compatibilizante levou a uma adesão do compósito ligeiramente melhorada e a uma distância de interface reduzida entre as duas fases.
<i>Gupta et al. (2012)</i>	A morfologia da superfície dos compósitos de polipropileno reciclado com fibras de sisal fraturados reflete a razão das propriedades mecânicas mais elevadas. Em geral, os tratamentos de fibra podem melhorar significativamente a adesão na interface anterior e também levar à entrada da matriz nas fibras, obstruindo o arrancamento das células.
<i>Miranda et al. (2017)</i>	Em geral, a distribuição do polímero parece ser consideravelmente homogênea, manifestando-se como meniscos nos contatos e como gotículas nas superfícies. A resistência à ruptura do polímero (não a resistência ao desprendimento) deu origem à resistência à ruptura dos tijolos.

Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	Foram observados aglomerados de partículas de granito distribuídas na microestrutura das amostras com 15% em peso de epóxi. A presença de aglomerados pode estar associada à redução da resistência, uma vez que as ligações adesivas entre as partículas de granito promovidas pelo epóxi são irregulares ou inexistentes nas regiões dos aglomerados. Observou-se que amostras com 20% em peso de epóxi apresentaram algumas áreas com porosidade na microestrutura.
Carvalho <i>et al.</i> (2018)	Existe um número sensivelmente maior de pequenas cavidades na pedra artificial com 90% de resíduo de granito, justificando a sua absorção de água comparativamente maior e porosidade. Existem fissuras associadas à interface partícula/epóxi. Essas fissuras tendem a promover o descolamento interfacial, responsável pela falha prematura das pedras artificiais.
Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	As partículas maiores e mais irregulares causarão discrepâncias nos resultados da análise do tamanho dos grãos.
Oh <i>et al.</i> (2021)	A estrutura das microaglomerações poliméricas (PMA) e a distribuição dos grãos de carga são relativamente homogêneas. Em termos de tamanho médio, espaçamento e configuração dos grãos de PMA e de areia, as partes superior e inferior e o interior e o limite da seção não apresentam muita diferença. O espaço livre entre os grãos de areia é muito menor do que numa argamassa normal. Os PMA aderem bem às superfícies do filler, graças à alta molhabilidade da areia.
Silva <i>et al.</i> (2023)	A microscopia revelou uma boa adesão entre as partículas de granito e vidro e a resina epóxi. Além disso, a baixa incidência de poros isolados sugere uma mistura homogênea. O umedecimento interfacial eficiente da resina desempenhou um papel crucial na obtenção de uma boa interação interfacial, resultando em melhores propriedades mecânicas.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 16 a seguir resume o objetivo e as principais conclusões de cada artigo inserido na revisão sistemática a fim de melhor explicitar a razão de escolha de cada estudo.

Tabela 16 - Propostas de cada artigo e principais conclusões

#	Artigo	Proposta do trabalho	Principais conclusões
1	Fomina & Khozin (2021)	Utilizar PET e PP reciclados com um compatibilizante e uma farinha de calcário para que esse compósito traga melhores características mecânicas para utilização na indústria ou construção como um novo material.	A presença do compatibilizante levou à diminuição na resistência à compressão dos compósitos e a resistência à flexão foi maior em todas as substituições de filler. É necessário otimizar a temperatura de fundição e encontrar um balanço entre a reação de ativação do compatibilizante e a minimização dos processos destrutivos nos polímeros.
2	Azeko <i>et al.</i> (2023)	Otimizar as propriedades mecânicas dos compósitos formados por polietileno reciclado derretido com laterita sem a utilização de cimento.	Os compósitos exibiram excelentes resistências à compressão e flexão de 25 MPa e 7,3 MPa, com 40% Laterita e 60% polietileno. As imagens de microscopia revelam evidências de pontes de ligamento entre as partículas.
3	Salaou <i>et al.</i> , 2021	Investigar o desempenho de tijolos reforçados com fibra de polipropileno para melhorar o desempenho dos tijolos de solo bruto.	Com a inclusão da fibra, a resistência à compressão duplicou para um teor de fibra de 0,25%, assim como para a resistência à tração por fendilhamento indireto, correspondendo a um aumento de 62% do solo puro. A inclusão de fibra melhora a taxa inicial de absorção de água, alcançando uma redução de 50% na taxa de absorção de água em comparação com os tijolos com teor de fibra de 0,23%.
4	Sarkar <i>et al.</i> (2008)	Caracterizar um compósito de argila e polipropileno.	Foi observada melhoria significativa na resistência à tração e no valor da tenacidade com alteração insignificante no valor do módulo de tração. Além disso, observa-se que estas propriedades mecânicas melhoradas podem ser obtidas apenas com baixa carga de argila de 5% em massa (43 MPa). Maior carga de argila produziu propriedades mecânicas inferiores provavelmente devido à aglomeração e menor interação entre matriz e argila.

5	Phuong <i>et al.</i> (2010)	Caracterizar compósito de polipropileno reciclado com fibras de bambu com e sem tratamento, e com e sem compatibilizante.	As propriedades mecânicas dos compósitos de polipropileno reciclado (rPP) reforçados com fibras de bambu (BF) aumentaram ligeiramente após o tratamento com solução alcalina. A microscopia mostrou que a adesão melhorou na interface entre a superfície do BF e a matriz PP após tratamentos alcalinos e de acetilação.
6	Gupta <i>et al.</i> (2012)	Desenvolver compósitos de polipropileno reciclado com fibras de sisal com diferentes tratamentos para melhorar as propriedades e avaliar comportamento.	Os compósitos preparados com 30% por peso de fibra com 5% do compatibilizante MA-g-PP apresentaram ótimo desempenho mecânico. A incorporação de fibra de sisal (SF) tratada, aumenta adicionalmente as propriedades mecânicas e térmicas da matriz PP. As observações morfológicas por MEV indicam que as propriedades de adesão da fibra à matriz aumentam devido ao tratamento superficial. A temperatura de degradação térmica dos compósitos rPP/SF apresenta valores mais elevados conforme indicado pelas análises.
7	Kiruthika <i>et al.</i> (2021)	Compor uma proposta de concreto polimérico com uma resina forte otimizando e dosando os componentes a fim de obter características mecânicas viáveis à utilização.	O concreto polimérico de poliéster apresentou diversas vantagens, como melhores propriedades mecânicas e de durabilidade, alta resistência de aderência e rápido endurecimento.
8	Lee <i>et al.</i> (2015)	Desenvolver concreto lunar usando um polímero termoplástico na construção de um posto avançado na Lua, assumindo que uma determinada quantidade de polímero tenha que ser importada da Terra.	A estrutura porosa do concreto polimérico medida no topo dos corpos de prova foi 7 a 8 vezes mais densa que no meio do corpo de prova. A resistência do concreto lunar foi adquirida em cerca de 12,6–12,9 MPa em 5 horas, sendo forte o suficiente para construir uma infraestrutura na Lua.
9	Romero <i>et al.</i> (2018)	Desenvolver compósito com poder de cicatrização in situ de materiais cimentados através de polímero resistente a ciclos de aquecimento, respondendo positivamente à caracterização mecânica.	Uma injeção de calor após a falha resulta em recuperação de rigidez em pequenas deformações de até 50%. Tal recuperação independe do número de ciclos de aquecimento (HN); ainda assim, a resistência à compressão não confinada de amostras remoldadas diminui com HN, sugerindo a degradação da resistência do polímero com ciclos de aquecimento. A resistência à elasticidade varia de cerca de 400 kPa até 200 kPa, com o aumento da quantidade de ciclos.

10	Miranda <i>et al.</i> (2017)	Avaliar a resistência de um compósito sem cimento e sem água para construção na lua com diferentes tipos de granulometria, teores de polímero e forma de manufaturar, através de um forno convencional ou forno solar.	Os tijolos produzidos com a tecnologia proposta apresentaram resistência à compressão significativa (1 a 2 MPa para tijolos com teor de polímero C = 5% e 3 a 8 MPa para tijolos com C = 10%)
11	Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008)	Avaliação da proporção ótima de materiais em compósito com resina epóxi e pó de granito através do planejamento de experimentos.	Observou-se que a maior resistência à compressão foi de 114,23 MPa e foi determinada com 20% em peso de epóxi e com a combinação de partículas de granito com taxa de 50% pequenas e 50% grandes (MIX 50-50).
12	Carvalho <i>et al.</i> (2018)	Caracterização do compósito com resina epóxi e resíduo de granito de pedra para aplicação em calçadas para pedestres.	Uma mistura de 67% de partículas residuais ásperas, 16% médias e 16% finas, com a condição mais compacta, permitiu o desenvolvimento de pedras artificiais de qualidade relativamente superior, que atendem aos requisitos industriais de absorção de água. A tensão de ruptura por flexão de ambas as pedras artificiais desenvolvidas em torno de 30 MPa é considerada satisfatória para uma pedra de alta resistência utilizada como revestimento na construção civil. O MEV revelou uma quantidade sensivelmente maior de pequenas cavidades nos compósitos com 90% em peso de resíduos de pedra.
13	Gonçalves <i>et al.</i> (2014)	Avaliar o comportamento mecânico do compósito.	No ensaio de tração, o módulo de elasticidade aumentou em média 318% e 192% em relação à resina epóxi pura com adição de 50% de cada tipo de granito. Com a diminuição da resistência à tração, que pode estar relacionada com a carga deste ensaio, provocando a propagação de fissuras, situação semelhante ocorre no ensaio de flexão com 30% de carga. Para o ensaio de compressão, os valores aumentam 121% e 65% em relação à resina epóxi pura com adição de 50% dos dois tipos de granito estudados.
14	Oh <i>et al.</i> (2021)	Desenvolver e mostrar ser possível um compósito com a menor quantidade possível de ligante, otimizando as propriedades mecânicas.	As amostras colhidas em vários locais apresentaram consistentemente uma alta resistência à flexão em torno de 23,5 MPa.

15	Silva <i>et al.</i> (2023)	<p>Produzir e avaliar as propriedades de placas de pedra artificial fabricadas usando metodologia de vibração, compressão e vácuo.</p>	<p>O material alcançou absorção de água de $0,13 \pm 0,03\%$, resistência à flexão de $32,77 \pm 3,29$ MPa, altura de ruptura de $0,45 \pm 0,12$ m e desgaste abrasivo de $1,65 \pm 0,02$ mm. Demonstrou boa adesão interfacial na análise microestrutural e exibiu resistência a manchas, ataque químico e testes de durabilidade através de ciclos úmidos e secos.</p>
----	----------------------------	--	--

2.4 Conclusões da Revisão

Neste capítulo, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura, abordando os ensaios que avaliam a resistência à compressão, tração, flexão, abrasão, absorção, bem como análises térmicas e microscópicas aplicadas aos diferentes tipos de concretos poliméricos discutidos nos estudos selecionados. Foram realizadas análises qualitativas, centradas especialmente na comparação de dados e parâmetros relacionados aos compósitos poliméricos. Desta forma, as principais conclusões derivadas desta revisão são:

- Em resposta à pergunta motivadora: o concreto polimérico se comporta na maior parte dos casos substituindo a aplicação do concreto de matriz cimentícia trazendo diversas vantagens, como também pontos que ainda precisam ser mais bem estudados, como é o caso da sua produção em larga escala a fim de atender a indústria da construção civil de forma mais ampla. Dentre as vantagens estão a resistência à compressão de valores equivalentes quando se fala em estrutura, além de baixíssima absorção de água, trazendo melhorias às construções, evitando a problemática da percolação de água ou acúmulo de umidade, principalmente em regiões úmidas e de períodos chuvosos mais intensos. Outro destaque é a capacidade de reutilização e reciclagem de distintos polímeros e torná-los primordiais em uma mistura. Os parâmetros adequados para o uso de concreto polimérico na construção civil seriam uma abrasão e absorção mínima, além de elevadas resistência à compressão e tração, resultados de uma interação microscópica que através de pontes e envolvimento adequados, ocorram a aglutinação das partículas juntamente com os polímeros.

- O contexto de motivação dos trabalhos possui cunho essencialmente prático e experimental motivado por aplicações já recorrentes. Nesse sentido, os compósitos poliméricos já se apresentam como bem estabelecidos em literatura, principalmente quando se trata de resinas e fibras poliméricas, mas não em utilização ainda. Nota-se finalmente que o nicho específico de compósitos poliméricos misturados à quente, como uma vertente dos concretos poliméricos, ainda têm muito a ser explorado e experimentado, tanto no trato metodológico, como nos resultados esperados e aplicações. Porém, resultados promissores já são vislumbrados pelos estudos aqui apresentados até agora.

- O panorama geral dos concretos poliméricos envolve a resistência à compressão mediana de 40 MPa, resistência à tração direta de 21 MPa, à tração na flexão de 21 MPa, abrasão de 1 a 3%, e absorção em torno de 0,25%. Tais resultados apresentam uma variação considerável, porém resume-se aqui o esperado para o estudo desenvolvido.

- Das significativas correlações estabelecidas entre as variáveis, destacam-se as evidências de pontes de ligamento entre as partículas na microscopia afetando diretamente no comportamento mecânico e físico dos compósitos, através da interferência na resistência à compressão com a absorção e porosidade. A aglomeração dos agregados dificultando a interação com a matriz resulta em propriedades mecânicas inferiores. Portanto, percebe-se a importância da aderência entre os componentes e adequada densidade do compósito, focando em uma metodologia específica, onde a graduação dos componentes também desempenha um papel significativo nos resultados.

- Por fim, apesar da grande heterogeneidade dos resultados, foi possível a elaboração de um cenário ótimo esperado para o compósito polimérico baseado em polipropileno reciclado misturado à quente proposto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

Para a realização e cumprimento dos objetivos deste trabalho, foi realizado um programa experimental, permitindo a caracterização e sondagem da manufatura do bloco aqui proposto, observando as informações acerca do seu desempenho físico e estrutural.

Esse estudo se propôs a desenvolver blocos compósitos à base de polipropileno reciclado com características físicas e mecânicas satisfatórias à construção civil através de moldagem e conformação em fôrma acoplada com resistências e pressão, variando a quantidade de finos e materiais residuais.

Esse tipo de compósito polimérico foi trazido por alguns autores com algumas modificações propondo modelos de moldagem variados, incluindo estudos com a simulação de solos lunares, como Miranda *et al.* (2017) e Lee *et al.* (2015), ou a utilização de agregados variados (Azeko *et al.*, 2023; Sarkar *et al.*, 2008).

Ante o exposto, destaca-se também a escassa literatura no que diz respeito a novas alternativas de compósitos poliméricos visando a utilização de polímeros reciclados atuando como elementos ligantes na mistura.

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa – PB em parceria com o Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA), o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) e o Laboratório de Estruturas (LabEst), localizados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande – PB.

3.2 Metodologia

As etapas metodológicas realizadas encontram-se descritas nos tópicos subsequentes, e compõem-se de maneira objetiva do planejamento experimental, quantitativo e coleta dos materiais, seguido da caracterização dos materiais, da produção dos blocos de concreto polimérico e suas propriedades, e, por fim, da elaboração de uma pasta polimérica e suas propriedades. Essa etapa final da pasta foi necessária para suprir uma necessidade do ensaio de resistência à compressão como será melhor explicitado posteriormente.

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas do projeto.

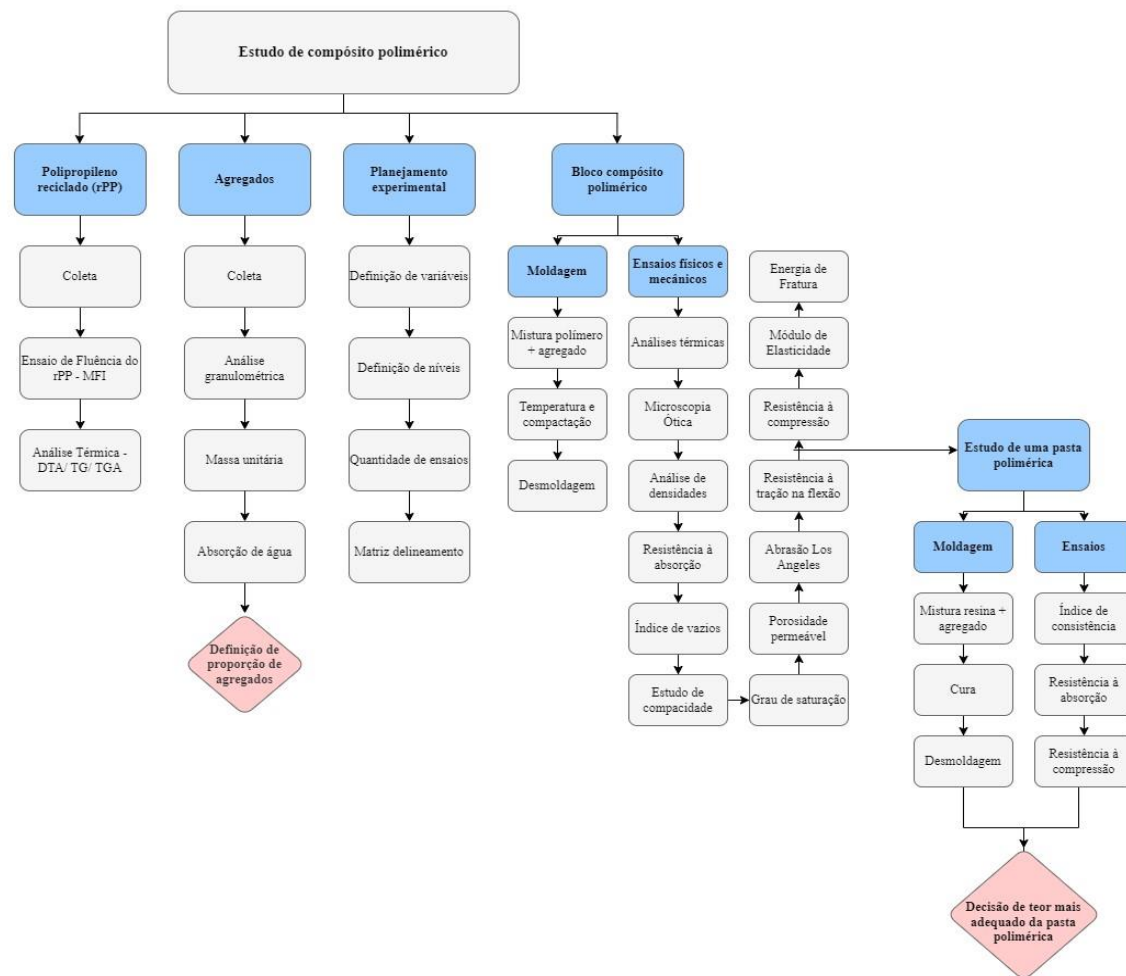


Figura 2 - Fluxograma das etapas da pesquisa

Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Planejamento Experimental

Nesta etapa foram definidos quantos níveis seriam utilizados para a variável porcentagem de polímero e granulometria dos agregados para elaboração da matriz experimental para os blocos poliméricos.

O programa experimental figura-se em coletar e caracterizar o material, a interação entre os materiais, a produção dos compósitos e caracterização das propriedades.

Foi utilizado o planejamento experimental estatístico fatorial 2^2 , totalizando 4 experimentos mais 3 no ponto central. O planejamento experimental foi executado com três repetições e analisado estatisticamente utilizando-se o programa Statistica 5.0, da StatSoft, em um nível de confiança de 95%. O planejamento fatorial e os valores reais e codificados das variáveis independentes estudadas estão apresentados na Tabela 17 para o bloco polimérico desenvolvido.

Tabela 17 - Valores reais e codificados das variáveis independentes

Variáveis independentes	Níveis		
	-1	0	+1
Teor de polímero - PP	15%	25%	35%
Relação pó de pedra/ cascalhinho (por peso da mistura total)	28%; 57%	37,5%; 37,5%	57%; 28%

Fonte: Autoria própria.

Esse planejamento estatístico foi definido para uma triagem mais rápida das variáveis mais relevantes no estudo, além de permitir o estudo dos efeitos principais dos fatores e dos efeitos das interações entre os níveis dos fatores, chegando a conclusões mais abrangentes com consequente redução do tempo dos processos, dos custos operacionais e da variabilidade operacional.

Os níveis de cada variável não foram escolhidos aleatoriamente. Testes anteriores antecederam essa decisão, através de experimentos visando a variação da quantidade de polímero fundido na mistura e da distribuição granulométrica utilizada. Percebeu-se através desses testes, que a relação pó de pedra e cascalhinho deveria existir, uma vez que apenas a porção mais grossa ou apenas a porção mais fina não daria uma consistência desejável com a matriz polimérica, dificultando a moldagem com uma compacidade deficiente. Por esse motivo, foi proposta a variação de 1/3 de pó de pedra (28%) com 2/3 de cascalhinho (57%) e vice-versa, onde o nível intermediário (nível 0) foi composto por metade dos agregados de pó de pedra e metade de cascalhinho.

Na tabela 18 está apresentada a matriz que descreve os experimentos.

Tabela 18 - Matriz delineamento do planejamento experimental estatístico fatorial

Ensaio	Nomenclatura	X ₁	X ₂	Valores codificados	
				PP (%)	Agreg. (%)
1	15_Gran. Grossa	-1	-1	15	28; 57
2	35_Gran. Grossa	+1	-1	35	28; 57
3	15_Gran. Fina	-1	+1	15	57; 28
4	35_Gran. Fina	+1	+1	35	57;28
5	25_Gran. Média 1	0	0	25	37,5; 37,5
6	25_Gran. Média 2	0	0	25	37,5; 37,5
7	25_Gran. Média 3	0	0	25	37,5; 37,5

Fonte: Autoria própria.

A nomenclatura lê-se, por exemplo para 15_Gran. Grossa, como 15% de polipropileno na mistura do compósito com 1/3 dos agregados composto por pó de pedra e 2/3 dos agregados composto por cascalhinho, o que corresponderia, na mistura total, a 15% de polipropileno, 28% de pó de pedra e 57% de cascalhinho.

A escolha da porcentagem de cada componente se deu de forma arbitrária após testes de tentativa e erro em laboratório. No entanto, vale ressaltar que as proporções foram adotadas em relação ao peso total da mistura seca do compósito antes da moldagem e como cada componente tem uma relação de massa específica diferente, se formos avaliar por volume teríamos as seguintes relações equivalentes (Tabela19) para o polipropileno em cada tipo de compósito.

Tabela 19 - Relação peso e volume do teor de polipropileno reciclado no compósito

Por peso	Por volume
15%	30%
25%	50%
35%	70%

Fonte: Autoria própria.

Enquanto para o estudo da pasta polimérica, uma vez que há apenas uma variável (o teor de resina), foram feitas 5 repetições de cada teor para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão, totalizando 15 amostras para cada ensaio. Para o ensaio de consistência, bastou uma repetição de cada teor, como solicitado na ABNT NBR 13276 (2016).

É importante citar que a determinação dos teores de 30, 35 e 40% de resina na mistura foi resultado de testes realizados por tentativa e erro, avaliando através da

viscosidade à olho nu da mistura que mais se assemelhasse ao de uma pasta convencional. A Tabela 20 a seguir mostra a nomenclatura utilizada para o estudo da pasta polimérica.

Tabela 20 - Delineamento experimental para pasta polimérica

Ensaio	Nomenclatura	X₁	Resina (%)
1	30_1	-1	30
2	30_2	-1	30
3	30_3	-1	30
4	30_4	-1	30
5	30_5	-1	30
6	35_1	0	35
7	35_2	0	35
8	35_3	0	35
9	35_4	0	35
10	35_5	0	35
11	40_1	+1	40
12	40_2	+1	40
13	40_3	+1	40
14	40_4	+1	40
15	40_5	+1	40

Fonte: A autoria própria.

3.2.2 Quantitativo e coleta dos materiais

A coleta do resíduo de polipropileno foi feita na empresa Plast Man na cidade de Campina Grande que utiliza o material no formato “macarrão cortado”, conforme pode ser observado na Figura 3, proveniente do derretimento de materiais plásticos de embalagens, tampas e rótulos. O polímero é reaproveitado para a fabricação de baldes para armazenamento de manteigas, tintas, entre outras utilidades.



Figura 3 - Polipropileno utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

O agregado pó de pedra foi adquirido no comércio advindo de pedreiras, onde é vendido ou doado devido sua alta disponibilidade por se tratar de um material residual (Figura 4). Da mesma forma, o agregado cascalhinho foi adquirido no comércio local e é encontrado em rios da região, vide Figura 5.

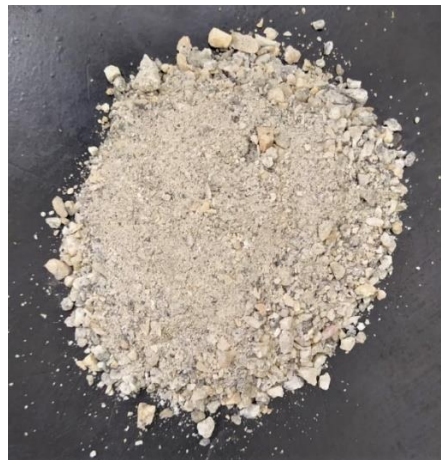


Figura 4 - Pó de pedra utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.



Figura 5 - Agregado cascalinho utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

A resina polimérica epóxi para manufatura da pasta polimérica a fim de realizar o ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto polimérico, foi comprada no mercado, juntamente com o catalisador para devida utilização (Figura 6).



Figura 6 - Resina epóxi e catalisador utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Caracterização dos materiais

Os agregados foram caracterizados através dos seguintes ensaios: Distribuição granulométrica (NBR 7211/2009), Massa Unitária (NBR NM 45/2006) e Absorção de água (NBR NM 30/2001 e NBR NM 53/2003).

3.2.3.1 Distribuição granulométrica

A caracterização granulométrica do pó de pedra e do cascalhinho em estudo foi realizada com base na norma ABNT NBR 7211 (2009), realizada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente. Determinou-se o diâmetro máximo da partícula e o módulo de finura, em que a amostra foi submetida à secagem em estufa com temperatura aproximada de 105 °C.

O conjunto de peneiras utilizadas correspondem às malhas da série normal de: 6,3, 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm, com fundo coletor e tampa, de acordo com ABNT NBR citada (Figura 7) para o agregado miúdo. Enquanto para o agregado graúdo as malhas das peneiras utilizadas para determinação da sua curva granulométrica foram as seguintes: 12,7; 9,5; 6,3; 4,8; 2,4 mm e o fundo coletor. Foi calculada a porcentagem dos materiais retidos e acumulados em cada peneira.



Figura 7 - Conjunto de peneiras e mesa vibratória utilizadas na análise granulométrica

Fonte: Autoria própria.

O módulo de finura foi calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de cada material estudado, nas peneiras da série normal, dividida por 100, com aproximação de 0,01.

As dimensões máximas características correspondem à abertura nominal, em mm, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual cada material apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

3.2.3.2 Massa unitária

A massa unitária dos agregados utilizados foi obtida através dos métodos descritos na ABNT NBR NM 45 (2006) e determinada através da razão entre a massa do agregado contida em um recipiente e o volume do mesmo, conforme Equação 1.

$$\text{Massa unitária} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} \quad (1)$$

Em que:

m_{ar} - massa do recipiente mais o agregado, Kg;

m_r - massa do recipiente vazio, Kg;

V - volume do recipiente, m³.

3.2.3.3 Absorção de água

A absorção é o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, expressa em porcentagem de sua massa seca sendo determinada pela norma ABNT NBR NM 30 (2001) para agregado miúdo e ABNT NBR NM 53 (2003) para agregado graúdo, conforme Equação 2.

$$\text{Absorção de água dos agregados} = \frac{m_s-m}{m} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

m_s - Massa ao ar da amostra na condição saturada e de superfície seca, g;

m - Massa da amostra seca em estufa, g.

3.2.3.4 Ensaio de Fluência do Polipropileno reciclado

O Índice de Fluidéz (IF), conhecido como Melt Flow Index (MFI) em inglês, é uma medida numérica que expressa a quantidade de polímero extrudado, em gramas, durante um período de 10 minutos, sob condições padrão. Sua unidade de medida é g/10 min, refletindo a facilidade de fluxo dos polímeros fundidos. A avaliação é conduzida utilizando um instrumento chamado plastômetro, conforme a norma ABNT NBR 9023 (2015).

No procedimento, uma quantidade específica da resina plástica em análise é colocada no plastômetro. A resina é então aquecida a 230 °C, conforme estabelecido pelas normas para o material de polipropileno reciclado. Após a fusão, uma carga de 2,16 kg é aplicada para forçar a extrusão do polímero por uma matriz. Posteriormente, cada amostra é pesada, resultando em um valor médio em g/10 min, que representa o índice de fluidez do plástico em questão. A Figura 8 ilustra o plastômetro utilizado durante a execução do ensaio.



Figura 8 - Plastômetro para medição do índice de fluidez

Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Produção dos blocos de concreto polimérico

Após a elaboração dos testes com diferentes proporções de materiais, blocos prismáticos foram confeccionados com medidas de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e 5 cm de altura, consoante Figura 9.

Dado que o produto visado neste trabalho ainda não foi difundido e trata-se de um projeto inovador, que até então não existe uma normatização para a moldagem desses blocos poliméricos em que não há cimento e o elemento aglutinador é o próprio polímero, uma metodologia própria foi elaborada nessa etapa do trabalho.



Figura 9 - Bloco do composto polimérico produzido na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que inicialmente o formato dos blocos seria de blocos vazados com furos, porém a metodologia não viabilizou a desmoldagem desses blocos, causando sempre a quebra ao meio por aderência ao molde, conforme pode ser visualizado na Figura 10. A Figura 11 mostra o bloco retirado da fôrma, porém apresentando falhas e rupturas. Por essa razão, os blocos foram confeccionados de forma maciça para que o estudo pudesse ser exequível.



Figura 10 - Tentativa de execução bloco composto com furos

Fonte: Autoria própria.



Figura 11 - Bloco compósito com furos demonstrando falhas em sua estrutura

Fonte: Autoria própria.

Uma vez determinadas as proporções, temperatura de fundição do polímero e quantos corpos de prova serão produzidos de acordo com o planejamento experimental, uma metodologia inovadora foi necessária para misturar os componentes, de forma que derretesse o polipropileno, envolvendo todas as partículas dos agregados, de maneira que ao endurecer em temperatura ambiente e com a presença de uma pressão que compactasse a mistura, o bloco pudesse ser desmoldado sem a presença de segregação de algum componente, vazios, marcas superficiais ou quebradiço. Para isso, contou-se com o auxílio do engenheiro mecânico, professor e pesquisador Marconi Farias para o desenvolvimento de um equipamento (Figura 12) para melhor aquecimento do polímero, mistura e constituição do produto final: o compósito polimérico sem a utilização de cimento ou água.



Figura 12 - Etapa construtiva do equipamento de moldagem dos blocos

Fonte: Autoria própria.

A moldagem e compactação dos blocos foi feita através de prensagem e aquecimento em maquinário próprio. O maquinário apresenta a configuração de uma fôrma manual onde, a temperatura faz com que o polipropileno funda e aglutine as partículas de agregado, dando forma ao bloco.

O maquinário elaborado é constituído por um controlador de temperatura, um sensor de temperatura, uma chave de acionamento do controlador e três resistências elétricas do tipo placa cerâmica localizadas no fundo do molde, e as outras duas nas laterais maiores, como pode ser analisado nas Figuras 13 A, B e C abaixo. Fisicamente, o molde metálico é composto por uma base, uma fôrma retangular nas medidas já explicitadas do bloco, abas para encaixe e retirada do bloco e uma tampa para fechar o molde, ajudando na compactação enquanto o polipropileno é fundido e o bloco preparado.

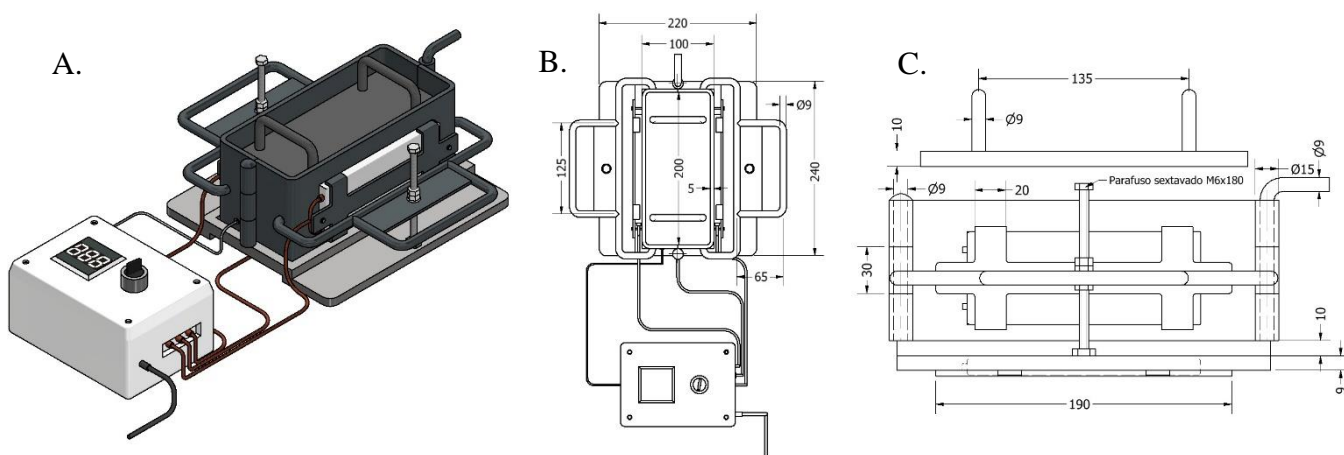


Figura 13 - Equipamento pronto para moldagem dos blocos compostos (A), vista superior (B) e vista frontal (C)

Fonte: Autoria própria.

O esquema da Figura 14 a seguir ilustra o processo de moldagem dos blocos.

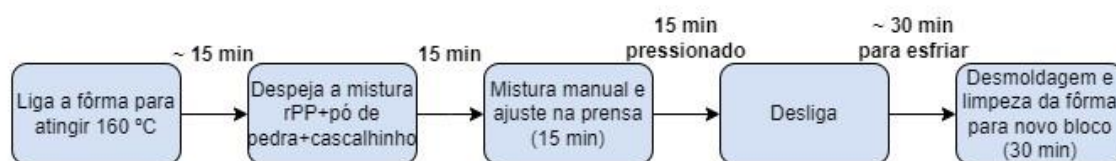


Figura 14 - Esquema de moldagem dos blocos compostos

Fonte: Autoria própria.

Inicialmente o equipamento é ligado até chegar à temperatura interna desejada para o derretimento do polímero (cerca de 160°C). Enquanto isso, os dois componentes da mistura agregado + polímero são pesados nas devidas proporções desejadas para o estudo (15, 25 ou 35% por peso) e misturados em um recipiente à parte manualmente (Figura 15). Após o derramamento da mistura em temperatura ambiente no molde quente, tampa-se o equipamento e deve-se esperar cerca de 15 minutos enquanto o material aquece e começa a derreter. No entanto, como não há fonte de calor na face superior do molde retangular, os grãos de polipropileno não fundem ao mesmo tempo, precisando de uma mistura manual a fim de homogeneizar o compósito, trazendo as partículas já derretidas para cima e vice-versa. Após alguns testes de procedimento, percebeu-se a importância dessa pausa para misturar os componentes à quente.



Figura 15 - Pesagem da mistura agregado + polímero

Fonte: Autoria própria.

Com a adequada aglutinação das partículas e derretimento do polipropileno, mais 15 minutos são necessários para uma acomodação adequada da mistura dentro do molde metálico. Durante essa etapa, a prensa é acionada para através da tampa, aplicar força e

minimizar o volume de vazios no bloco (Figura 16). Essa força não é registrada, pois como a mistura ainda está quente e fluida, ela cede e não resiste a essa força, escapando material pelas laterais em baixo e por cima na tampa (Figura 17). Depois desse tempo, o equipamento pode ser desligado e espera-se esfriar para endurecer o bloco.

Utilizando-se de um ventilador nesta etapa para acelerar o endurecimento do bloco, cerca de 30 minutos depois pode-se começar a tirar o bloco do molde através de parafusos acoplados à base que empurram a fôrma, facilitando a desmoldagem. Abrindo-se a fôrma na lateral menor através de suas dobradiças, é possível desenformar o bloco e desgrudando também a tampa para que o bloco após extrudado, saia íntegro do molde, sem marcas, nem quebras.



Figura 16 - Etapa de moldagem e prensagem

Fonte: Autoria própria.



Figura 17 - Vazamento de polipropileno pelos cantos inferiores e pela tampa

Fonte: Autoria própria.

Após a desmoldagem do bloco, um novo processo deve ser iniciado para confecção de um novo bloco na mesma fôrma. A limpeza e mistura de uma nova composição se fazem necessárias e levam em torno de 30 minutos. Assim, como demonstrado no esquema da Figura 14, a confecção de um bloco leva em torno de 2 horas, o que tornava possível fazer em torno de 4 blocos por dia.

Ao longo dos diferentes testes, tanto de composição granulométrica, como de etapas de moldagem, evoluções e mudanças foram feitas. No início dos testes, esperava-se conseguir fazer blocos com furos. No entanto, as dificuldades de moldagem e desmoldagem foram grandes frente aos prazos a serem cumpridos. Portanto, a base foi refeita e readaptada para facilitar a moldagem, assim como as resistências precisaram ser mudadas. O bloco foi ficando mais robusto (Figura 18) e menos quebradiço. Porém, sabe-se que ainda há melhorias a serem feitas, além de uma produção em larga escala.



Figura 18 - Evolução dos blocos produzidos

Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Propriedades do bloco compósito

Nesta etapa foram feitos os ensaios necessários para a caracterização do bloco compósito de concreto polimérico, visando conhecer suas principais propriedades. Vale lembrar que as normas foram utilizadas como base para os procedimentos, mas que não puderam seguir à risca suas determinações, já que não existem normas específicas para esse tipo de compósito e os autores tiveram que adaptar às normas mais próximas da utilização prevista.

3.2.5.1 Análises térmicas

As análises térmicas foram realizadas através de ensaios utilizando os métodos termogravimétricos, em que a perda de massa da amostra foi registrada continuamente à medida que a temperatura aumentava a uma razão constante. Os ensaios DTA, TGA e DTG foram realizados em um termo balança, marca SHIMADZU, modelo DTG-60H - Simultaneous DTA-TGA Apparatus no Laboratório de Análises Térmicas da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, utilizando-se alumina como padrão de referência, taxa de aquecimento 10°C/min,

atmosfera de nitrogênio com fluxo de gás 100 ml/min e temperatura variando de ambiente até 500°C. A Figura 19 a seguir mostra o equipamento utilizado.



Figura 19 - Equipamento TGA/DTA

Fonte: Autoria própria.

Nas curvas TGA, a perda de massa é caracterizada por duas temperaturas principais no eixo horizontal, que são a temperatura inicial e final de decomposição da amostra. A diferença entre elas é correspondente ao intervalo de reação. Segundo Matos *et al.* (2009), um dado importante obtido a partir da curva TGA é a curva derivada termogravimétrica (DTG), relativa à primeira derivada da variação de massa em relação ao tempo. Com as duas curvas sobrepostas e os picos em áreas proporcionais à essa variação de massa sofrida pela amostra ensaiada, as informações são mais facilmente visualizadas.

Na análise térmica diferencial (DTA), a variação de temperatura entre a substância de referência é registrada em relação à temperatura de referência do forno, durante a exposição controlada de ambos, a substância e o material de referência, a uma programação controlada de temperatura.

A TGA e a DTA são técnicas possíveis de serem feitas simultaneamente no mesmo equipamento, como foi feito nesse estudo, propondo acompanhar as mudanças físicas e de decomposição dos compósitos de polipropileno reciclado com os agregados, assim como apenas do polipropileno reciclado.

3.2.5.2 Microscopia ótica

A técnica de microscopia ótica permite a ampliação na visualização através de imagens utilizando a luz visível para examinar amostras em detalhes microscópicos. Essa técnica possibilita ampliar as imagens das amostras, permitindo observar detalhes que escapam ao “olho nu”. Por esse motivo, essa análise foi feita nos compósitos de concreto polimérico a fim de observar mais de perto a interface e analisar a distribuição dos componentes da mistura.

A partir das imagens obtidas, foi possível analisar a micro estruturação das partículas das amostras, além da região ocupada por poros, fatores que influenciam diretamente nas propriedades dos materiais em estudo.

As análises foram realizadas utilizando o microscópio digital Hirox KH 1300 (Figura 20) e foi manuseado com zoom variando de 6 até 350 vezes de aumento.

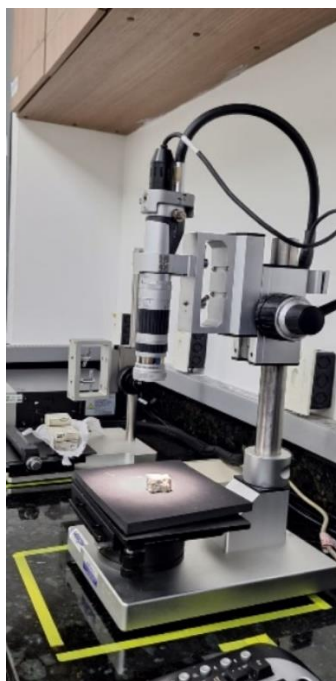


Figura 20 - Microscópio utilizado na pesquisa

Fonte: A autoria própria.

3.2.5.3 Análise de densidades

A densidade é a característica mais comum no âmbito dos materiais de construção e é um parâmetro comumente utilizado, pois é crucial na seleção, projeto e desempenho de estruturas e componentes. De acordo com a densidade, geralmente é calculado o gasto nas etapas de transporte, empilhamento, trabalhabilidade com o material, entre outros fatores.

A densidade, definida como a massa por unidade de volume, influencia diretamente diversas características dos materiais utilizados na construção. Nesse estudo essa análise foi feita a fim de comparar a relação peso x volume de componentes da construção como blocos de terra, de concreto e de diferentes metodologias de compósitos poliméricos.

A massa e o volume considerados nos cálculos foram as medidas absolutas, determinadas ao ar, considerando vazios e poros do compósito, da forma como seria comercializado ou utilizado em obras de construção. A Equação 3 mostra a relação massa e volume.

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} \quad (3)$$

Onde:

ρ – Densidade aparente do bloco compósito;

m_t – Massa total determinada ao ar;

V_t – Volume total do compósito, considerando vazios e poros internos.

Uma vez que o bloco é no formato de um paralelepípedo, as medidas foram aferidas 3 vezes em cada direção a fim de determinar o volume dos blocos.

3.2.5.4 Absorção de água

Inicialmente os blocos foram submetidos ao processo de secagem em estufa como prescrito na norma utilizada como base (NBR 9778/2005), sendo determinada a massa seca da amostra. Em seguida, os blocos foram imersos em água à temperatura ambiente, por 24, 48 e 72 h (Figura 21).

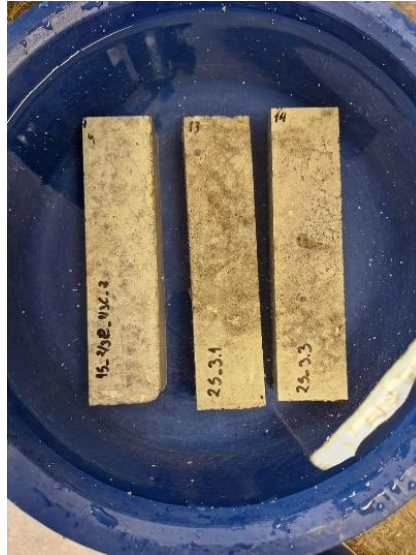


Figura 21 - Ensaio de absorção de água em blocos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

Após cada intervalo de tempo proposto de submersão, os blocos foram pesados, determinando-se assim a sua massa saturada, obtida através de uma drenagem rápida de 60 segundos sobre uma tela de malha, e removendo a água superficial visível com um pano úmido.

A absorção de água por imersão foi determinada através da Equação 4.

$$\text{Absorção de água por imersão} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

m_1 - massa do bloco seco em estufa, g;

m_2 - massa do bloco saturado, g.

3.2.5.5 Índice de vazios

O índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, também regido pela norma ABNT NBR 9778 (2005). A Equação 5 demonstra essa relação.

$$\text{Índice de vazios} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

M_{sat} - massa do corpo de prova saturado, g;

M_s - massa do corpo de prova seco em estufa, g e,

M_i - massa do corpo de prova saturado, imerso em água, g.

3.2.5.6 Estudo de compactidade

A compactidade, muitas vezes expressa como a densidade ou índice de vazios, é uma propriedade importante que afeta suas características de resistência, permeabilidade, entre outras. Geralmente é determinada através dos índices de vazios máximo e mínimo. No entanto, essa determinação é feita para solos. Outra forma de ser estimada a compactidade, seria através da curva de compactação ótima, onde a densidade máxima teórica seria calculada a partir dos tamanhos de partículas e do teor de umidade específico. Como esse trabalho não envolve solo nem água, uma vez que é feito utilizando-se agregados classificados como areia grossa (pó de pedra) e agregado graúdo Faixa 1 (cascalhinho), a compactidade e empacotamento do compósito serão discutidos baseando-se no índice de vazios (obtido no ensaio de absorção de água do compósito) e a partir dos cálculos da porosidade e grau de saturação (Miranda *et al.*, 2024) pelas Equações 6 a 12 a seguir e tópicos subsequentes.

$$M_{PP} = TP \times M_s \quad (6)$$

$$M_{agg} = M_s - M_{PP} \quad (7)$$

$$V_{PP} = \frac{M_{PP}}{0,90} \quad (8)$$

$$V_{agg} = \frac{M_{agg}}{2,62} \quad (9)$$

$$V_{sol} = V_{PP} + V_{agg} \quad (10)$$

$$V_v = V_t - V_{PP} - V_{agg} \quad (11)$$

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (12)$$

Em que:

M_{PP} – Massa de polipropileno, g;

TP – Teor de polipropileno (por exemplo, 15%);

M_{agg} – Massa de agregado, g;

V_{PP} – Volume de polipropileno, cm^3 ;

V_{agg} – Volume de agregado, cm^3 ;

V_{sol} – Volume de sólidos, cm³;

V_v – Volume de vazios, cm³;

n – Porosidade.

Nas Equações 8 e 9 os valores de 0,90 e 2,62 correspondem, respectivamente, à massa específica do polipropileno e dos agregados segundo Chaturvedi, Singh e Sharma (2021) e Almada *et al.* (2020).

3.2.5.7 Grau de saturação

O grau de saturação do compósito nada mais é que a relação entre o volume de água pelo volume de vazios do bloco. Ou seja, trata-se de avaliar qual o percentual dos vazios que permitem a entrada de água. Para isso, os seguintes cálculos são feitos (Equações 13 a 17) a partir dos dados de absorção obtidos no ensaio de resistência à absorção de água.

$$M_{sol} = \frac{M_t}{(W/100+1)} \quad (13)$$

$$M_w = M_t - M_{sol} \quad (14)$$

$$M_w = V_w \quad (15)$$

$$V_{ar} = V_v - V_w \quad (16)$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (17)$$

Em que:

M_{sol} – Massa de sólidos no compósito, g;

M_t – Massa total do compósito, g;

W – imersão à 24, 48 ou 72 hrs, %;

M_w – Massa de água, g;

V_w – Volume de água, cm³;

V_{ar} – Volume de ar, cm³;

S – Grau de saturação.

3.2.5.8 Porosidade permeável

A porosidade permeável é a razão entre o volume de água presente na amostra no ensaio de absorção de água por imersão pelo volume total da amostra. Se trata de uma análise similar ao grau de saturação, porém relacionada com o volume total do corpo de prova, como mostra a Equação 18.

$$n_p = \frac{V_w}{V_t} \quad (18)$$

Em que:

n_p – Porosidade permeável.

3.2.5.9 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão emprega o princípio de viga simplesmente apoiada com duas forças centradas nos terços do vão, onde através de máquina de ensaio específica, seja assegurada a aplicação da força perpendicularmente às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades (Figura 22).

A norma ABNT NBR 13279 (2005) foi utilizada como base. Para esse ensaio, foi utilizado o próprio bloco no tamanho de aproximadamente 4 cm x 10 cm x 20 cm.



Figura 22 - Ensaio de resistência à tração na flexão do bloco polimérico

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, a força deve ser aplicada continuamente e sem choques. A força aplicada durante o ensaio foi na taxa de $50 \pm 10 \text{ N s}^{-1}$.

A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 20.

$$R_f = \frac{1,5 * F * L}{db^2} \quad (20)$$

Onde:

R_f – Resistência à tração na flexão, MPa;

F – Força máxima registrada no centro do prisma, N;

L – Distância entre os suportes, mm;

d – Largura do bloco, mm;

b – Espessura do bloco, mm.

3.2.5.10 Resistência à compressão dos blocos

Na continuação da análise mecânica do bloco, foi realizado o ensaio de resistência à compressão tomando como base a ABNT NBR 8492 (2012), em que o bloco retangular foi ensaiado cortado ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão. As duas metades obtidas tiveram que ser superpostas por suas faces maiores e invertidas, de acordo com a Figura 23, ligando-as com uma camada fina de pasta polimérica e aguardando o endurecimento da mesma.



Figura 23 - Blocos cortados para realização do ensaio de resistência à compressão

Fonte: Autoria própria.

Para cumprir com o que a ABNT NBR 8492 preconiza, uma pasta polimérica foi desenvolvida para promover a ligação das duas partes dos blocos, pois a resistência da pasta não poderia ser menor que a do tijolo em ensaio. Dessa forma, a pasta polimérica foi ensaiada como será exposto nos próximos tópicos.

A Figura 24 mostra a prensa utilizada para o ensaio.



Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão do bloco polimérico

Fonte: Autoria própria.

O bloco foi colocado na prensa de modo que o seu centro de gravidade coincidisse com o eixo de carga dos pratos da prensa. A tensão foi aplicada progressivamente e sem choque, à razão de $0,25 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.

A resistência à compressão foi calculada segundo a Equação 21.

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (21)$$

Onde:

R_c – Resistência à compressão simples, MPa;

F – Carga de ruptura do bloco, N;

S - Área de aplicação da carga, mm^2 .

3.2.5.11 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material ou uma resistência do material à deformação elástica. Esse dado foi calculado através dos dados retirados da curva tensão x deflexão do ensaio de tração na flexão utilizando-se da Equação 22 a seguir.

$$E = \frac{l^3 F}{4bh^3 v} \quad (22)$$

Em que:

- E – Módulo de elasticidade, MPa;
- l – Distância entre apoios, mm;
- F – Força máxima suportada pelo bloco, N;
- b – Largura do bloco, mm;
- h – Altura do bloco, mm;
- v – Deflexão, mm.

Para o compósito polimérico em estudo, é importante ter em mente que quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido é o material ou menor será a deformação elástica para uma mesma carga aplicada.

3.2.5.12 Energia de fratura

A energia de fratura é a medida da capacidade de um material de absorver energia antes de fraturar e é entendida como a área sob a curva tensão x deformação até o ponto de fratura no ensaio de tração, e foi, portanto, calculada dessa maneira.

A energia de fratura representa a quantidade de energia necessária para a formação de uma trinca por unidade de área, em que quanto mais resistente o material, mais energia será necessário o bloco ter acumulado.

3.2.6 Elaboração de pasta polimérica compatível com o concreto polimérico

Para a elaboração da pasta polimérica que seja compatível com o concreto polimérico à base de polipropileno reciclado, foi utilizada uma resina epóxi (30, 35 e 40% por peso da matriz) junto com a porção mais fina do resíduo mineral de pó de pedra. Tal elaboração de pasta polimérica foi regida pela norma ABNT NBR 16590 (2017), que trata de compostos poliméricos para assentamento de alvenaria de vedação, trazendo requisitos relacionados à apresentação, embalagem, caracterização e desempenho do produto.

Na confecção dos corpos de prova da pasta, não havendo a necessidade de temperatura nem pressão, trata-se de um procedimento mais prático. Inicialmente, a resina epóxi juntamente com o catalisador foram misturados manualmente com o resíduo do pó de pedra nas devidas proporções conforme definidos no estudo e derramado em moldes para endurecimento e posterior desmoldagem. Os corpos de prova aqui tiveram as dimensões de 5 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro, assumindo formato cilíndrico. As Figuras 25 e 26 mostram os corpos de prova para essa pasta polimérica no estado fresco e endurecido, respectivamente.



Figura 25 - Pasta polimérica no estado fresco

Fonte: Autoria própria.



Figura 26 – Corpo de prova da pasta polimérica no estado endurecido (50 mm de altura e 25 mm de diâmetro)

Fonte: Autoria própria.

3.2.7 Propriedades da pasta polimérica

Para o estudo físico da pasta polimérica desenvolvida, foram utilizados os ensaios do índice de consistência através da norma ABNT NBR 13276 (2005), com adaptações, e o ensaio de absorção de água por imersão, seguindo a norma ABNT NBR 9778 (2005).

Corpos de prova para análise de resistência mecânica da pasta polimérica também foram feitos, obedecendo à norma ABNT NBR 13279 (2005) nos ensaios de resistência à compressão, com adaptações.

Para a pasta polimérica elaborada, assim como para o bloco compósito, as normas foram utilizadas como referência base, nem sempre sendo possível segui-las à risca por se tratar de um material inovador, diferentemente dos materiais convencionais conhecidos que geralmente envolvem o uso de cimento.

3.2.7.1 Índice de consistência

O índice de consistência de uma pasta nada mais é que uma propriedade pela qual a pasta tende a resistir à deformação e também espera-se ter uma noção da trabalhabilidade da pasta na construção ao longo do tempo de aplicação. Como o estudo está verificando a viabilidade da criação de uma pasta polimérica para ser utilizada junto ao bloco de concreto polimérico, justifica-se a necessidade de analisar e conhecer o índice de consistência desse novo produto.

Logo após a realização da mistura dos componentes da nova pasta, o teste de índice de consistência deve ser realizado na mesa de consistência com a fôrma troncocônica, conforme especifica a ABNT NBR 13276 (2005). A pasta deve ser colocada na fôrma troncocônica em 3 camadas aplicando-se 15, 10 e 5 golpes, respectivamente em cada camada. Após rasar o topo com uma régua, pode-se retirar a fôrma, levantando-a verticalmente com cuidado. Em seguida, começa-se a mover a manivela do equipamento para medir a consistência, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30 segundos, para provocar o abatimento do tronco de cone de pasta.

O índice de consistência é a média aritmética de dois diâmetros ortogonais da base do tronco de cone de pasta após o abatimento (Figura 27). O índice de consistência é considerado normal quando se apresentar no intervalo de 230 a 260 mm.



Figura 27 - Ensaio de consistência para a pasta polimérica

Fonte: Autoria própria.

3.2.7.2 Absorção de água

Para a absorção de água da pasta polimérica, primeiramente deve ser determinada a massa da amostra ao ar e, em seguida, os corpos de prova são levados à estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C. Completada a secagem em estufa e determinada a massa, procede-se à imersão da amostra em água à temperatura ambiente, durante 72 h (Figura 28).



Figura 28 - Ensaio de resistência à absorção por imersão da pasta polimérica

Fonte: Autoria própria.

A amostra é mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 h e 2/3 nas 4 h subsequentes, estando completamente imersa nas 64 h restantes, sendo determinadas as massas, decorridas 24, 48 e 72 h de imersão total em água. Com as massas determinadas ao longo do procedimento, e conforme a norma ABNT NBR 9778 (2005), a absorção de água por imersão é determinada através da Equação 23.

$$\text{Absorção de água por imersão} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (23)$$

Em que:

M_{sat} - Massa do corpo de prova saturado, g;

M_s - Massa do corpo de prova seco em estufa, g.

3.2.7.3 Resistência à compressão axial

Para o cálculo da resistência à compressão axial da pasta polimérica, o corpo de prova deve ser posicionado no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, como mostrado na Figura 29.



Figura 29 - Ensaio de resistência à compressão da pasta polimérica

Fonte: Autoria própria.

A carga deve então ser aplicada na razão de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova (NBR 13279/2005). Assim, a resistência à compressão foi calculada segundo a Equação 24.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (24)$$

Onde:

R_c – Resistência à compressão, MPa;

F_c – Carga máxima aplicada, N;

A – Área da seção circular do cilindro, mm².

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Caracterização dos componentes do compósito

Nos tópicos seguintes serão apresentados os resultados para os ensaios envolvendo os componentes da mistura e sua caracterização para devida utilização nos compósitos elaborados. Dentre os ensaios, estão os de análise granulométrica, massa unitária, absorção dos agregados e o ensaio de fluência do polipropileno.

3.3.1.1 Análise granulométrica

A curva de granulometria representa a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos, e a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência. Por meio da análise granulométrica é possível obter conhecimento sobre cada componente isoladamente, para compor a mistura ideal para o compósito polimérico. Observa-se que o pó de pedra possui característica de graduação uniforme, com grande maioria dos grãos apresentando mesma faixa de tamanho, mas com diversificação do tamanho das partículas. Enquanto o cascalhinho possui graduação de partículas entre grossas e finas. A Figura 30 e Tabela 21 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos materiais.

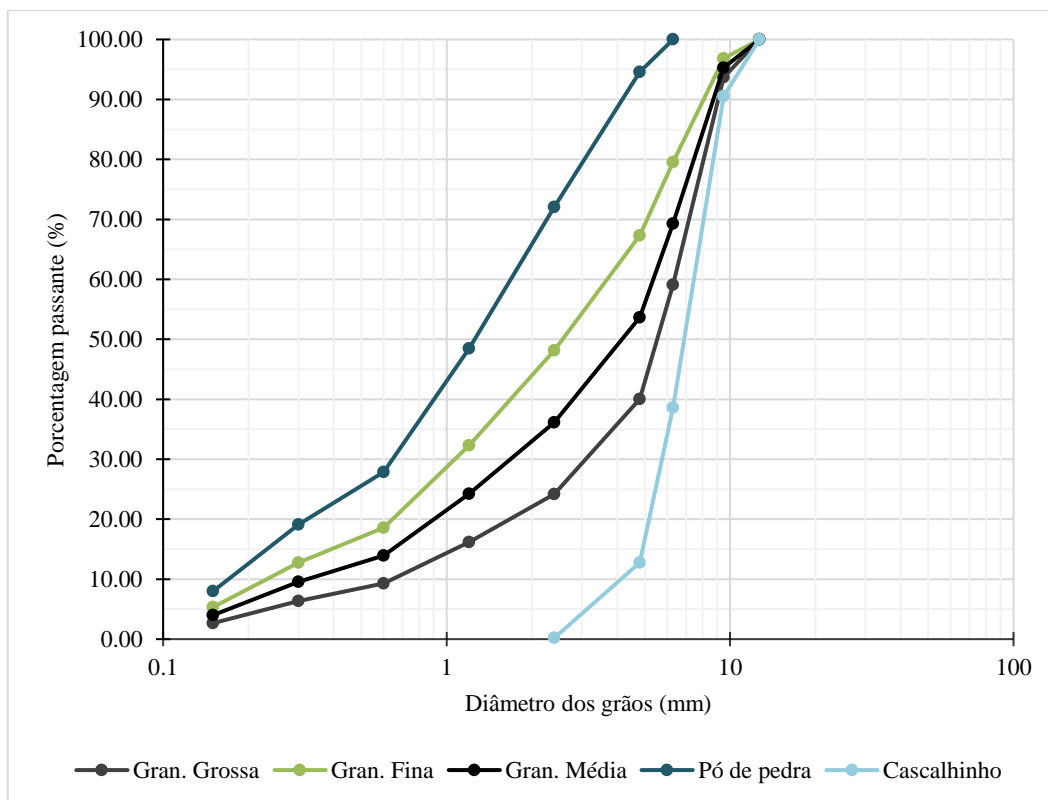


Figura 30 - Curva granulométrica dos agregados e suas combinações utilizadas no estudo

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Distribuição das partículas dos grãos e determinação de dimensão máxima característica e módulo de finura

Diâmetro (mm)	% Passa	
	Pó de pedra	Cascalhinho
12,7	100	100
9,5	100	90,54
6,3	100	38,61
4,8	94,58	12,73
2,4	72,07	0,21
1,2	48,44	0
0,6	27,85	0
0,3	19,10	0
0,15	7,99	0
Dimensão máxima característica (mm)	6,3	12,7
Módulo de finura	3,3	-

Fonte: Autoria própria.

Para o agregado pó de pedra, que se caracteriza aqui por agregado miúdo, a ABNT NBR 7211 (2009) adequa esse resíduo como estando na zona utilizável pelos

limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, com uma dimensão máxima característica de suas partículas de 6,3 mm e módulo de finura 3,3 tornando-o um agregado de classificação grossa.

O cascalhinho atende aos limites indicados para o agregado graúdo na ABNT NBR 7211 (2009), correspondendo à zona granulométrica 4,75/12,7, de dimensão máxima característica de 12,7 mm.

É importante frisar que foi decidido utilizar os agregados na granulometria original retirados da natureza, uma vez que gera menos resíduos, evitando o descarte de determinadas faixas granulométricas em detrimento de outras. Assim, ambos os agregados aqui escolhidos foram utilizados em seu estado natural e granulometria genuína para a fabricação dos blocos compósitos.

Adicionalmente, é relevante lembrar que o polipropileno não passou pela determinação da granulometria pelo método do peneiramento, pois essa determinação não se torna essencial para o estudo, já que para o compósito ele passará por uma fundição passando do estado sólido para o líquido/pastoso e novamente enrijecido para o estado sólido em novo formato.

3.3.1.2 Massa unitária dos agregados

A massa unitária do pó de pedra e do cascalhinho utilizados nesta pesquisa consta na Tabela 22.

Tabela 22 - Massa unitária do pó de pedra e cascalhinho

Material	Massa unitária (kg m⁻³)
Pó de pedra	1673,86
Cascalhinho	1469,06

Fonte: Autoria própria.

O pó de pedra apresentou uma maior massa unitária que o agregado cascalhinho. Tal fato se justifica, possivelmente, pela maior quantidade de vazios que o pó de pedra apresenta, acarretando em uma menor massa específica, como pode ser observado no comparativo dos dois agregados em estudo.

3.3.1.3 Absorção de água dos agregados

A absorção de água do pó de pedra e o cascalhinho encontram-se na Tabela 23 na qual pode-se concluir que a absorção do pó de pedra apresentou maiores valores, uma vez que apresenta uma maior quantidade de vazios, armazenando mais água quando submerso e após secagem superficial.

Tabela 23 - Absorção de água do pó de pedra e cascalhinho

Material	Absorção (%)
Pó de pedra	8,08
Cascalhinho	1,34

Fonte: Autoria própria.

3.3.1.4 Ensaio de Fluência do Polipropileno reciclado

Para a determinação da fluência do plástico, foi utilizada a temperatura de ensaio de 230 °C e a carga constante de 2,16 kg, já que se trata de polipropileno reciclado, conforme indica a literatura (NBR 9023, 2015). A Tabela 24 a seguir mostra o resultado em g/10min.

Tabela 24 - Dados do índice de fluidez do polipropileno reciclado

ITEM	TEMPERATURA: 230 ° C	
	1	2
1	0,4469	0,4466
2	0,4187	0,4454
3	0,4431	0,4370
4	0,4006	0,5194
5	0,4143	0,5329
6	0,4242	
7	0,4037	
MÉDIA	0,4216	0,4763
DESVIO	0,0179	0,0459
MFI (g/10min)	25,30	28,58

Fonte: Autoria própria.

O índice de fluidez oferece informações sobre a viscosidade do material, em que quanto maior for o seu valor, menor é a viscosidade, ou seja, vai apresentar maior resistência ao escoamento.

Observando os resultados apresentados na Tabela 24, pode-se inferir que o índice de fluidez do polipropileno utilizado na pesquisa é considerado viscoso, com valores variando em média de 25 a 28 g/10 min. Sabe-se que cada modificação no polímero altera esses valores, seja uma pigmentação adicionada, um aditivo químico, a origem desse plástico ou a quantidade de vezes que foi reprocessado. Por essa razão, o ensaio de índice de fluidez se torna essencial ao estudo, permitindo antecipar algumas condições de processamento.

Tomando como base outros estudos com valores de 16,2 g/10min (Phuong *et al.*, 2010) e entre 1 e 12 g/10min (Gupta *et al.*, 2012), sob as mesmas condições de ensaio (230 °C e 2,16 kg), pode-se dizer que os valores obtidos são acima do esperado, o que pode gerar um alerta para a metodologia de manufatura dos blocos e consequentes resultados.

3.3.2 Blocos compósitos de concreto polimérico

Os resultados e suas análises para a fabricação dos blocos compósitos estão descritos e discutidos nos tópicos seguintes.

3.3.2.1 Análises térmicas

A análise térmica contou com os ensaios de análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG), além da análise térmica diferencial (DTA), em que foram possíveis a aquisição dos dados sobre a variação de massa do polipropileno nas misturas dos blocos, as faixas de temperatura de decomposição e fusão, além de permitir fazer algumas inferências sobre a atuação do polipropileno no bloco. A Figura 31 mostra as curvas para os ensaios TGA e DTG para o polipropileno reciclado, isoladamente.

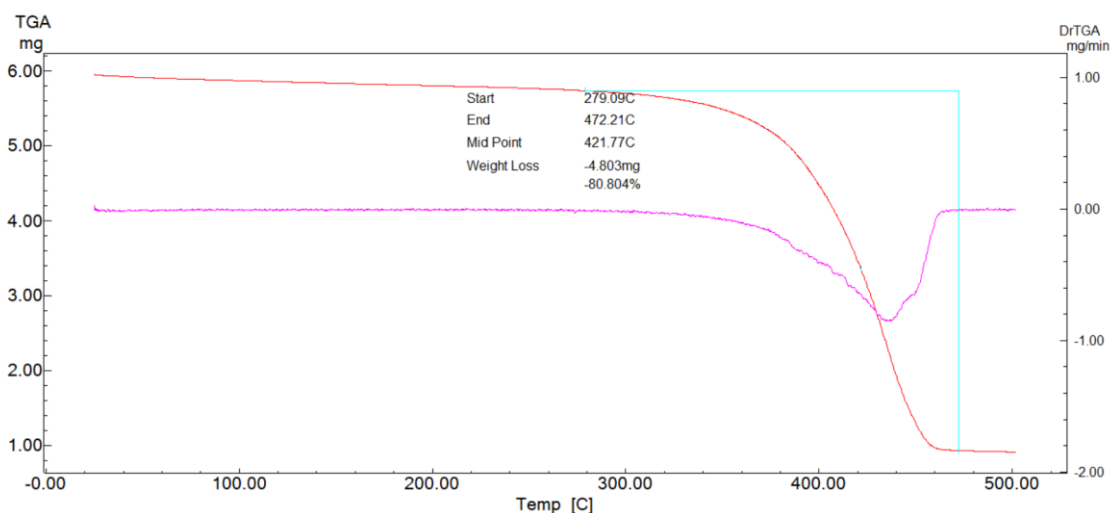


Figura 31 - Curva TGA/DTG para o polipropileno reciclado utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

Analisando as curvas na Figura 31, é possível observar uma inclinação inicial, evidenciando uma perda de massa, que não chega nem a 5% do material. No entanto, a termogravimetria de um polipropileno puro não teria essa inclinação. Portanto, a inclinação inicial presente na curva acontece devido ao material ser reciclado ou por alguma impureza, solvente ou alguma umidade adquirida no ambiente. Também é possível perceber que a degradação acontece entre as temperaturas de 279°C a 472°C aproximadamente, estando dentro da faixa de temperatura de degradação do polipropileno virgem de acordo com a literatura (Mofokeng *et al.*, 2011; Gupta *et al.*, 2012).

O polipropileno neste ensaio estava na condição em que foi cedido pela empresa, ou seja, ainda não havia passado pelo processo de conformação de um bloco. Então, esse polipropileno reciclado foi fundido apenas duas vezes até esta etapa, que seria a fundição do primeiro uso do plástico para gerar o produto acabado, seja embalagem plástica, ou sacolas, tampas, entre outros. E a segunda fundição sendo a da reciclagem após o término da vida útil do primeiro produto acabado.

A degradação do polipropileno virgem acontece de forma completa atingindo o 100% no gráfico, enquanto no polipropileno reciclado aqui estudado, a perda total deu de aproximadamente 80%, já que teve uma parte que foi perdida que não está sendo contabilizada por não ser uma degradação total, o que pode corresponder a impurezas, aditivos, solventes e até outros plásticos envolvidos que aqui não convém identificá-los.

As Figuras 32 e 33 trazem os gráficos TGA/DTG para os blocos de 15% de polipropileno.

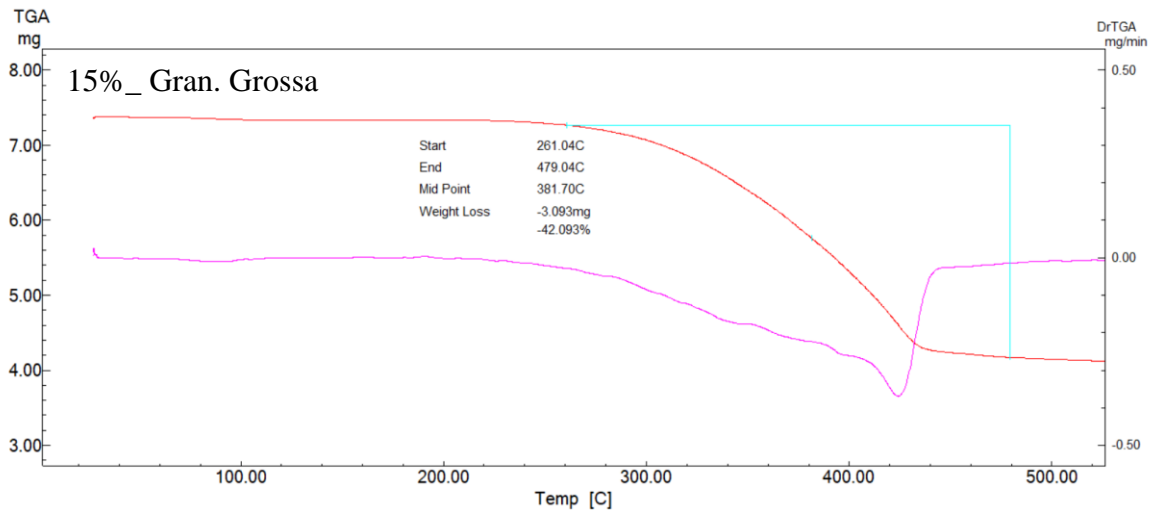


Figura 32 - Curva TGA/DTG para o compósito 15%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

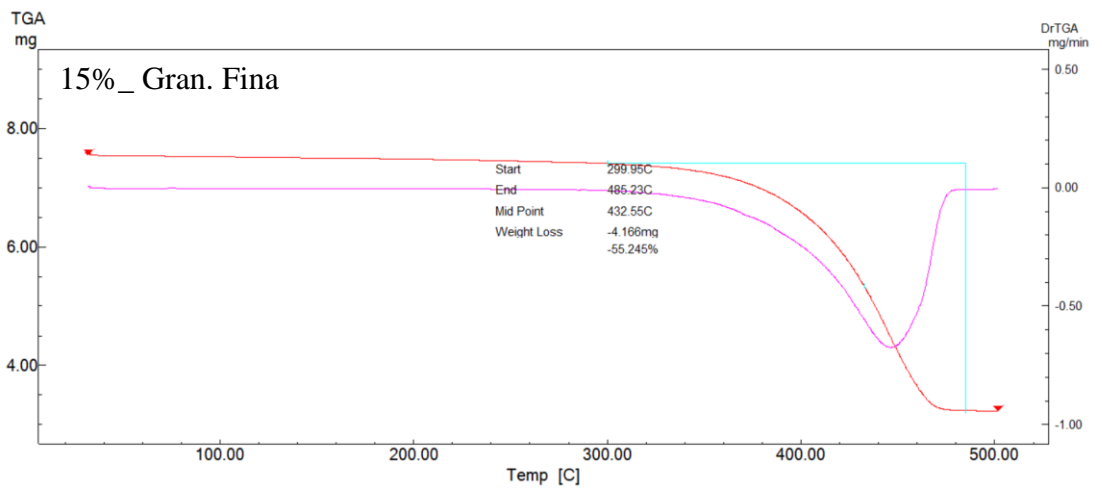


Figura 33 - Curva TGA/DTG para o compósito 15%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 34 e 35 apresentam as curvas para os blocos com 35% de polipropileno reciclado no compósito.

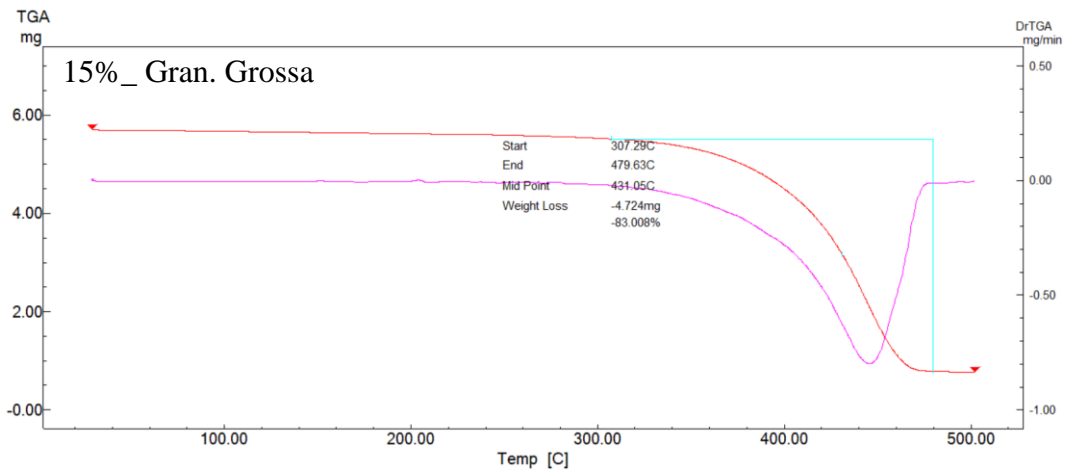


Figura 34 - Curva TGA/DTG para o compósito 35%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

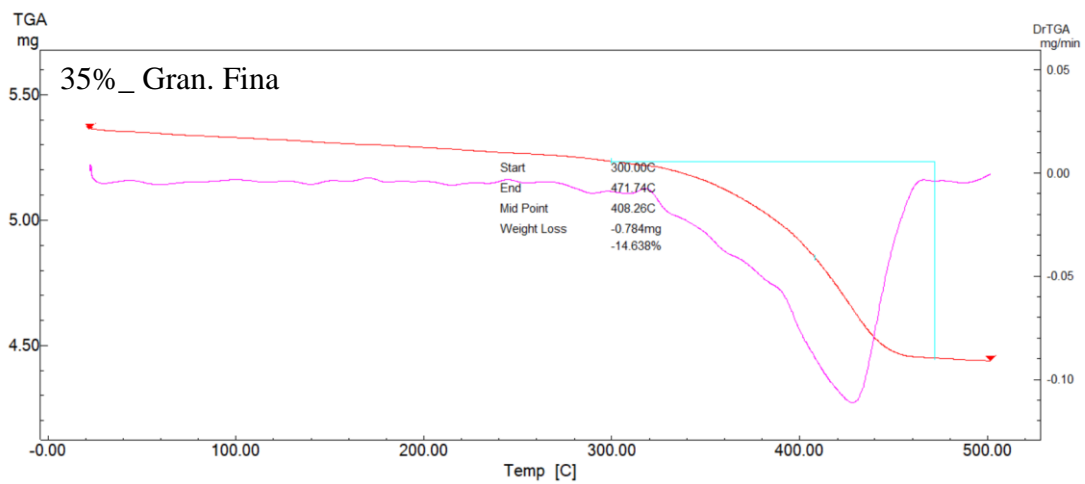


Figura 35 - Curva TGA/DTG para o compósito 35%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 traz as curvas para o compósito com 25% de polipropileno reciclado.

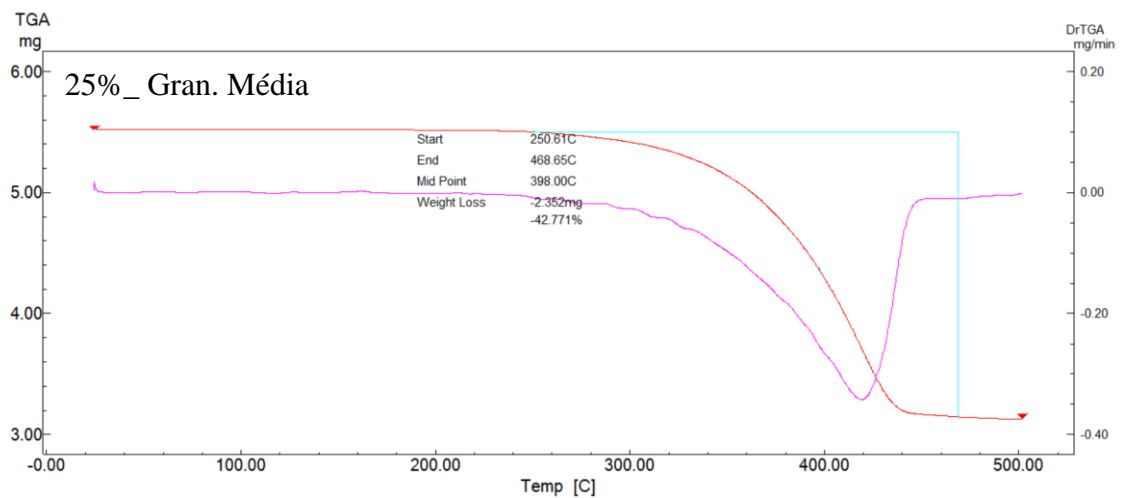


Figura 36 - Curva TGA/DTG para o compósito 25%_Gran. Média

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 25 vai resumir os dados mostrados nas Figuras 33 a 37, facilitando a comparação e discussão das faixas de temperatura, assim como as variações de massa dos compósitos.

Tabela 25 - Dados resumos TGA/DTG

	Etapa	Variação de temperatura (°C)	Temperatura de pico (°C)	Variação de massa (%)	Variação de massa (mg)
PP	1	279 - 472	422	80,80	4,803
15%_Gran. Grossa	1	261 - 480	381	42,09	3,09
15%_Gran. Fina	1	300 - 485	432	55,24	4,166
35%_Gran. Grossa	1	307 - 480	431	83,00	4,724
35%_Gran. Fina	1	300 - 471	408	14,64	0,784
25%_Gran. Média	1	250 - 470	398	42,77	2,352

Fonte: Autoria própria.

Para a execução deste ensaio, a massa extraída de cada amostra variou de 5 a 8 mg apenas. Isso significa dizer que a amostra para a representação do ensaio era mínima comparada ao bloco completo. Dessa forma, a distribuição do polipropileno no bloco é não homogênea, como será visto nas análises posteriores de microscopia. Portanto, pode acontecer da pequena porção que foi retirada do material se apresentar com um percentual de partículas inorgânicas maior que outra amostra em outra localização do bloco. Conseqüentemente, se um material em que a maioria é formada por material inorgânico é ensaiado, justifica não haver uma variação de massa considerável, já que o que aparece no ensaio é apenas o polipropileno, porque o pó de pedra e o cascalhinho não degradam nessa faixa de temperatura, por isso variando tão pouco. Assim, a amostragem justifica a variação de massa em função do tamanho da amostra utilizada na análise, tendo em vista que em alguns momentos essa amostra pode conter um percentual maior de material inorgânico.

A Tabela 25 indica que a faixa de temperatura em que ocorreu a degradação em cada bloco variou de cerca de 300°C a 480°C, com temperaturas de pico em torno de 400°C e uma variação de massa que alternou de 14 a 83%, como já explicado anteriormente.

O comportamento térmico dos blocos evidenciou que não houve influência depressiva do processo de conformação na resistência térmica do material, o que se converte em um resultado positivo, pois a conformação do polipropileno não provocou a antecipação da temperatura de início da degradação.

Nessa etapa dos ensaios, para a análise térmica dos blocos, o polipropileno já havia sido aquecido três vezes, já que passou pelo processo de beneficiamento na

reciclagem e por último para a moldagem dos blocos. No entanto, na moldagem a temperatura não afetou a degradação.

As Figuras 37 a 42 que se seguem trazem os ensaios de DTA para o polipropileno e para os blocos compósitos analisados.

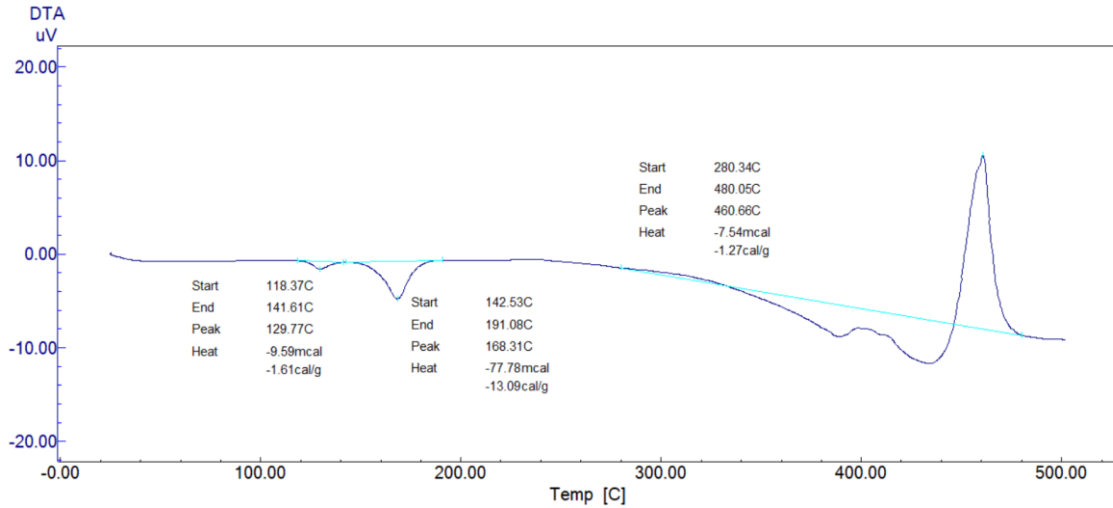


Figura 37 - Curva DTA para o polipropileno reciclado utilizado na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

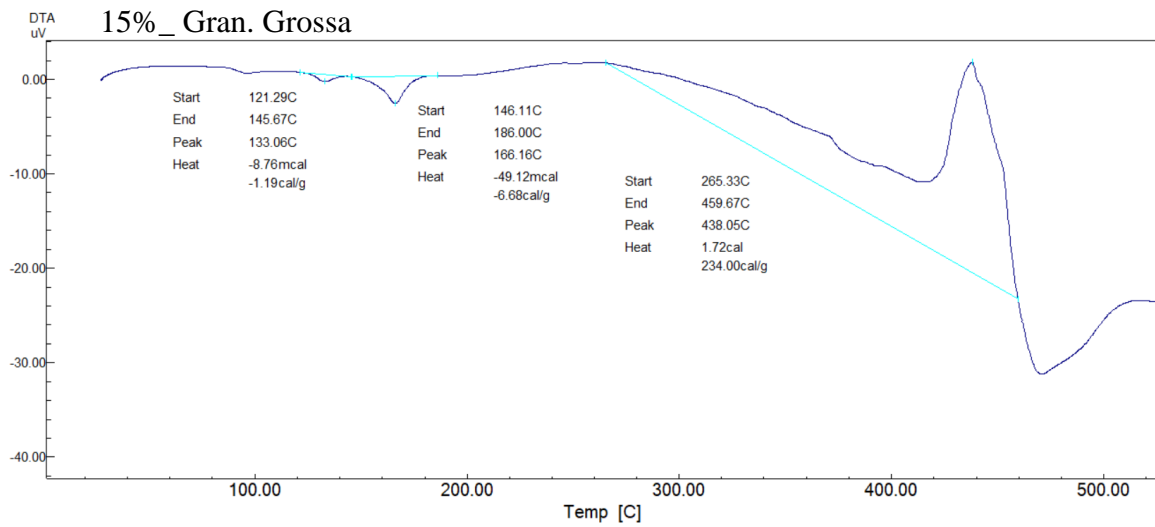


Figura 38 - Curva DTA para o compósito 15%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

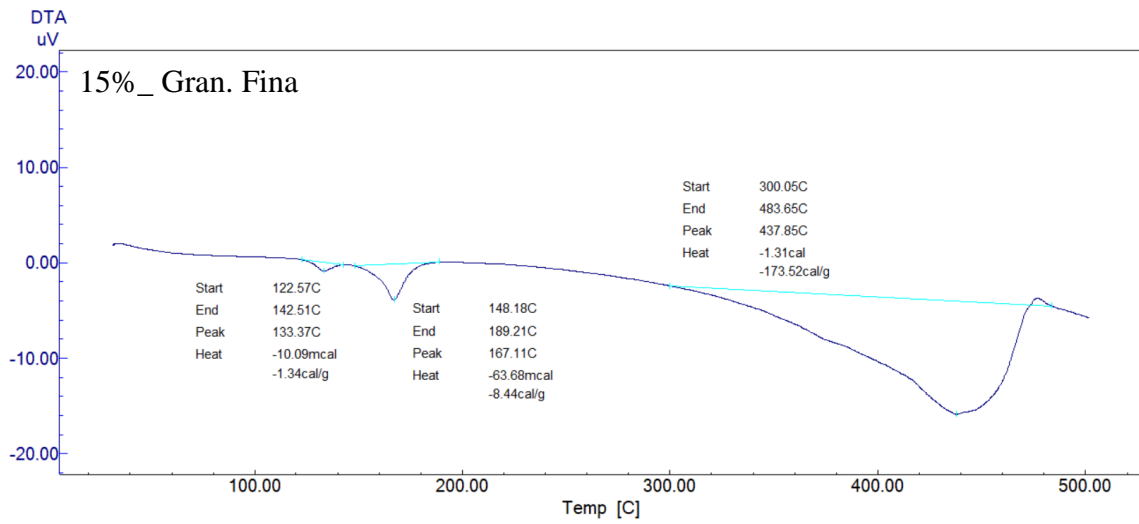


Figura 39 - Curva DTA para o compósito 15%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

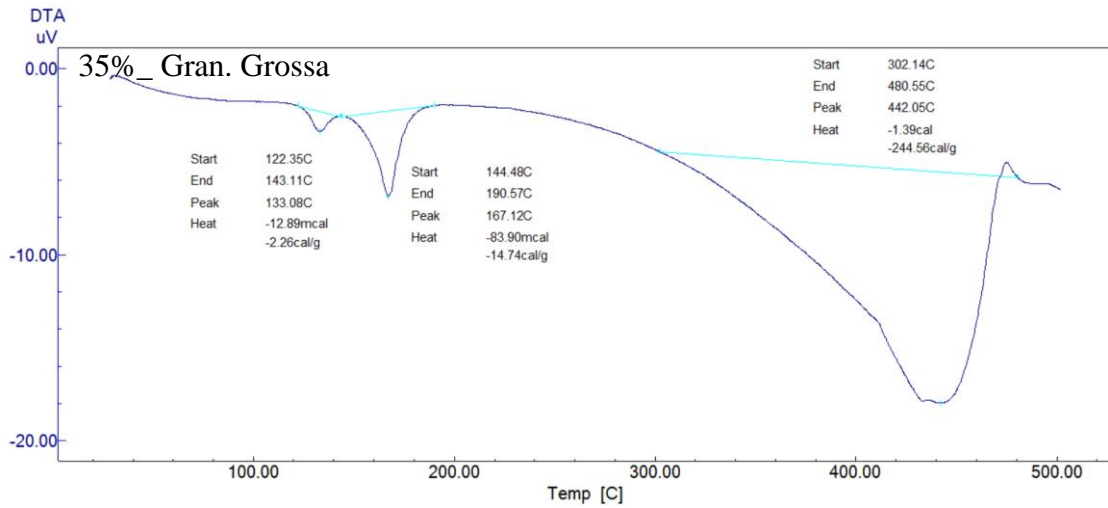


Figura 40 - Curva DTA para o compósito 35%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

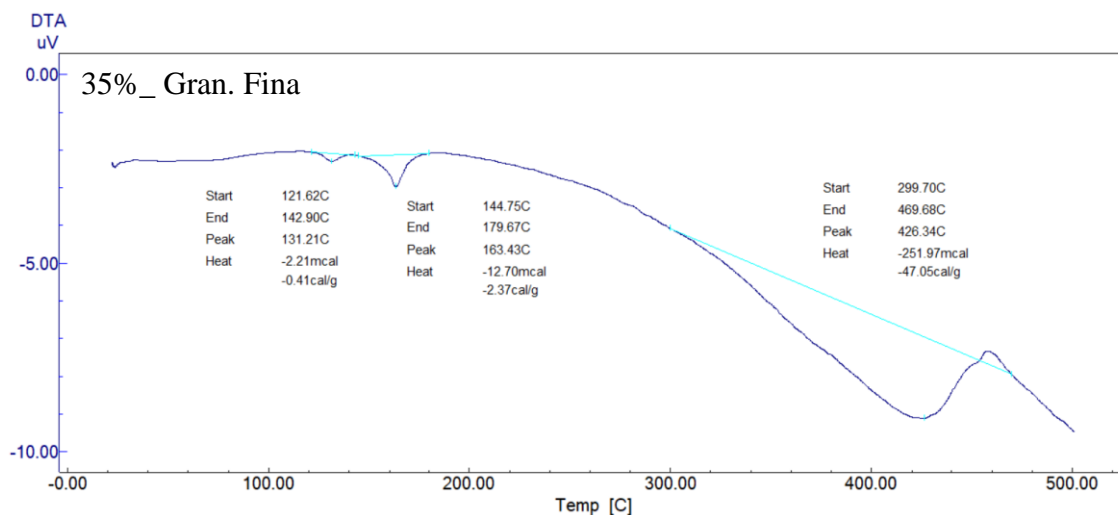


Figura 41 - Curva DTA para o compósito 35%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

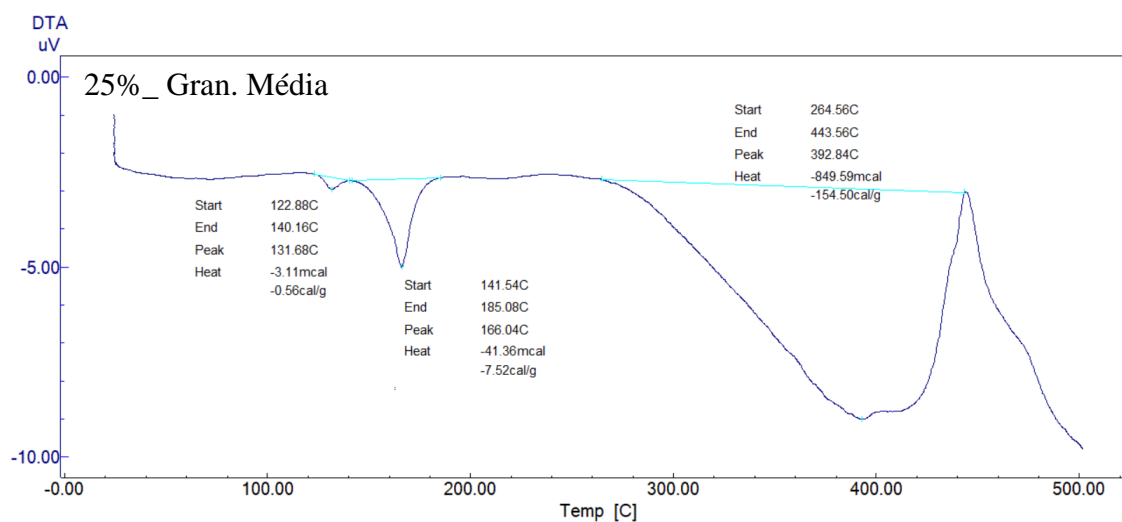


Figura 42 - Curva DTA para o compósito 25%_Gran. Média

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 26 reúne os dados das figuras anteriores para uma investigação das informações e suas interpretações de forma mais coerente.

Tabela 26 - Dados resumos DTA

	Eventos	Faixa de temp (°C)	Temperatura de pico (°C)	Entalpia - ΔH (cal/g)
PP	1	119 - 142	130	-1,61
	2	143 - 191	169	-13,09
	3	280 - 480	461	-1,27
15%_Gran. Grossa	1	122 - 146	133	-1,19
	2	147 - 186	166	-6,68
	3	265 - 460	438	234

15%_Gran. Fina	1	123 - 143	134	-1,34
	2	148 - 190	167	-8,44
	3	300 - 484	438	-173,52
35%_Gran. Grossa	1	122 - 143	133	-2,26
	2	145 - 191	167	-14,74
	3	302 - 481	442	-244,56
35%_Gran. Fina	1	122 - 143	131	-0,41
	2	145 - 180	163	-2,37
	3	300 - 470	427	-47,05
25%_Gran. Média	1	123 - 140	132	-0,56
	2	142 - 185	166	-7,52
	3	265 - 444	393	-154,50

Fonte: Autoria própria.

Nas curvas DTA, ficou claro que em todas as determinações houve três eventos. Na Figura 38, o polipropileno reciclado apresenta seus três eventos evidenciados por picos endotérmicos, em que existem duas fusões. O primeiro pico corresponde à fusão de alguma impureza misturada nesse polipropileno, já que ele é reciclado. Isso justifica a degradação inicial representada pela inclinação inicial das curvas no TGA.

A curva DTA comprova que existe impureza, o que se chama de fusão incongruente no primeiro pico. A fusão principal, que é a do segundo pico, é do polipropileno reciclado em si. A temperatura de pico gira em torno de 168°C, evidenciando que essa temperatura de fusão do polipropileno está alinhada com a literatura (Gupta *et al.*, 2012). E o terceiro evento é a decomposição que variou entre 280°C e 480°C, aproximadamente, corroborando com a mesma faixa de temperatura trazida pelo TGA.

As curvas das Figuras 39 a 43 dos blocos apresentaram resultados semelhantes ao apresentado pelo propileno reciclado, pois apresentaram similarmente três eventos, com dois picos endotérmicos referentes a dois eventos físicos de fusão, o primeiro pico de impurezas e o segundo referente à fusão do polipropileno e outro pico endotérmico químico de decomposição referente à degradação do polipropileno (Tabela 26). Exibiram taxas de entalpia semelhantes para cada etapa com temperaturas de pico equivalentes.

Outro detalhe a ser observado e que acontece em todas as curvas é o deslocamento da linha de base, indicando que provavelmente existe uma transição vítrea anterior às temperaturas ensaiadas, por isso não pode ser vista com maior clareza.

3.3.2.2 Microscopia ótica

As imagens de microscopia foram realizadas em diferentes aproximações de acordo com a necessidade de visualização e disponibilidade das lentes. A Figura 43 apresenta as 5 combinações de blocos feitos na pesquisa numa visão geral de zoom de apenas 6 vezes.

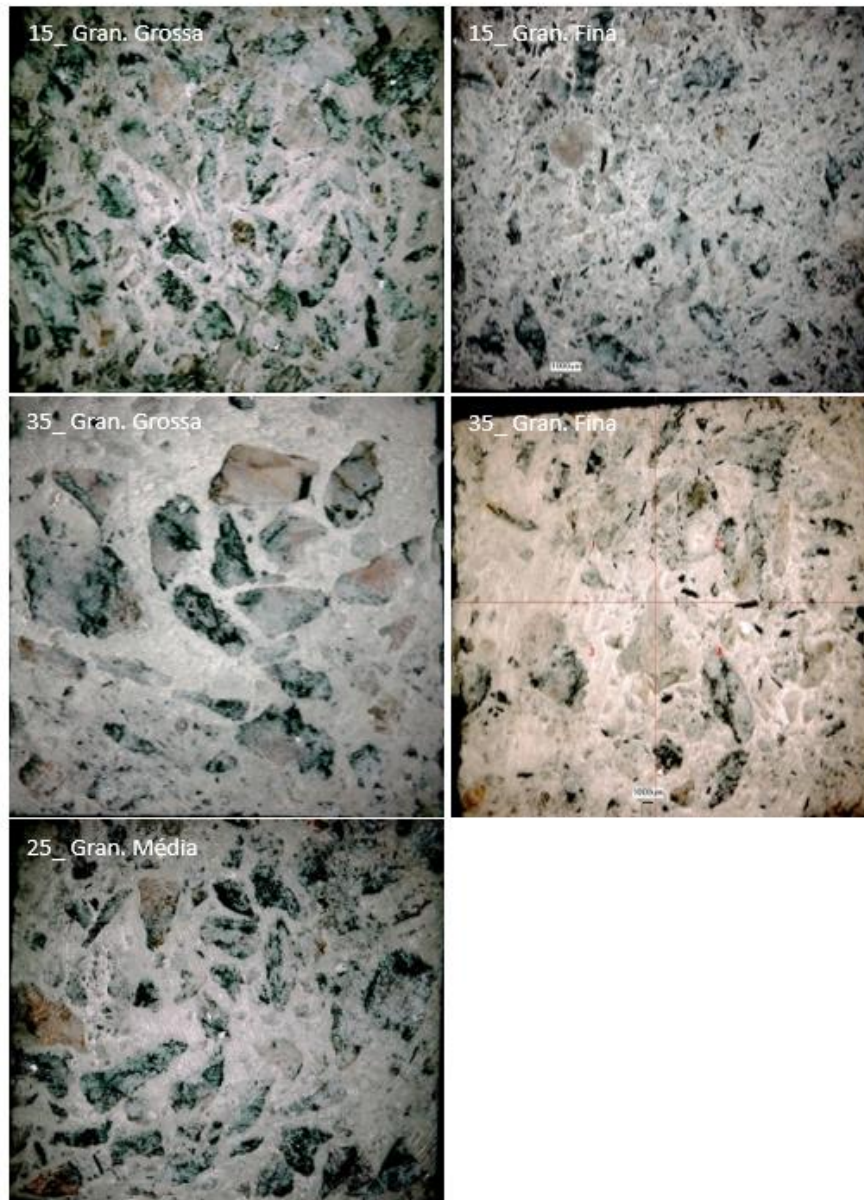


Figura 43 - Imagens microscópicas do material dos blocos com 6 vezes de aproximação

Fonte: Autoria própria.

As superfícies dos compósitos foram observadas através de microscopia ótica. A Figura 43 confirma que a estrutura do concreto polimérico e a distribuição dos grãos são

relativamente homogêneas, principalmente quando os teores de polipropileno são de 15% ou 25%. Em termos de tamanho médio, espaçamento e configuração dos grãos de cascalhinho e pó de pedra, as partes superior e inferior não apresentam muita diferença. Porém, quando se observa o interior e o limite da seção, pode-se dizer que os agregados se concentram mais no centro do compósito, em especial para o teor de 35% de polipropileno.

A Figura 44 é uma vista ampliada em 20 vezes. Os grãos de cascalhinho são fraturados e deformados em uma microestrutura densa. O espaço livre entre os grãos de cascalhinho e de pó de pedra é maior do que num compósito cimentício normal. Nos cantos angulares onde vários grãos se encontram, o polipropileno os conecta. Pode-se dizer que o polipropileno encapsula os agregados. Os detalhes do comportamento reológico do ligante e do movimento local da carga precisam ser investigados, levando a uma otimização da pressão de compactação, o que pode ser feito em estudos futuros.

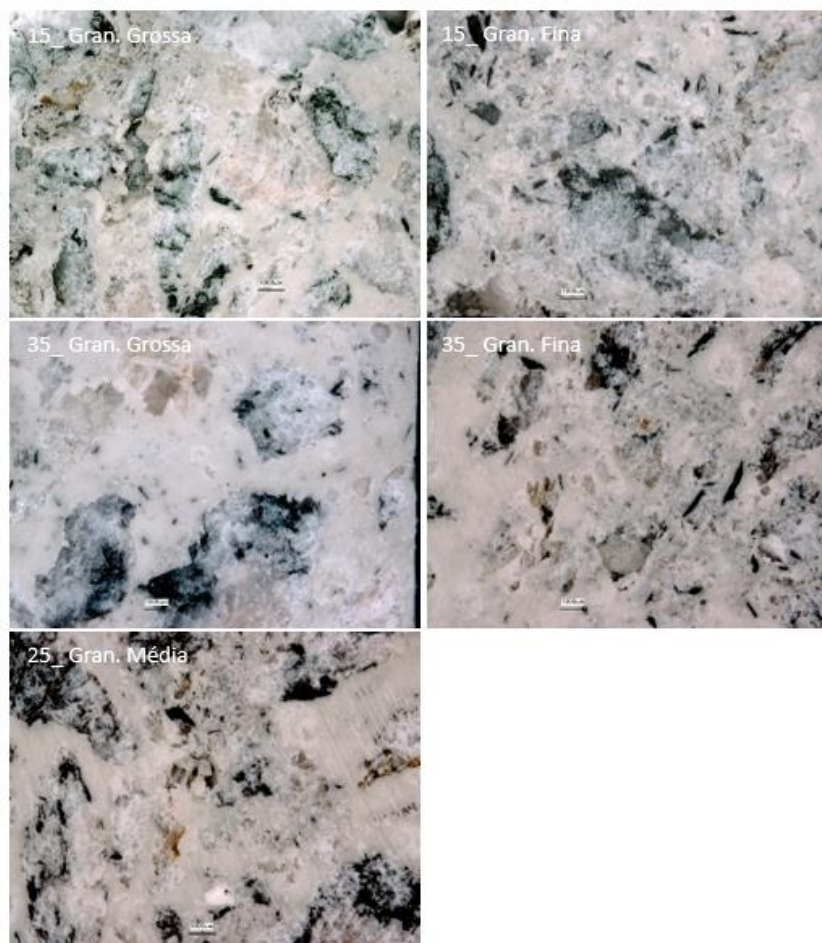


Figura 44 - Imagens microscópicas do material dos blocos com 20 vezes de aproximação

Fonte: Autoria própria.

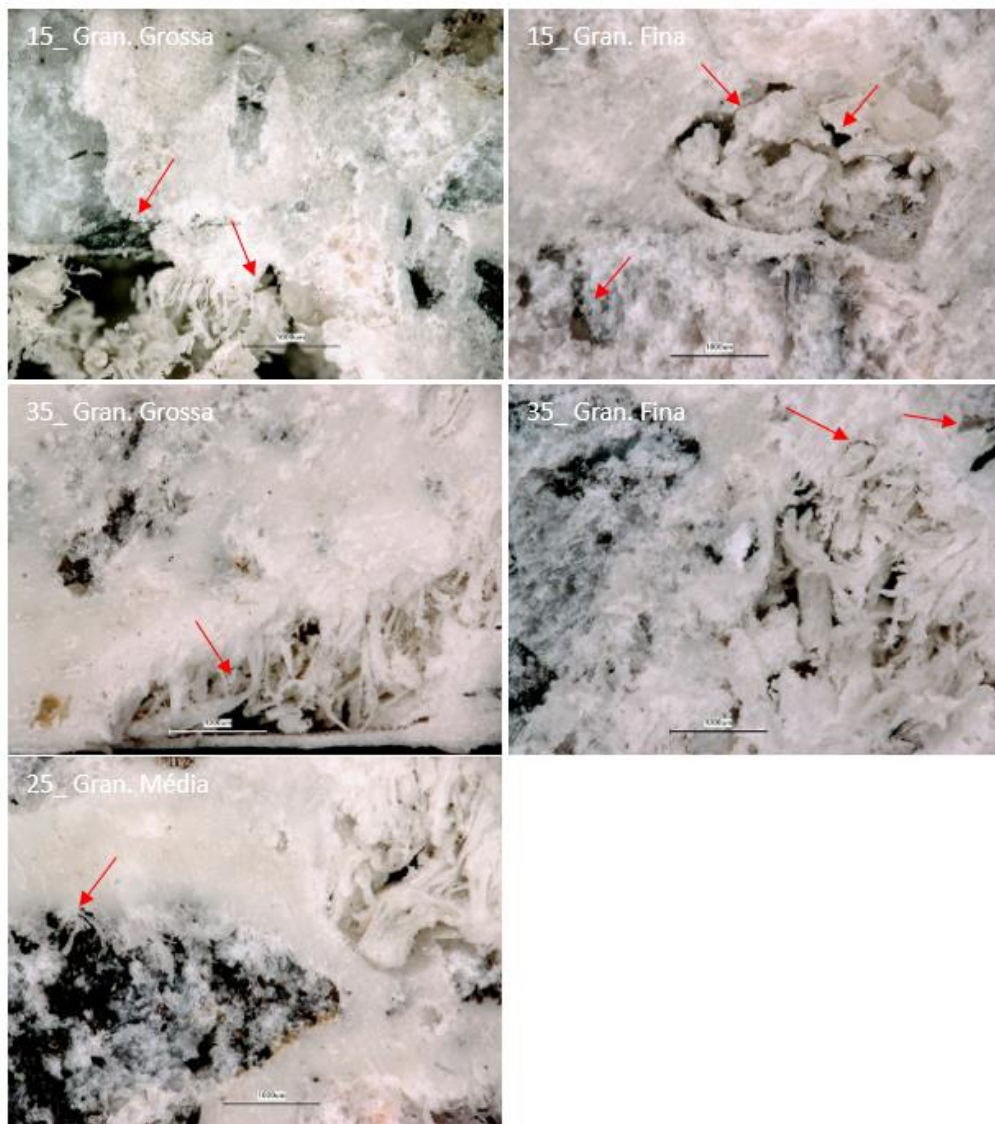


Figura 45 – Imagens microscópicas do material dos blocos com 60 vezes de aproximação

Fonte: Autoria própria.

Apesar da similaridade entre as cores dos componentes, o branco mais opaco representa o plástico fundido e o branco mais brilhoso é a pedra. Analisando em uma aproximação de 60 vezes (Figura 45), percebe-se que em alguns pontos, os vazios são expostos e que a interação entre o polipropileno e os agregados é feita através do contato superficial, porém, muitas vezes em planos diferentes. Isso significa dizer que a interação entre os componentes se dá por envolvimento e aglutinação, porém geralmente deixando espaços vazios entre eles, o que corrobora com a entrada de ar e água, como será posteriormente analisado e discutido.

Outro ponto relevante da Figura 45 é a existência de trincas associadas à interface partícula/polipropileno. Estas fissuras estão indicadas por setas e tendem a promover o descolamento interfacial.

A Figura 46, com uma aproximação de 50 vezes, confirma a ocorrência de vazios no compósito ocasionado pelo envolvimento irregular de algumas partículas da mistura.



Figura 46 – Imagem microscópica do material do bloco 15_Gran. Grossa com 50 vezes de aproximação

Fonte: Autoria própria.

A microscopia mostrou também que essas partículas são não-esféricas (Figura 47), a influência dos formatos das partículas indica que as partículas maiores e mais irregulares causarão discrepâncias nos resultados da análise de tamanhos de grãos.

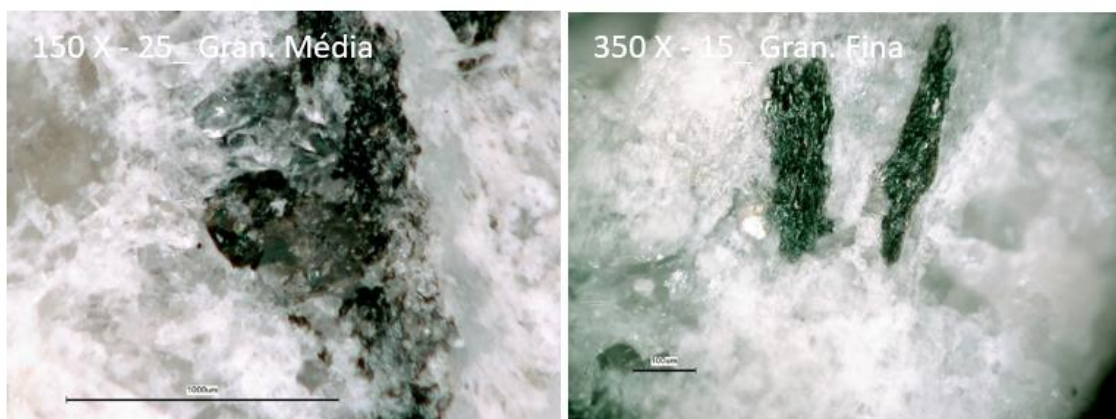


Figura 47 - Imagem microscópica do material dos blocos com 150 e 350 vezes de aproximação, respectivamente

Fonte: Autoria própria.

3.3.2.3 Análise de densidades

A Figura 48 traz os resultados das densidades (massas específicas) para os blocos elaborados na pesquisa. E a partir dela, pode-se destacar algumas indicações, em especial que os blocos com 15% de polipropileno se mostraram mais densos que os demais e que a granulometria mais fina favoreceu a maiores densidades. Os valores variaram de 1,38 a 1,88 g/cm³, corroborando com outros estudos, como o de Carvalho *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2023) que apresentaram valores de 1,48 a 2,3 g/cm³.

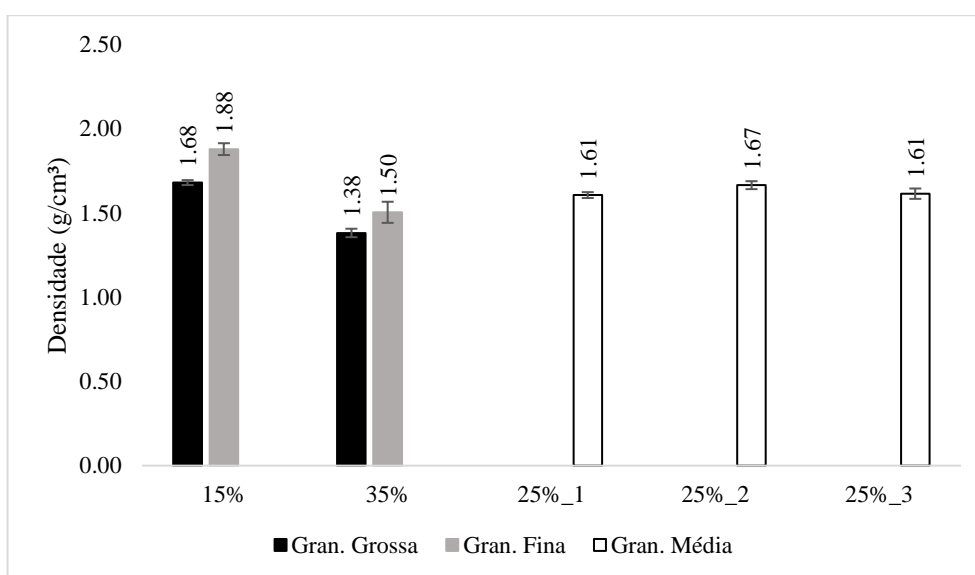


Figura 48 - Densidade dos blocos compósitos

Fonte: Autoria própria.

Os resultados na Figura 48 indicam que as propriedades físicas dos blocos compósitos de polipropileno desenvolvidos são favoráveis à aplicação na construção civil. Destarte, no presente trabalho, a densidade aparente dos blocos varia de 1,38 a 1,88 g/cm³, sendo relativamente baixos, o que significa menores custos de transporte.

Vale lembrar que os valores obtidos para a massa específica dos blocos equivalem ao concreto estrutural leve, ou seja, a opção por este método construtivo pode representar uma redução do peso próprio da estrutura.

Em comparação com o concreto convencional que varia de 2,2 a 2,6 g/cm³ e tijolos cerâmicos de 1,8 a 2 g/cm³ (Mehta e Monteiro, 2008), pode-se dizer que as densidades obtidas para esse concreto polimérico são promissoras visando a aplicação na construção.

3.3.2.4 Absorção de água

A evolução nos resultados da absorção de água é mostrada na Figura 49.

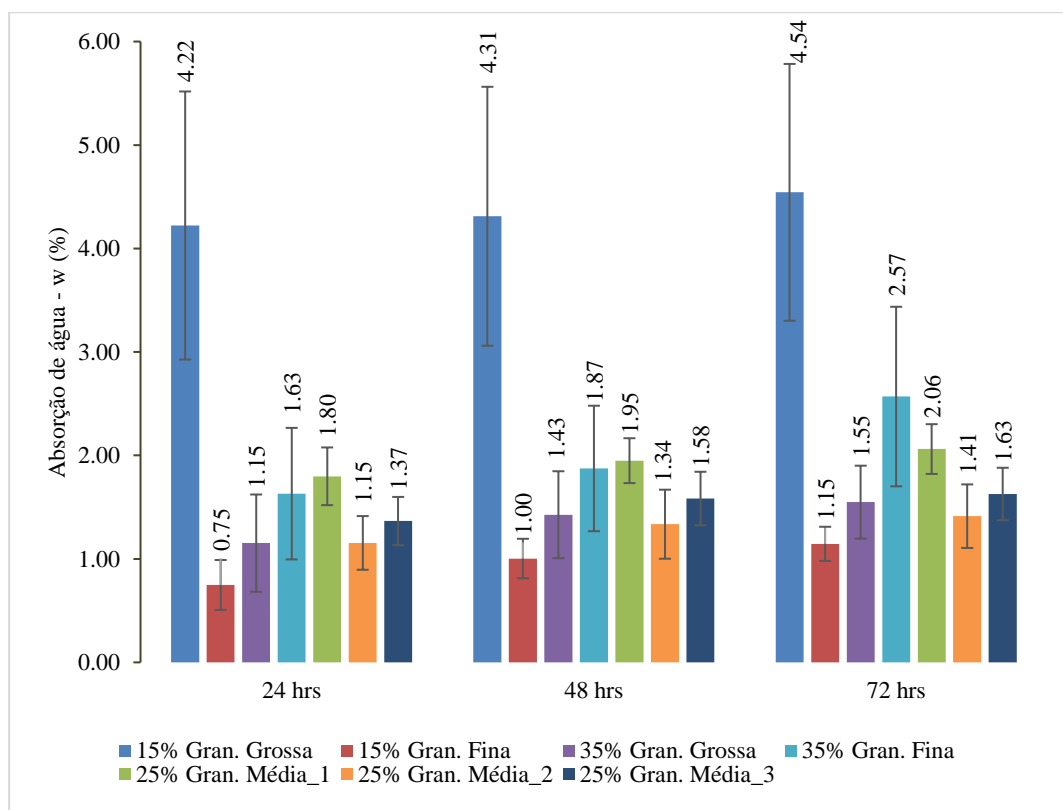


Figura 49 - Absorção de água para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

As seguintes observações podem ser feitas: primeiro, a capacidade de absorção de água para todos os blocos é, consideravelmente, menor do que o máximo permitido pelas normas americanas para blocos de argila, ou seja, 20% (ASTM C-62, 2013). Valores típicos para blocos de argila variam entre $w = 14$ e 16% (Monatshebe; Mulaba-Bafubiandi; Nyembwe, 2019; Moujoud *et al.*, 2023). Esse comparativo é feito a fim de enaltecer a técnica construtiva proposta e compará-la com outras.

No estudo de Horsakulthai (2021), a permeabilidade apresenta valores substancialmente mais elevados, chegando a até 20%, devido à substituição parcial do ligante cimento por pó de concreto reciclável, mostrando o quanto o compósito em estudo pode estar à frente de outros compósitos ecologicamente corretos.

Em segundo lugar, os blocos compostos por maioria pó de pedra absorvem mais água do que os tijolos análogos, compostos por maioria cascalhinho, quando o tijolo tem 35% de polipropileno. Uma possível explicação é que nos blocos “Gran. Fina” há uma quantidade maior de área superficial mineral intocada pelo polímero e, portanto, a água se

infiltra no bloco mais facilmente ao longo das regiões não aderentes. Porém, para os 15%, a absorção de água foi bem maior para “Gran. Grossa”.

Em terceiro lugar, *w* tende a diminuir à medida que o teor de polipropileno aumenta: a infiltração de água é reduzida, à proporção que o teor de polímero aumenta. Por último, o aumento na capacidade de absorção de água, associado ao tempo, é insignificante. Isso implica dizer que os caminhos permeáveis, contidos em cada bloco, embora pequenos, são facilmente infiltrados pela água, como em Farooq e Banthia (2022) e Bomediano, Gomes e Fontanini (2020).

O estudo estatístico feito para o ensaio de absorção de água resultou na Equação 25, que se define como sendo a equação de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança.

$$AA = 2,1296 - 0,5940 \text{ PdP} + 1,1043 (\text{PP PdP}) \quad (25)$$

Onde:

AA – Absorção de água

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

PdP – Pó de Pedra, de 33,33 a 66,66%

Na Tabela 27 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 27 - Análise de variância para avaliação da absorção de água do bloco compósito

	SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Absorção de água	Regressão PdP	4,2350	1	4,2350	5,6939	
	Regressão (PP x PdP)	14,6354	1	14,6354	19,6772	
	Resíduo	13,3879	18	0,7437	3,5545	0,5849
	Total	32,2584	20			

Fonte: Autoria própria.

Ao examinarmos os coeficientes da Equação 25, podemos inferir que apenas o coeficiente correspondente ao pó de pedra no modelo demonstrou relevância na absorção de água, bem como a interação entre eles. A análise dos dados da Tabela 27 também revela que o coeficiente de determinação (R^2), uma medida estatística que avalia o quão bem uma linha de regressão se ajusta aos dados reais, atingiu o valor de 0,5849.

A representação gráfica da resposta, obtida por meio da análise estatística dos resultados do ensaio de absorção de água em relação ao teor de polipropileno e ao teor de

pó de pedra, utilizando o software Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 50 abaixo.

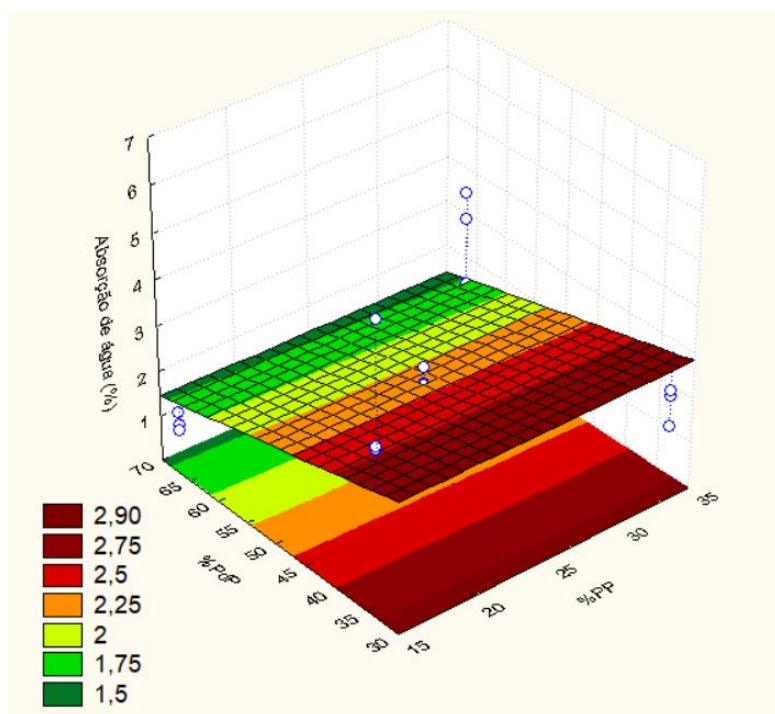


Figura 50 - Superfície de resposta para absorção de água

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a representação gráfica na Figura 50, percebe-se que a absorção de água tende a aumentar à medida que a porcentagem de pó de pedra na mistura do agregado do compósito diminui. Além disso, pode-se inferir e sugerir em trabalhos futuros, que outras variáveis sejam analisadas e investigadas na influência dos resultados de resistência à absorção de água, como o tempo de aquecimento e pré-aquecimento, dimensões dos corpos de prova e análise de pressão aplicada no compósito.

3.3.2.5 Índice de vazios

O índice de vazios é uma propriedade que está diretamente ligada à absorção de água, pois além de serem determinados no mesmo ensaio, se referem à quanto os compósitos estarão preenchidos por espaços vazios, ou seja, ar. Através de análise dos resultados na Figura 51, pode-se constatar de forma rápida que quanto mais polipropileno, menor o índice de vazios, provavelmente devido à sua capacidade de preencher os espaços entre as partículas de agregados. Para o teor de 15% de polipropileno, a menor quantidade de pó de pedra resultou em maior índice de vazios. Enquanto para 35% de polipropileno, a maior quantidade de pó de pedra foi que resultou em maior índice de vazios.

Demonstrando que o teor de determinada granulometria é significativo nesse resultado, além do teor de polipropileno, diferentemente do analisado na estatística da absorção de água.

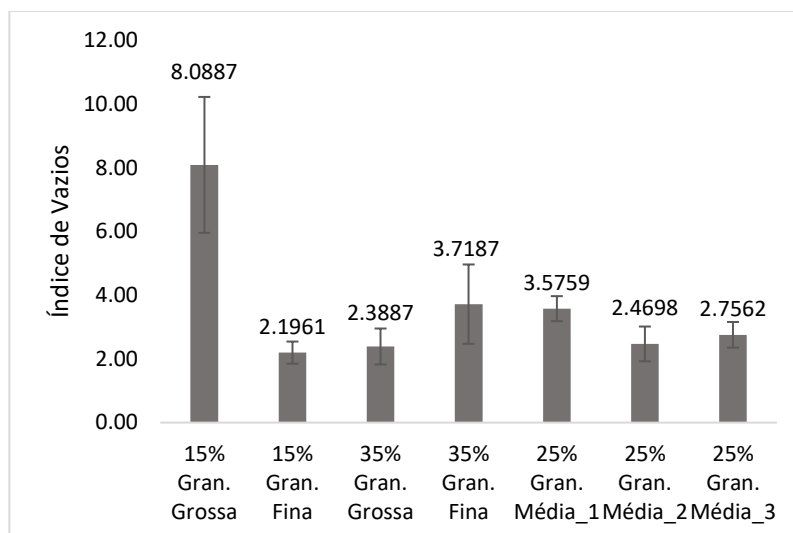


Figura 51 - Índice de vazios para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

O estudo estatístico feito para a determinação do índice de vazios resultou na Equação 26, que se define como sendo a equação de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança.

$$IV = 3,5991 - 1,0443 PP - 1,1406 PdP + 1,8056 (PP PdP) \quad (26)$$

Onde:

IV – Índice de vazios

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

PdP – Pó de Pedra, de 33,33 a 66,66%

Na Tabela 28 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 28 - Análise de variância para avaliação do índice de vazios do bloco compósito

	SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Índice de Vazios	Regressão PP	13,0879	1	13,0879	7,3179	3,1967 0,6904
	Regressão PdP	15,6136	1	15,6136	8,7301	
	Regressão (PP x PdP)	39,1249	1	39,1249	21,8762	
	Resíduo	30,4040	17	1,7884		

Total 98,2305 20

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os coeficientes da Equação 26, podemos concluir que tanto o coeficiente associado ao teor de polipropileno quanto o coeficiente relacionado ao pó de pedra no modelo são relevantes para o índice de vazios, assim como a interação entre eles. A análise dos dados da Tabela 28 também revela que o coeficiente de determinação (R^2), uma medida estatística que avalia a precisão de uma linha de regressão em relação aos dados reais, atingiu o valor de 0,6904.

A representação visual da resposta, obtida por meio da análise estatística dos resultados do ensaio de índice de vazios em relação ao teor de polipropileno e ao teor de pó de pedra, utilizando o software Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 52 abaixo.

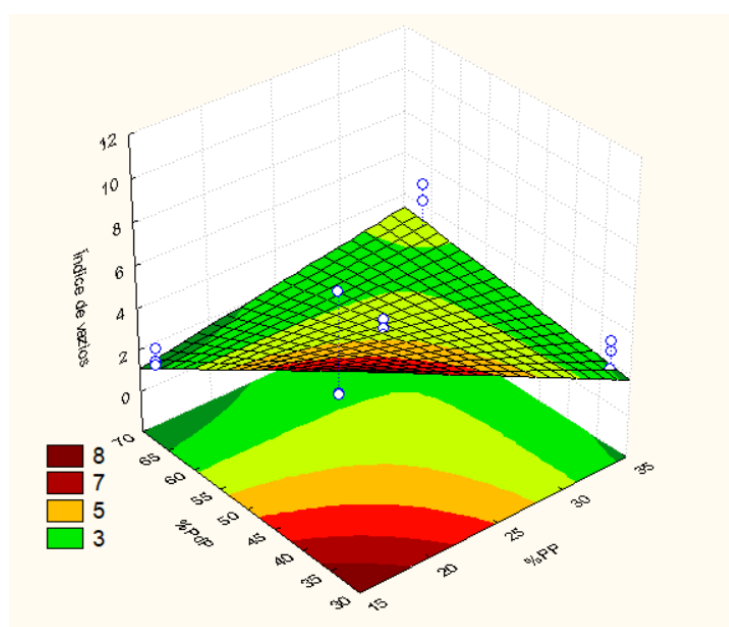


Figura 52 - Superfície de resposta para índice de vazios

Fonte: Autoria própria.

O formato da superfície de resposta na Figura 52 confirma a interferência das duas variáveis independentes na variável dependente - índice de vazios. Ao analisar, percebe-se que o índice de vazios tende a aumentar à medida que a porcentagem de pó de pedra na mistura do agregado do compósito diminui, juntamente com menores proporções de polipropileno no compósito.

3.3.2.6 Estudo de compacidade

A compacidade refere-se à densidade do compósito e está intrinsecamente ligada à porosidade do material. A presença de poros no compósito polimérico pode comprometer significativamente suas propriedades mecânicas e físicas.

A porosidade em compósitos poliméricos pode ser originada de diversos fatores, como a presença de bolhas de ar durante a fabricação, a dispersão inadequada de cargas ou mesmo a decomposição de aditivos. Portanto, compreender como a compacidade está relacionada à porosidade permite ajustar os parâmetros de processamento e formulação para minimizar a presença de poros indesejados. Isso resulta em compósitos mais densos e, conseqüentemente, com melhor desempenho em diversas aplicações.

A Figura 53 traz os resultados de porosidade dos compósitos desenvolvidos na pesquisa.

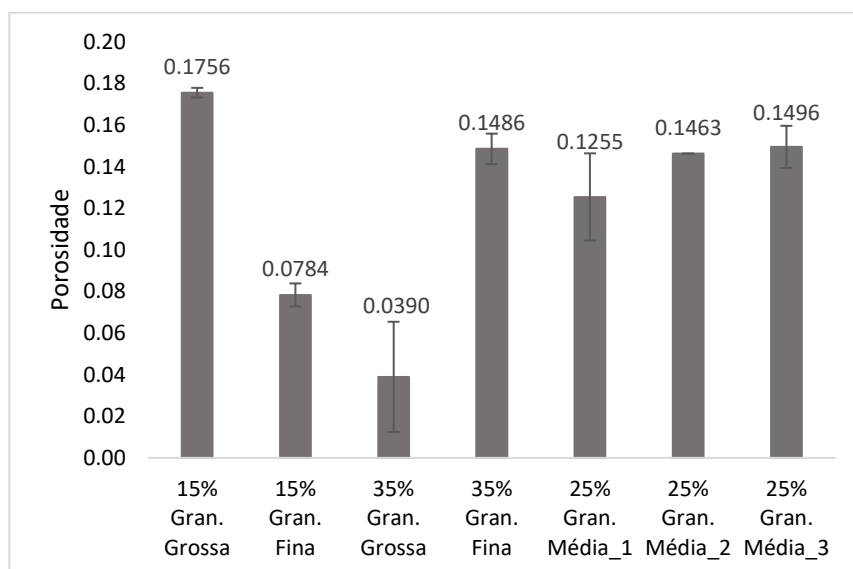


Figura 53 - Porosidade para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

Em conformidade com o índice de vazios e com os resultados da resistência à absorção de água, o gráfico de barras demonstra que para o teor de 15% de polipropileno, a maior presença do agregado pó de pedra favorece a diminuição da porosidade no compósito, enquanto para o teor de 35%, a granulometria mais grossa é que provoca a redução da porosidade.

O estudo da compacidade em compósitos poliméricos também está associado à otimização das propriedades específicas desses materiais para aplicações específicas. Por exemplo, em aplicações estruturais, onde a resistência e rigidez são críticas, alcançar uma

alta compacidade é essencial. Por outro lado, em aplicações onde a leveza é fundamental, pode ser desejável uma compacidade menor. Portanto, a compreensão da relação entre compacidade e porosidade é um aspecto chave no desenvolvimento de compósitos poliméricos com propriedades sob medida para atender às demandas de diversas aplicações industriais. Para este estudo, uma relação entre resistência, leveza e impermeabilidade é imprescindível. Por isso, quanto mais fechados forem os blocos, melhor para os resultados esperados de acordo com a aplicação esperada.

3.3.2.7 Porosidade permeável

A porosidade permeável está relacionada com a presença de espaços vazios interconectados ou não no compósito que permitem a passagem e infiltração de fluidos, nesse caso, da água. A Figura 54 apresenta os resultados para a porosidade permeável neste estudo.

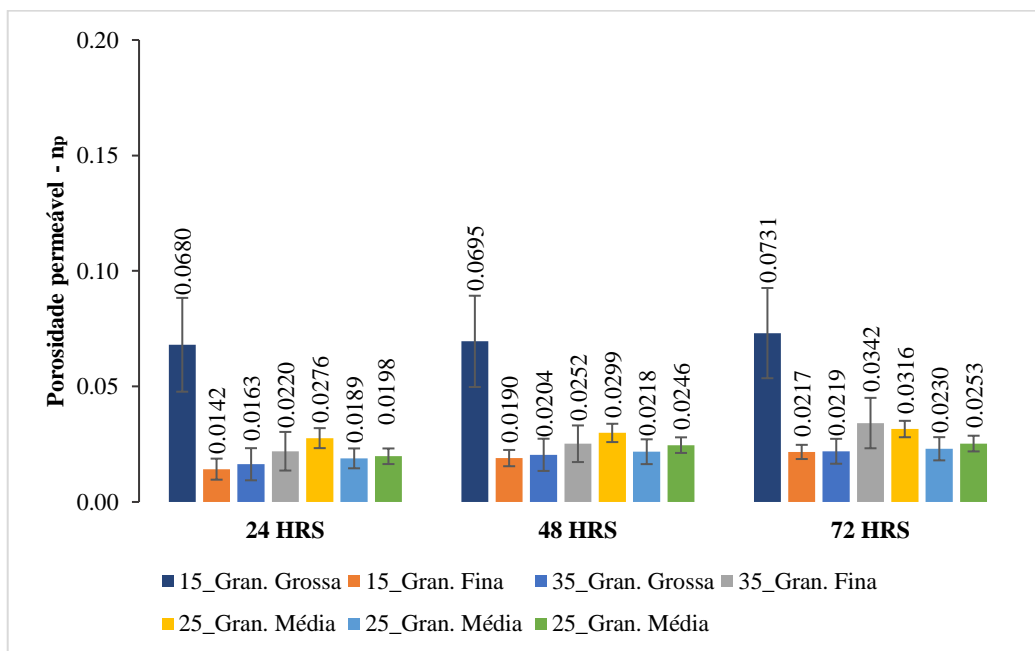


Figura 54 - Porosidade permeável para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

Na porosidade permeável, os maiores valores estão relacionados aos blocos com 15% de polipropileno. Porém, tanto para a porosidade permeável, como para a absorção de água, percebe-se que quando se trata de maiores teores de pó de pedra, os blocos de 35% de polipropileno apresentam maiores valores para a porosidade permeável e para a absorção.

Contudo, é fundamental equilibrar a porosidade permeável com as propriedades mecânicas e estruturais do compósito para garantir que ele mantenha a integridade necessária para sua aplicação.

3.3.2.8 Grau de Saturação

De posse dos valores de porosidade total e porosidade permeável, o grau de saturação é a medida da quantidade de água presente nos vazios do compósito em comparação com a capacidade máxima de retenção de água desse compósito. A Figura 55 traz os resultados referentes ao grau de saturação dos blocos compósitos.

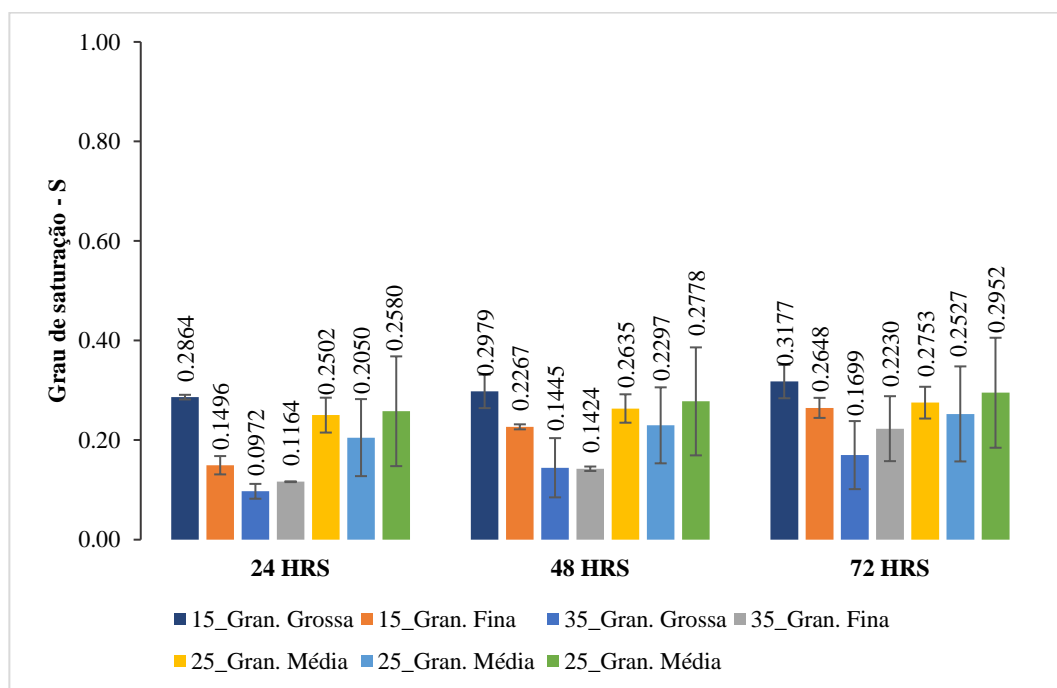


Figura 55 - Grau de saturação para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

O grau de saturação é expresso como uma porcentagem ou valor entre 0 e 1, onde 0 indica que o bloco está completamente seco e 1 indica que o compósito está completamente saturado, em que todos os vazios estão preenchidos com água. Assim, analisando os resultados da Figura 56, pode-se dizer que quando se tem na mistura mais cascalhinho do que pó de pedra de agregados, observamos um grau de saturação maior para os blocos com 15% de plástico do que para os com 35%. O mesmo acontece quando se tem mais pó de pedra do que cascalhinho para os blocos com 35% de plástico. Ou seja, o teor de 15% permite um maior volume de água infiltrar seus vazios, o que é confirmado pelos resultados da absorção de água, em que seus maiores valores estão ligados aos corpos de prova com 15% de polipropileno.

Convém pontuar que os resultados da absorção são consideravelmente baixos para todos os teores, assim como a porosidade permeável e o grau de saturação. No entanto, os blocos não atingem total saturação ($S=1$), seu nível máximo foi atingido em cerca de 40%.

Para o grau de saturação, o fator determinante é a quantidade de polipropileno na mistura. Independentemente da quantidade de pó de pedra e cascalhinho o grau de saturação se comportará da mesma forma. Já para a porosidade permeável e a absorção de água, a combinação dos tamanhos das partículas de agregado juntamente com a quantidade de polipropileno são definitivos para maiores ou menores valores. Pois quando se tem mais pó de pedra, ou seja, mais finos na composição do bloco, o comportamento dos resultados da porosidade permeável e da absorção de água mudam bastante. Fazendo lembrar que existe uma quantidade maior de área superficial mineral intocada pelo polímero e, portanto, a água se infiltra no bloco “Gran. Fina” mais facilmente ao longo das regiões não aderentes.

Para os blocos com 25% de polipropileno e graduação média de agregados, percebeu-se valores medianos e adequados de grau de saturação, porosidade permeável e absorção de água.

Notou-se também que o tempo não foi uma variável significativa para esse resultado, já que a infiltração de água nos compósitos foi mínima em relação às primeiras 24 horas de ensaio.

3.3.2.9 Resistência à tração na flexão

Os valores da resistência à tração na flexão (f_L) para os blocos manufaturados são mostrados na Figura 56, em que cada barra de dados corresponde à média de 3 blocos. A inserção do polipropileno reciclado teve um papel significativo nos resultados, mostrando que quanto maior o teor de plástico no compósito, melhor seria seu comportamento à flexão. Enquanto a composição granulométrica neste ensaio não teve grande interferência, como vai ser comprovado pelo estudo estatístico.

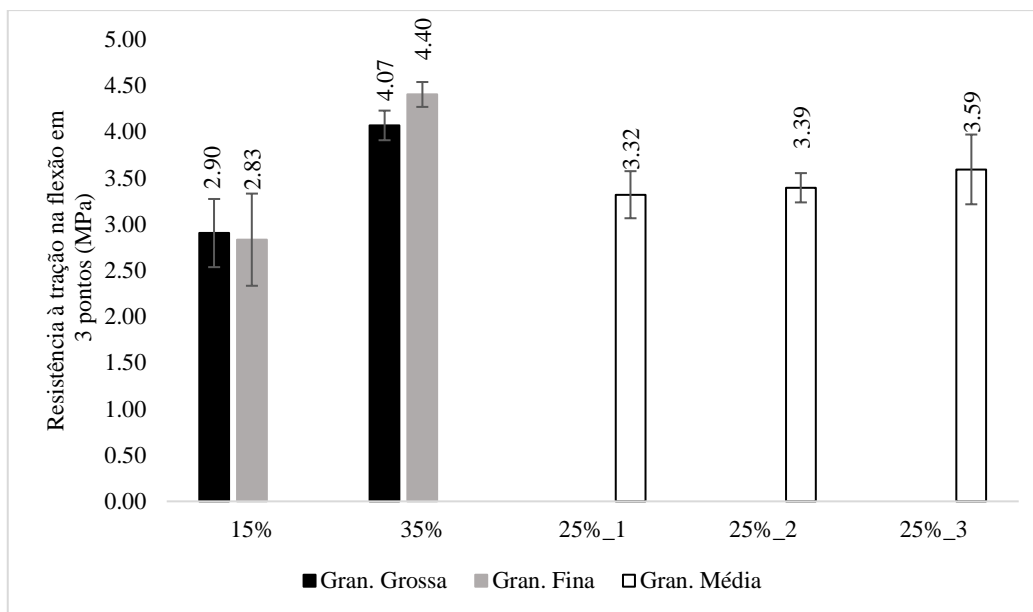


Figura 56 - Resistência à tração na flexão em 3 pontos para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

A tenacidade à flexão dos compósitos aumenta com o aumento da taxa de teor de pó de pedra no bloco. A adição de polipropileno reciclado pode, efetivamente, melhorar a resistência à tração na flexão, atingindo uma média de 4,0 MPa, valores compatíveis com o estudo de Gao *et al.* (2023), que variando o fator água/cimento, quantidade de agregados reciclados e fibras de aço na composição do compósito, mostraram que a resistência à tração na flexão variou entre 5,12 e 7,5 MPa.

Analisando resultados e variáveis que influenciam no resultado da resistência à tração na flexão, Niaki, Ahangari e Pashaian (2022) encontraram que dentre os fatores que podem influenciar nesse resultado, estão o tipo e teor de polímero utilizado e a quantidade e tamanho dos agregados utilizados. Os resultados utilizados neste estudo variaram de 0,18 MPa a 76,10 MPa, com uma média de 10,62 MPa. A partir desse resultado é possível afirmar que os valores encontrados para a resistência à tração na flexão no estudo desta tese estão dentro do esperado, segundo Niaki, Ahangari e Pashaian (2022).

Ainda segundo o estudo de Niaki, Ahangari e Pashaian (2022), eles afirmam com base em análise de vários concretos poliméricos, que a máxima resistência à tração é obtida quando a razão entre o tamanho do agregado e a menor dimensão do corpo de prova for cerca de 0,18. Dito isto, podemos afirmar que os valores obtidos para a resistência à tração neste estudo estão coerentes e próximos ao valor máximo que poderia ser obtido, considerando que a razão entre o tamanho do agregado (12,7 mm) e a menor dimensão do bloco (aproximadamente 50 mm) foi de 0,25.

É possível ainda observar que a resistência à tração na flexão no estudo de Azeko *et al.* (2023) atingiu valores semelhantes, porém mais elevados, em cerca de 7,3 MPa considerando 40% de laterita e 60% de polietileno em sua composição. Enquanto outras pesquisas como Carvalho *et al.* (2018), Oh *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2023), encontraram valores de resistência à tração na flexão da ordem de 30 MPa, aproximadamente, porém com características e composições bem variadas das aplicadas no estudo atual.

A Equação 27 de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança, para a variável resistência à tração na flexão com os coeficientes estatisticamente significativos é a seguinte:

$$RTNF = 3,4906 + 0,6634 PP \quad (27)$$

Onde:

RTNF – Resistência à tração na flexão

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

Na Tabela 29 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 29 - Análise de variância para avaliação da resistência à tração na flexão do bloco compósito

Resistência à tração na flexão		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
	Regressão PP	4,8195	1	4,8195	38,2916	4,4138	0,6802
	Resíduo	2,2655	18	0,1258			
	Total	7,0850	19				

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os coeficientes na Equação 27, é possível inferir que apenas o coeficiente associado ao teor de polipropileno no modelo demonstra importância estatística em relação à resistência à tração na flexão. Além disso, ao examinar os dados na Tabela 29, nota-se que o coeficiente de determinação (R^2), que representa uma medida estatística da proximidade de uma linha de regressão aos dados reais, alcança o valor de 0,6802. Este valor sugere que o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo, uma vez que os cálculos para o teste F resultaram em um valor mais de 8 vezes superior ao valor crítico de F tabelado.

A superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de resistência à tração na flexão em função do teor de polipropileno e o teor de pó de pedra, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 57 abaixo.

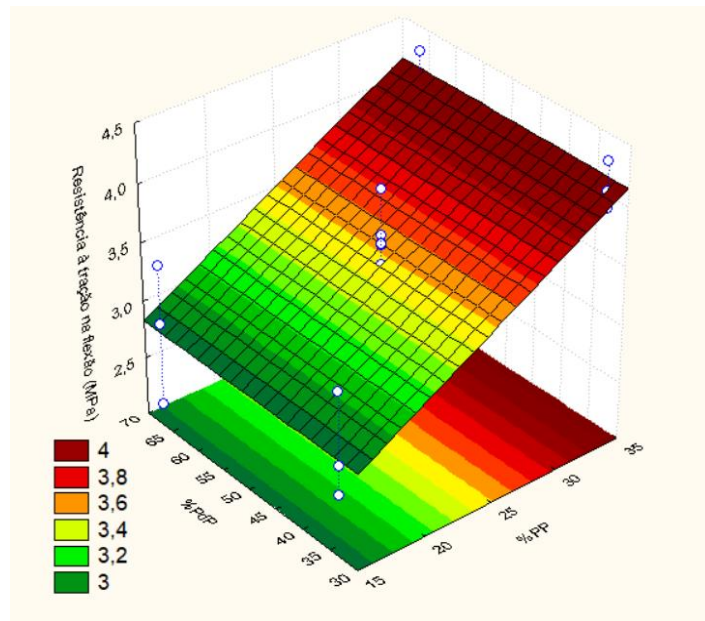


Figura 57 - Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão

Fonte: Autoria própria.

Observando-se a superfície apresentada na Figura 57, fica bem claro que a resistência à tração na flexão tende a elevar-se significativamente com o aumento da porcentagem de polipropileno no compósito.

As Figuras 58 a 62 a seguir vão mostrar as curvas tensão x deflexão utilizadas nesse estudo a fim de avaliar melhor os resultados obtidos em cada ensaio e como os blocos se comportaram diante do experimento.

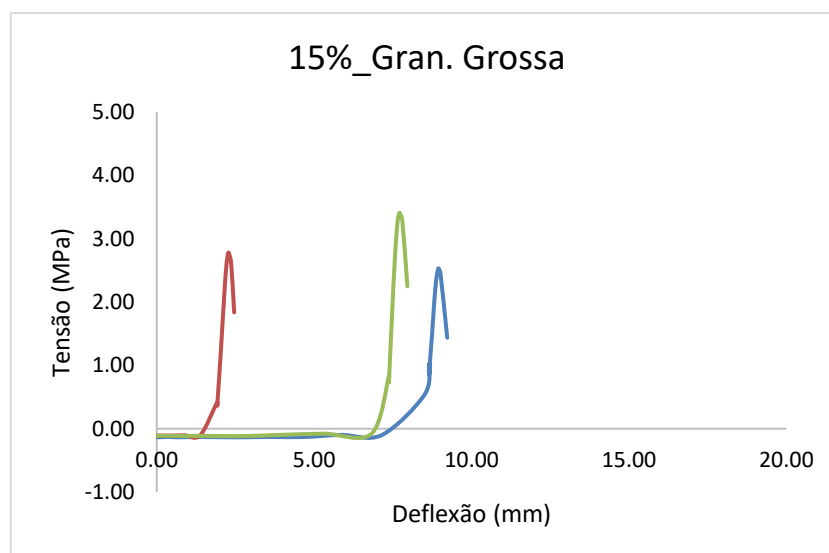


Figura 58 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 15%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

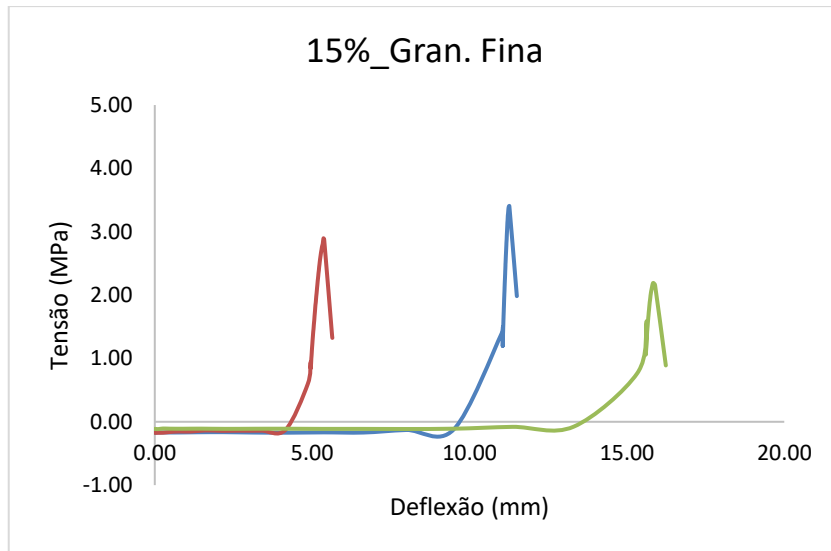


Figura 59 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 15%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

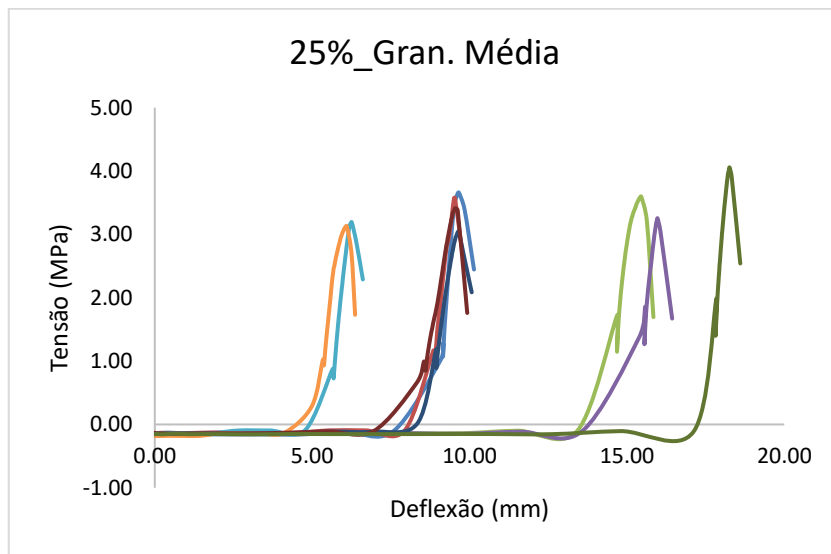


Figura 60 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 25%_Gran. Média

Fonte: Autoria própria.

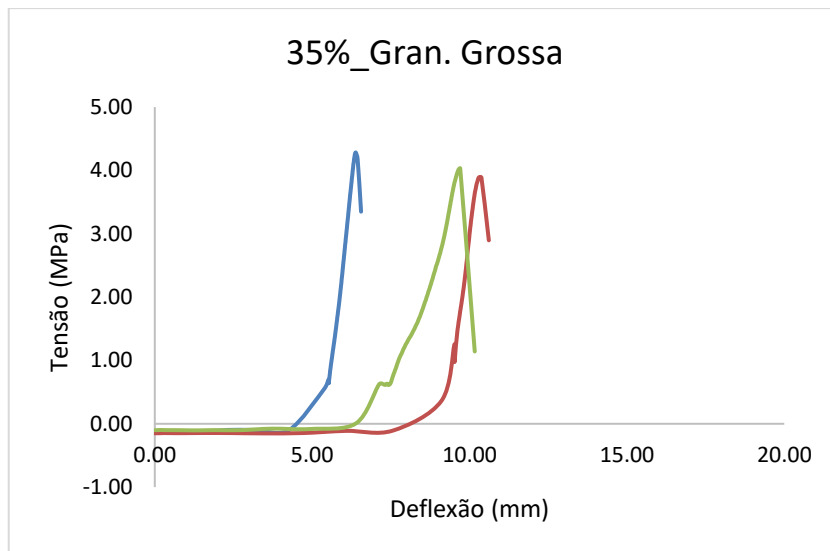


Figura 61 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 35%_Gran. Grossa

Fonte: Autoria própria.

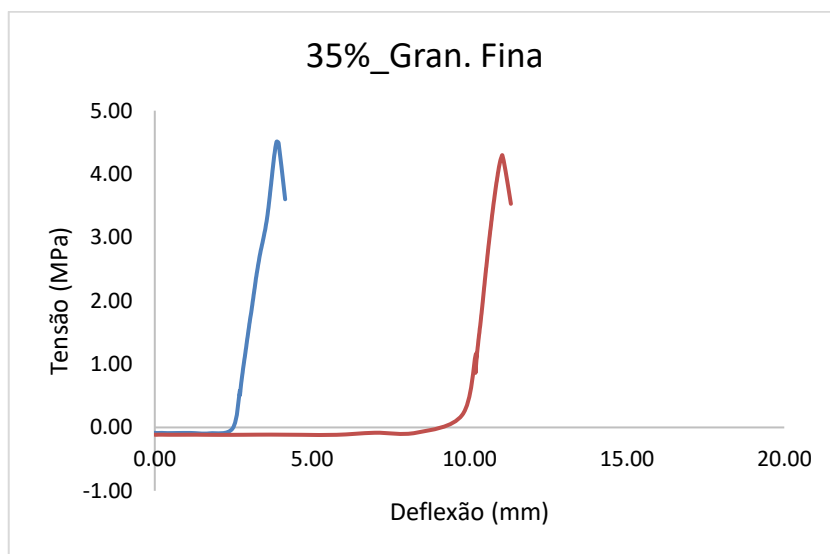


Figura 62 - Gráfico Tensão x Deflexão dos blocos 35%_Gran. Fina

Fonte: Autoria própria.

É importante lembrar que em uma análise de resistência mecânica, não apenas a tensão máxima suportada pelo corpo de prova é importante, mas também a forma como o bloco resiste e rompe, além da deformação suportada. Portanto, através das figuras anteriores, podemos perceber a diferença no modo de ruptura dos blocos de acordo com o teor de polipropileno reciclado na matriz do compósito. Além da curvatura menos acentuada em todos os casos, quanto mais plástico no compósito, menos o bloco estava suscetível à deformação, variando de 0,05 a 0,23 mm/mm quando na tensão máxima suportada para

35% de polipropileno reciclado. Enquanto para os blocos de 15% a deformação variou a até um máximo de 0,42 mm/mm aproximadamente em sua tensão máxima.

A curvatura menos acentuada dá indícios de se tratar de um material com ruptura frágil, ou seja, rompe sem muita deformação elástica anterior ao evento de ruptura.

Por fim, o mesmo não pode ser dito neste caso para a variação da quantidade de pó de pedra, já que não foi uma variável significativa para esse tipo de resistência, como mostrado no estudo estatístico.

Analisando agora a parte física dos blocos sem aproximação, pode-se compreender melhor a razão de apenas o percentual de polipropileno utilizado na mistura ser significativo nesse ensaio. As Figuras 63 a 65 vão demonstrar de forma geral a distribuição das partículas nos blocos quando seccionados.

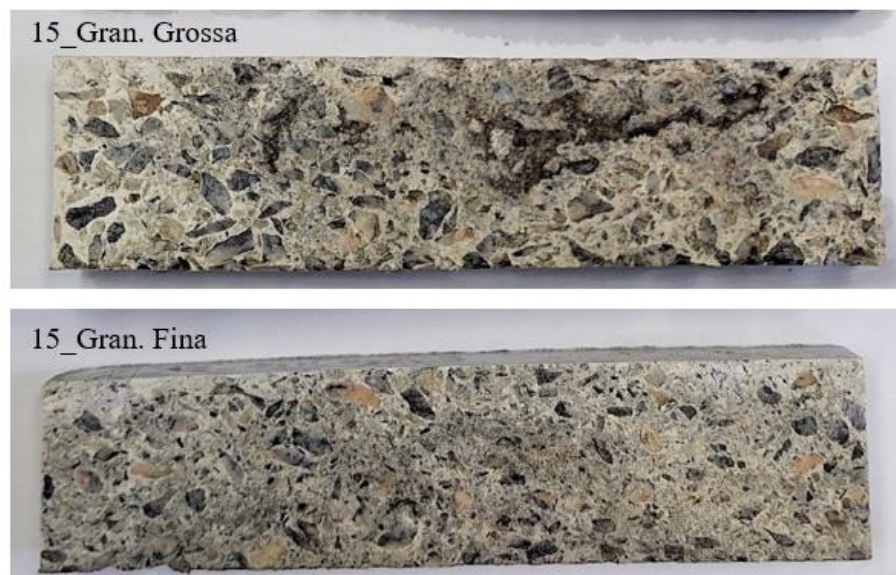


Figura 63 - Blocos compostos seccionados com 15% de polipropileno reciclado

Fonte: Autoria própria.

Em uma comparação à olho nu, pode-se perceber que para os blocos de composição de 15% de polipropileno, quando se adicionou mais pó de pedra, os compostos se apresentaram aparentemente mais homogêneos com menos quebras superficiais e menos vazios comunicantes, como pode ser observado na Figura 65. Uma provável segregação também pode ser percebida mais evidentemente no bloco com menos pó de pedra, já que o pó de pedra por ser o componente mais fino da mistura, vai se acomodar entre as partículas promovendo uma melhor aderência do plástico fundido à matriz, como também preenchendo os espaços porosos.

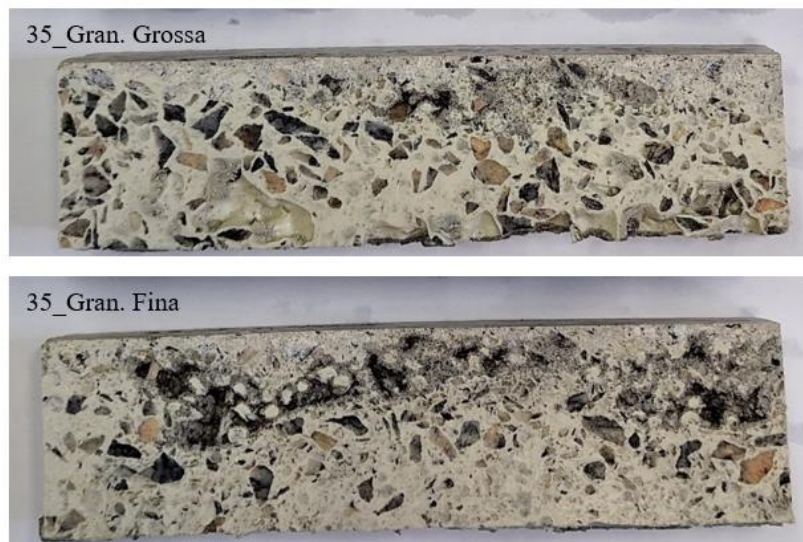


Figura 64 - Blocos compósitos seccionados com 35% de polipropileno reciclado

Fonte: Autoria própria.

Quando se adiciona um teor de 35% de polipropileno no compósito, percebe-se que a segregação é mais frequente, fazendo com que o polipropileno se deposite em maior quantidade na parte de baixo do bloco no momento da moldagem, assim como os finos se concentrem na parte superior, deixando as partículas maiores entre o meio e a parte inferior do bloco, demonstrando uma desunião entre as partículas e falta de homogeneidade na matriz como um todo (Figura 65).



Figura 65 - Bloco compósito seccionado com 25% de polipropileno reciclado

Fonte: Autoria própria.

Já o bloco de 25% de polipropileno apresentou comportamento semelhante ao de 35%, porém com uma aparente melhor distribuição das partículas grossas e do plástico, que atua envolvendo as partículas (Figura 66).

3.3.2.10 Resistência à compressão simples

Os resultados da resistência à compressão simples para os compósitos poliméricos são apresentados na Figura 66. Com base no tipo de bloco produzido, I) Para compósito com mais polipropileno reciclado (35%), o valor ficou entre 9 e 18 MPa, enquanto II) para compósito com menos polipropileno, os valores estão entre 9 e 12 MPa. Assim, a resistência à compressão do compósito polimérico é afetada pela proporção de polipropileno. (III) No caso do compósito polimérico, com 15% de polímero, as resistências diminuem ao adicionar mais cascalhinho do que pó de pedra, que foi 12% menor do que o compósito com mais pó de pedra para a proporção de 15% de polímero. Tal comportamento se repete para os blocos de 35% de plástico, confirmando para os resultados de resistência à compressão, que a granulometria levou a uma interferência significativa nos resultados, o que depois será assegurado pelo estudo da estatística. IV) Já os blocos com 25% de plástico se apresentaram com valores medianos entre as variações de máximo e mínimo, porém o compósito com 35% de polipropileno reciclado ainda apresentou maiores valores para a resistência à compressão.

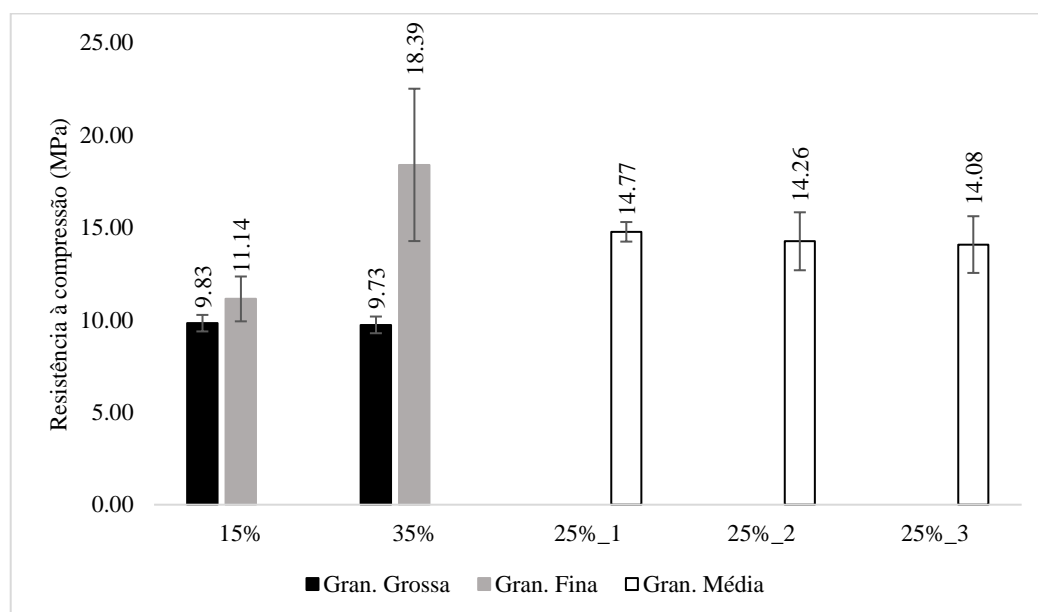


Figura 66 - Resistência à compressão para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

A Figura 66 evidencia que o encapsulamento das partículas ocorre de forma mais eficiente quando o pó de pedra se encontra em maior quantidade na mistura promovendo uma molhabilidade entre os componentes que confere resistências mecânicas superiores, já

que se trata de partículas menores, em que o envolvimento e encapsulamento das partículas inorgânicas pelo polipropileno acontece de forma mais efetiva.

Os resultados de resistência à compressão em estudos de engenharia podem ser bastante diversificados, uma vez que a metodologia de moldagem e a composição do corpo de prova, além de seu formato e dimensões vão trazer inúmeras variáveis a influenciar tais respostas. Para Piratelli-Filho & Shimabukuro (2008) e Gonçalves *et al.* (2014) que trabalham com a manipulação de resinas no compósito polimérico, resultados de resistência à compressão foram de 114,23 MPa e 79,33 MPa, respectivamente. Enquanto Romero *et al.* (2018), Lee *et al.* (2015) e Miranda *et al.* (2017) que trabalharam com plástico em forma de pó, obtiveram resultados na ordem de 0,8 a 12,9 MPa. Portanto, observa-se que os resultados podem ser bastante variados, ainda mais se a intenção é de se trabalhar com materiais residuais, no entanto, os valores aqui obtidos puderam ser equiparáveis com os estudos da literatura existentes.

A Equação 28 de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança, para a variável resistência à compressão com os coeficientes estatisticamente significativos é a seguinte:

$$RC = 13,1704 + 2,4928 \text{ PdP} \quad (28)$$

Onde:

RC – Resistência à compressão simples

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

PdP – Pó de Pedra, de 33,33 a 66,66%

Na Tabela 30 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 30 - Análise de variância para avaliação da resistência à compressão do bloco compósito

Resistência à compressão simples		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
	Regressão PdP	49,7145	1	49,7145	5,6911	4,7472	0,3217
	Resíduo	104,8253	12	8,7354			
	Total	154,5398	13				

Fonte: Autoria própria.

Observando os coeficientes da Equação 28, pode-se concluir que apenas o coeficiente quantidade de pó de pedra do modelo apresentou relevância para a resistência à compressão simples. Pode-se constatar também observando os dados da Tabela 30, que o coeficiente de determinação (R^2), que são medidas estatísticas de quanto uma linha de

regressão aproxima-se de dados reais, apresenta o valor de 0,3217. Porém, da mesma forma que para a resistência à tração na flexão, o modelo pode ser estatisticamente significativo, em razão de que o valor calculado para F foi maior que o valor do F tabelado.

A superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de resistência à compressão em função do teor de polipropileno e o teor de pó de pedra, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 67 abaixo.

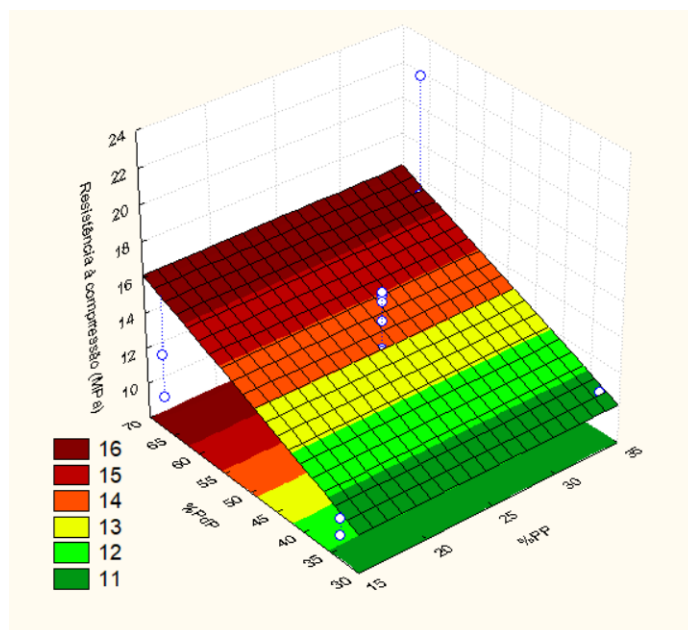


Figura 67 - Superfície de resposta para a resistência à compressão simples

Fonte: Autoria própria.

Observando-se a superfície apresentada na Figura 67, nota-se que a resistência à compressão simples tende a elevar-se com o aumento da porcentagem de pó de pedra e que quando se trata da variável % de polipropileno reciclado, não se tem diferença significativa nos resultados.

3.3.2.11 Módulo de Elasticidade

A Figura 68 expõe os resultados do módulo de elasticidade para os blocos calculados através do ensaio de resistência à tração na flexão.

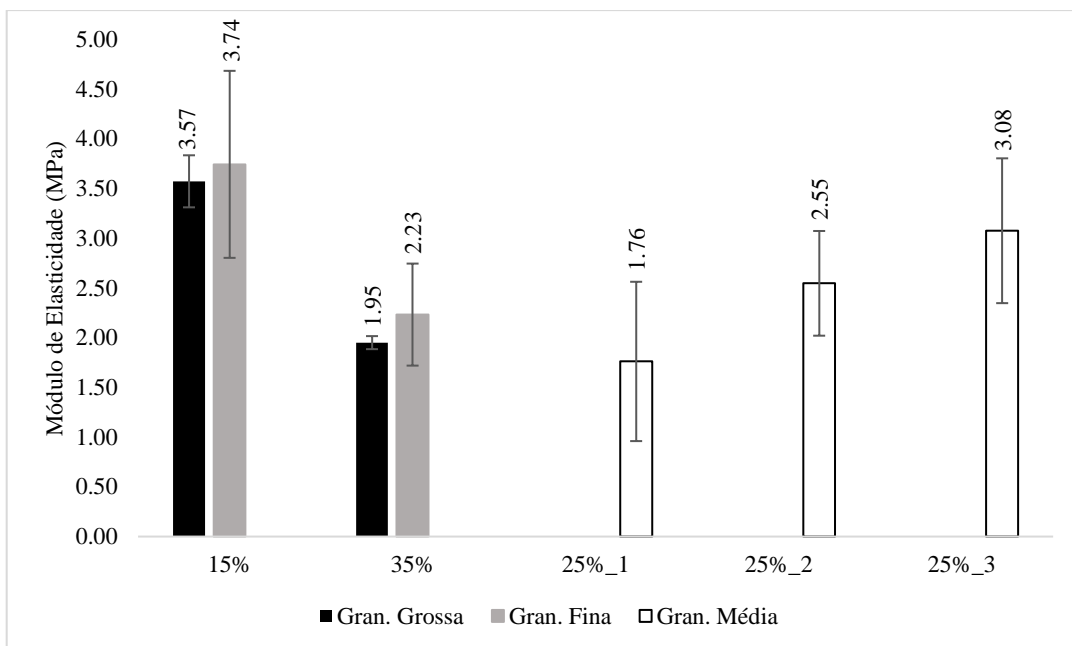


Figura 68 - Módulo de Elasticidade para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se pelos dados, uma correlação com os dados de flexão, em que quanto maior o módulo de elasticidade, maior a rigidez do compósito e, portanto, maior a sua resistência ao esforço de tração no ensaio de flexão.

A Equação 29 de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança, para a variável módulo de elasticidade com os coeficientes estatisticamente significativos é a seguinte:

$$ME = 2,69 - 0,78 PP \quad (29)$$

Onde:

ME – Módulo de Elasticidade

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

Na Tabela 31 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 31 - Análise de variância para avaliação do módulo de elasticidade do bloco compósito

		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Módulo de Elasticidade	Regressão PP	4,9103	1	4,9103	7,7431	4,7472	0,3922
	Resíduo	7,6098	12	0,6341			
	Total	12,5202	13				

Fonte: Autoria própria.

Observando os coeficientes da Equação 29, pode-se concluir que apenas o coeficiente do teor de polipropileno, apresentou relevância para o módulo de elasticidade. Pode-se constatar também observando os dados da Tabela 31, que o coeficiente de determinação (R^2), apresentou o valor de 0,3922 com o valor de F calculado maior que o valor do F tabelado, demonstrando que o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo.

A superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos resultados para a determinação do módulo de elasticidade em função do teor de polipropileno e o teor de pó de pedra, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 69 abaixo.

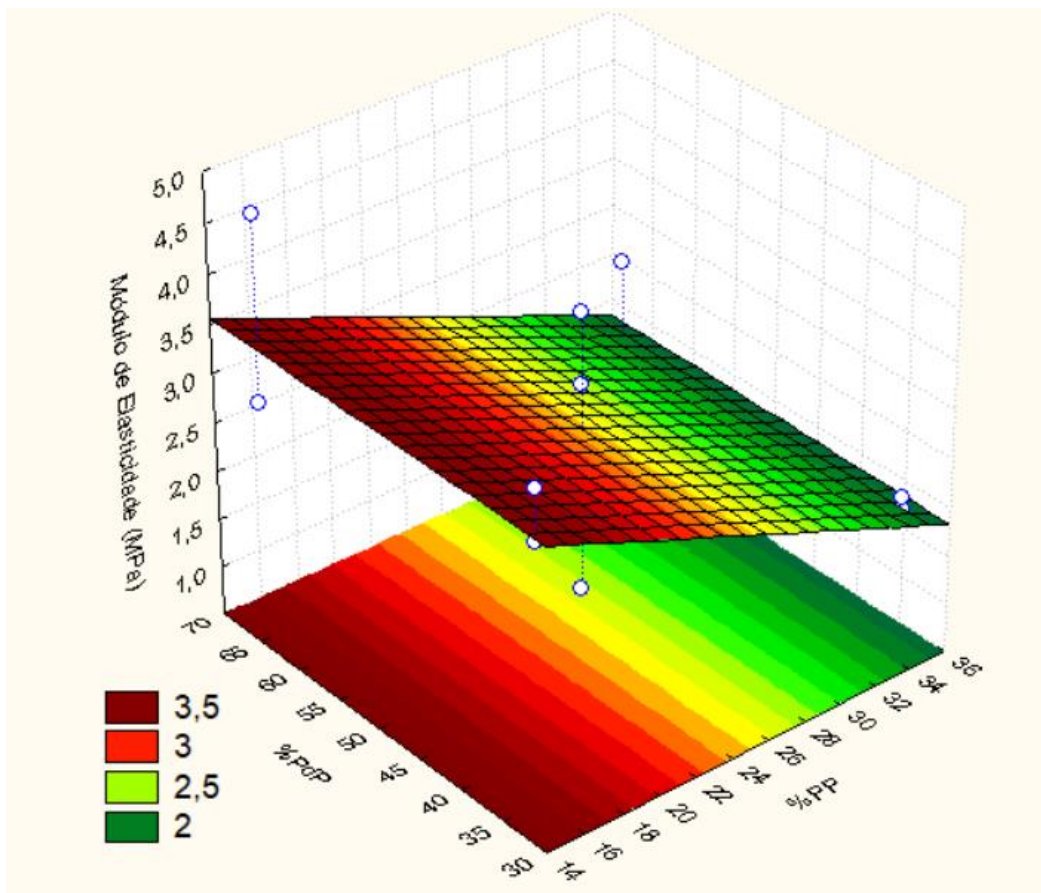


Figura 69 - Superfície de resposta para o Módulo de Elasticidade

Fonte: Autoria própria.

Observando-se a superfície apresentada na Figura 69, nota-se que o módulo de elasticidade tende a elevar-se com a redução da porcentagem de polipropileno reciclado, pois quanto menos polipropileno, mais rígido o compósito será, já que os outros componentes da mistura são graníticos (pó de pedra e cascalhinho).

3.3.2.12 Energia de fratura

A Figura 70 traz os resultados para a energia de fratura nos compósitos igualmente no ensaio de resistência à tração na flexão.

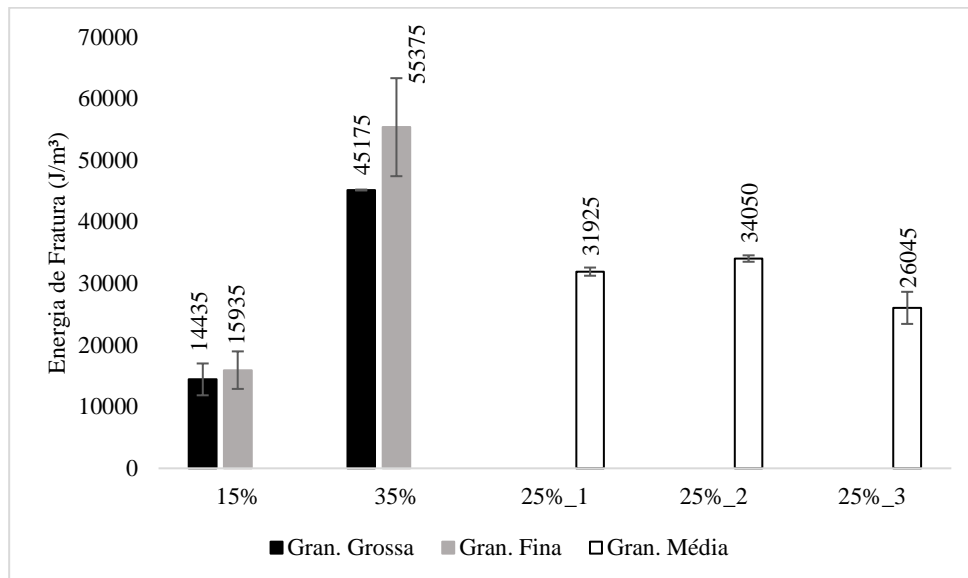


Figura 70 - Energia de Fratura para blocos compósitos poliméricos

Fonte: Autoria própria.

Pelo gráfico acima, pode-se inferir que a energia de fratura dos compósitos segue a mesma tendência do módulo de elasticidade e da resistência à tração na flexão, porém agora mais diretamente influenciado pelo teor de polipropileno, como vai ser demonstrado pela estatística a seguir.

A Equação 30 de regressão estatisticamente significativa em um nível de 95% de confiança, para a variável módulo de elasticidade com os coeficientes estatisticamente significativos é a seguinte:

$$EF = 31848,57 + 17545 PP \quad (30)$$

Onde:

EF – Energia de Fratura

PP – Polipropileno, de 15 a 35%

Na Tabela 32 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 32 - Análise de variância para avaliação da energia de fratura do bloco compósito

		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Energia de Fratura	Regressão PP	$2,4626 \times 10^9$	1	$2,4626 \times 10^9$	92,1007	4,7472	0,8847
	Resíduo	$3,2085 \times 10^8$	12	$2,6738 \times 10^7$			
	Total	$2,7834 \times 10^9$	13				

Fonte: Autoria própria.

Observando os coeficientes da Equação 30, pode-se concluir que apenas o coeficiente do teor de polipropileno do modelo apresentou relevância para a energia de fratura. Pode-se constatar também, observando os dados da Tabela 32, que o coeficiente de determinação (R^2), apresentou o valor de 0,8847 com o valor de F calculado maior pelo menos 19 vezes que o valor do F tabelado.

A superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos resultados para a determinação da energia de fratura em função do teor de polipropileno e o teor de pó de pedra, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, está apresentada na Figura 71 abaixo.

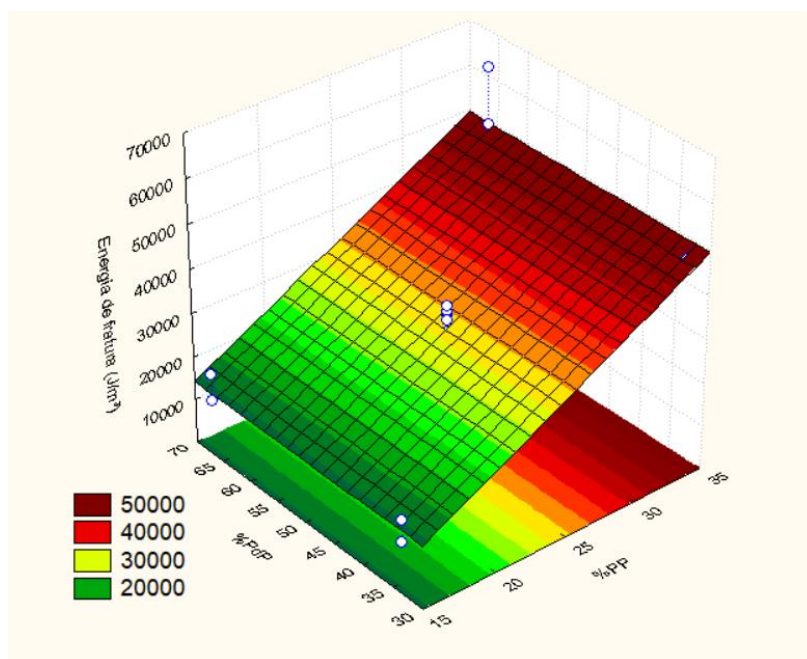


Figura 71 - Superfície de resposta para a Energia de Fratura

Fonte: Autoria própria.

Observando-se a superfície apresentada na Figura 71, nota-se que a energia de fratura tende a elevar-se com o aumento da porcentagem de polipropileno reciclado e que

quando se trata da variável % de polipropileno reciclado, não se tem diferença significativa nos resultados.

3.3.3 Pasta polimérica compatível com o concreto polimérico

No desenvolvimento da argamassa polimérica, os ensaios de índice de consistência, resistência à compressão e absorção de água foram discutidos nos itens que se seguem.

3.3.3.1 Índice de consistência

A Tabela 33, a seguir, apresenta os resultados referentes ao índice de consistência realizado nas pastas no estado fresco a 30, 35 e 40% de resina epóxi, por peso. É possível observar que existiu uma tendência, em que quanto maior o teor de resina epóxi na pasta, maior o índice de consistência e, portanto, mais fluida a mistura. Diferentemente do que aconteceu no estudo de Abdulrahman e Bzeni (2022), que, aumentando o teor de fibra polimérica, causou a redução no valor de fluidez e, assim, menores diâmetros medidos na mesa de consistência. Desse modo, é importante frisar a diferença entre a substituição polimérica como um agregado e como um ligante na mistura.

Neste estudo, a pasta polimérica de 35% de resina foi a que revelou melhor resultado, tendo em vista a faixa preconizada em norma para este ensaio, entre 230 e 260 mm (NBR 13276/2016).

Tabela 33 - Índice de consistência da pasta polimérica

	Índice de consistência - Espalhamento (mm)			Média (mm)
arg_30%	190	180	187	185,67
arg_35%	235	240	240	238,33
arg_40%	290	293	298	293,67

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados avaliados, conclui-se que a pasta polimérica, isenta de cimento e água, apresenta características favoráveis para substituir a argamassa convencional, pois os resultados de consistência demonstraram boa aplicabilidade, compatível de um produto pronto para o uso em obra.

3.3.3.2 Absorção de água

A Figura 72 apresenta os resultados obtidos para a absorção de água no compósito da pasta polimérica. Eles demonstram que a permeabilidade é dependente do teor de resina

epóxi na mistura, realçando que quanto maior o teor de resina, menor é a capacidade do compósito de absorver água. No entanto, percebe-se que a absorção de água, em todos os teores até as 72 horas de ensaio, é irrisória, não passando de 0,2%, o que é um valor bastante aceitável e compatível com estudos anteriores (Byron *et al.*, 2021).

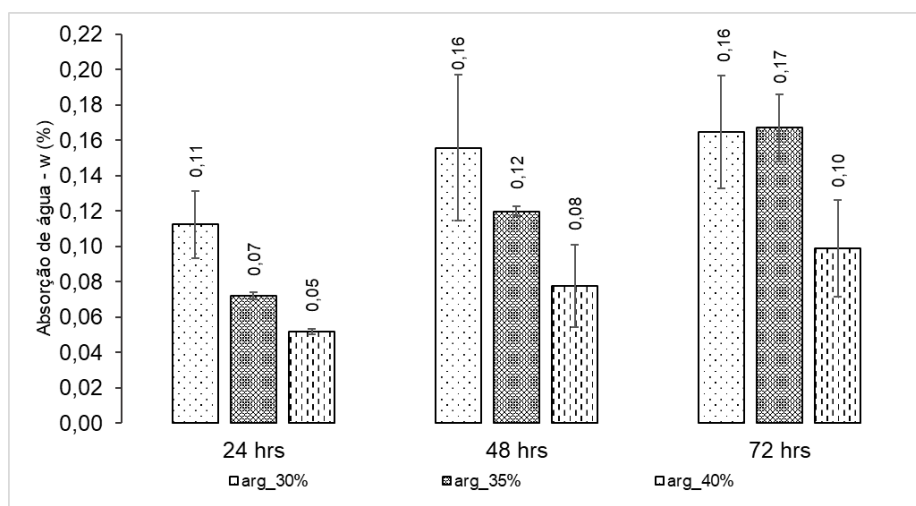


Figura 72 - Absorção de água da pasta polimérica

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Zhang *et al.* (2021), a performance da impermeabilidade na pasta polimérica é crucial, pois matrizes com resistência à permeabilidade mais fortes podem, efetivamente, prevenir problemas futuros, como água, gases e corrosão, devido à penetração de íon cloreto, por exemplo, reduzindo o risco aos danos erosivos à estrutura.

3.3.3.3 Resistência à compressão

A Figura 73 traz os resultados para a resistência à compressão axial dos compósitos da pasta polimérica estudados, mostrando que, assim como as outras propriedades, a resistência à compressão foi maior à medida que se aumentava o teor de resina epóxi, chegando a 70 MPa de resistência, valor que também foi obtido em estudos similares (Martínez-Lopés *et al.*, 2021; Byron *et al.*, 2021).

No entanto, pode-se notar que entre as pastas de 30 e 35%, houve um aumento de 52% da resistência, enquanto entre a de 35 para 40, o aumento foi de apenas 15%, evidenciando uma provável saturação. Portanto, diante dessa diferença, e pelo fato dessa resistência à compressão ser muito maior que o bloco polimérico proposto, conclui-se que o teor de 35% de resina epóxi resulta na pasta mais adequada para o uso nesse método construtivo.

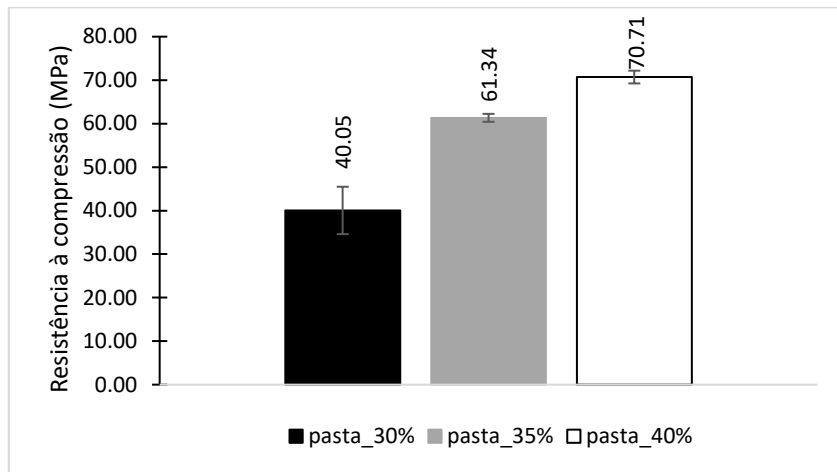


Figura 73 - Resistência à compressão da pasta polimérica

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 74 a 76 a seguir apresentam as curvas tensão x deformação dos corpos de prova cilíndricos no ensaio de resistência à compressão para a pasta com resina em sua respectiva variação proporcional do ligante.

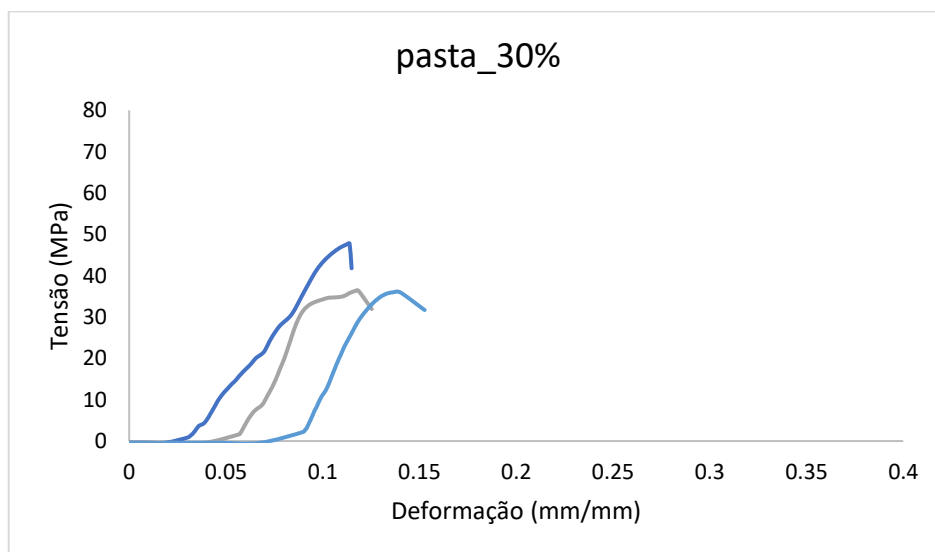


Figura 74 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 30% de resina

Fonte: Autoria própria.

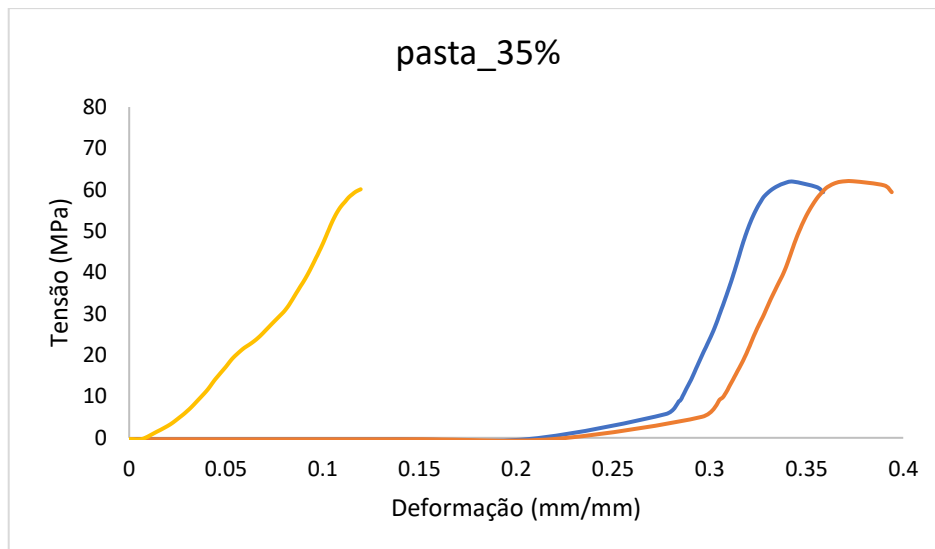


Figura 75 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 35% de resina

Fonte: Autoria própria.

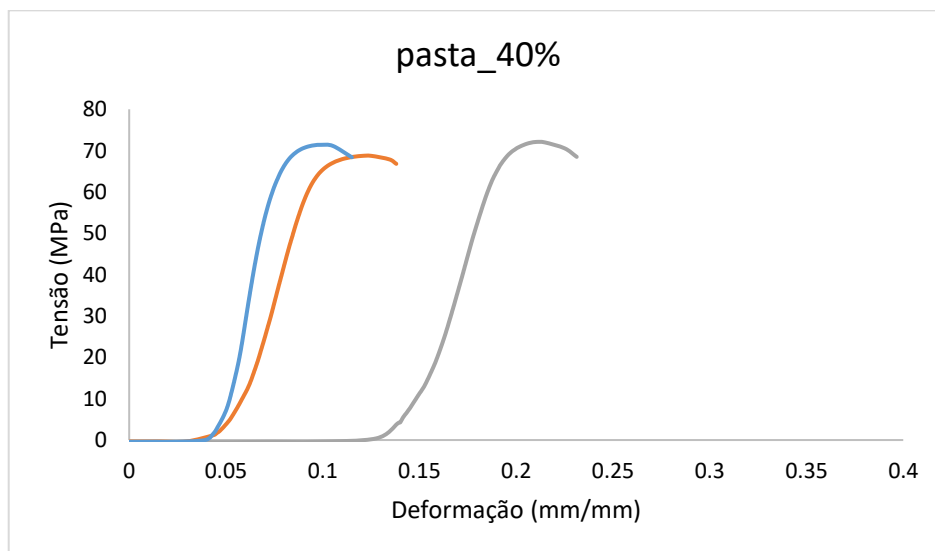


Figura 76 - Gráfico Tensão x Deformação da pasta a 40% de resina

Fonte: Autoria própria.

Observa-se através destes gráficos que à medida que a quantidade de resina é aumentada na mistura da pasta polimérica, a taxa de deformação aumenta variando de 0,11 a 0,14 mm/mm nos picos de tensão suportados pelo corpo de prova com 30% de resina para 0,12 a 0,37 mm/mm para o corpo de prova com 35% de resina. Porém, essa tendência não se seguiu para os corpos de prova com 40% de resina, pois devido à sua alta rigidez, sua taxa de deformação foi de 0,1 a 0,22 mm/mm aproximadamente. É possível perceber também a diferença nas fases elásticas e plásticas dos corpos de prova, onde a pasta com 35% de resina apresenta a maior fase elástica.

O teor de ligante é um parâmetro fundamental na produção de argamassas alternativas (Nicolini *et al.*, 2022). Os ensaios de consistência, absorção e resistência à compressão mostraram que a distribuição da porosidade e a força suportada pelo compósito variaram com a mudança no teor de resina. Assim, todas as propriedades analisadas são sensíveis às variações do teor de resina epóxi.

A formulação de 35% foi considerada a que possui a melhor dosagem de polímero para a fabricação de uma pasta polimérica, de acordo com os testes de caracterização realizados. Sendo assim, a quantidade ideal de polímero em uma formulação é aquela que proporciona excelente consistência, resistência e adesão ao substrato, determinando um bom preenchimento da matriz e revestimento de todas as partículas (Nicolini *et al.*, 2022).

3.4 Conclusões do Programa Experimental

Este trabalho apresentou e discutiu os resultados apresentados de uma nova proposta de concreto polimérico através do desenvolvimento de um compósito à base de polipropileno reciclado moldado à quente por meio de um programa experimental com ensaios de resistência física e mecânica, atingindo o objetivo de analisar experimentalmente sua resposta física e estrutural. Assim, de acordo com o programa experimental, as principais conclusões acerca das características dos compósitos ensaiados são as seguintes:

- A metodologia de moldagem e compactação dos blocos compósitos ainda tem muito a melhorar no que diz respeito à tecnologia, a fim de que ofereça condições de otimizar a distribuição de todos os componentes igualmente no compósito promovendo homogeneidade, o que vai afetar diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do compósito, além de favorecer a manufatura em larga escala dos blocos;

- O polipropileno reciclado apresentou no geral comportamento viscoso através de investigação no ensaio de fluência do polímero;

- O comportamento térmico dos blocos evidenciou que não houve influência depressiva do processo de conformação na resistência térmica do material, o que se converte em um resultado positivo, pois a conformação do polipropileno não provocou a antecipação da temperatura de início da degradação;

- A microscopia revelou espaços vazios entre os componentes e que o contato entre o polipropileno e os grãos de agregados era feita de forma superficial e em planos diferentes;

- Os blocos se mostraram com densidades promissoras comparando-se ao concreto convencional ou tijolos cerâmicos, atingindo valores entre 1,38 e 1,88 g/cm³, em que os blocos compostos por 15% de polipropileno reciclado por peso e uma granulometria mais fina favoreceram os maiores resultados;

- Para os parâmetros físicos analisados de resistência à absorção de água, índice de vazios, porosidade, porosidade permeável e grau de saturação, observou-se uma tendência de comportamento nos resultados, onde quanto mais polipropileno no bloco, menores eram as absorções de água no compósito, com conseqüente menor índice de vazios, menores porosidades e com o grau de saturação reduzido, uma vez que todos esses parâmetros são interrelacionados entre si. No entanto, analisando pelo ponto de vista da interferência dos tamanhos dos grãos, percebeu-se que para a granulometria fina com 15% de polipropileno e para a granulometria grossa com 35% de polipropileno é que se revelaram com as melhores características físicas, ou seja, demonstrando que a interação entre as duas variáveis foi mais significativa nos resultados para a análise física;

- As propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão e resistência à compressão seguiram uma tendência de comportamento, em que quanto mais polipropileno por peso na mistura do compósito, mais resistente o bloco se mostrava e a granulometria fina também interferiu de forma mais eficaz nos resultados, demonstrando atuação mais direta nos resultados;

- O módulo de elasticidade dos compósitos seguiu a mesma premissa de que uma granulometria mais fina torna os blocos mais rígidos;

- Enquanto a energia de fratura se mostrou mais fortemente influenciada pelo teor de polipropileno reciclado na mistura do compósito;

- Quanto à pasta polimérica desenvolvida para o ensaio de resistência à compressão do bloco, concluiu-se que apresenta características favoráveis para substituir a argamassa convencional, demonstrando boa aplicabilidade, compatível de um produto pronto para o uso em obra.

Diante das conclusões expostas, destaca-se que os compósitos, principalmente do tipo 35% de polipropileno reciclado com granulometria fina apresentaram comportamento satisfatório em parâmetros de resistências, como também nos padrões de compacidade e absorção de água, que justificam sua utilização em estruturas e em elementos construtivos relacionados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo realizar a caracterização experimental de uma nova proposta de concreto polimérico, enfocando o comportamento físico e mecânico dos blocos produzidos a partir desse compósito. Inicialmente, foi conduzida uma revisão sistemática identificando os principais parâmetros que afetam a resistência física à absorção de água, resistência mecânica à compressão e tração, além de análises térmicas e microscópicas, com o intuito de estabelecer suas inter-relações. Além disso, foi desenvolvido um dispositivo para a moldagem e conformação de blocos prismáticos retangulares, utilizando temperatura e pressão para a criação dos blocos concebidos. Os materiais foram submetidos à caracterização, incluindo análise granulométrica para os agregados, ensaio de fluência para o polipropileno, e análises térmicas para o polipropileno reciclado antes e após a conformação dos blocos. Posteriormente, foram realizados testes de resistência à absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, juntamente com análises microscópicas óticas para examinar os mecanismos de aglutinação e envolvimento das partículas.

No contexto da revisão sistemática, observa-se inicialmente uma aplicação consolidada dos concretos poliméricos, demonstrando respostas compatíveis às demandas identificadas. Entre os tipos de concretos poliméricos abordados nos artigos, destacam-se principalmente os compósitos nos quais resinas desempenham o papel de agente de ligação na mistura, utilizando fibras, materiais provenientes de construção e demolição reaproveitados, além de plásticos reciclados agindo como aglutinadores por meio do calor. Conclui-se de maneira significativa que as relações estabelecidas entre a resistência mecânica e o comportamento físico dos compósitos, evidenciando a interferência da absorção de água e porosidade na resistência à compressão, são conclusões importantes. A aderência entre os componentes e a densidade adequada do compósito, com uma graduação otimizada, desempenham um papel crucial nos resultados obtidos.

No que diz respeito às conclusões provenientes do programa experimental, merecem destaque os resultados promissores apresentados, pois demonstraram resistências comparáveis a outros tipos de concretos, tanto poliméricos quanto convencionais. Os dados também revelaram que uma granulometria mais fina, combinada com a presença de 35% de polipropileno reciclado por peso, resultou em um aumento significativo na resistência mecânica. Além disso, observou-se uma melhoria na compacidade do compósito, com menor densidade, tornando os blocos mais leves e com menos vazios, o que dificulta a

entrada de água, ar ou agentes corrosivos. A resistência à absorção alcançada pelos blocos atendeu aos requisitos normativos em geral.

Finalmente, menciona-se o relevante destaque das pastas poliméricas no âmbito das argamassas, uma vez que seu panorama de comportamento na absorção de água, resistência à compressão e índice de consistência se mostra compatível para aplicações juntamente com os blocos compósitos desenvolvidos. Diante disso, em complemento, destaca-se a viabilidade e aplicabilidade do bloco compósito pré-moldado à base de polipropileno reciclado moldado à quente no âmbito de aplicações gerais em estruturas para as construções, em especial, em situações que exigem resistências distintas, como blocos e telhas, por exemplo.

4.1 Sugestões de trabalhos futuros

Sabendo que um estudo nunca está completo e que causa geralmente novas dúvidas e lacunas, alguns temas foram sugeridos na forma de aprofundamento dos tópicos aqui tratados ou dando continuidade a outros. Pois uma vez que um tópico é explorado, novas oportunidades surgem para a geração de conhecimento. Nesse sentido, acredita-se que pesquisas abordando as temáticas mencionadas a seguir proporcionarão contribuições significativas para o entendimento dos concretos poliméricos e suas variantes.

- Aprimoramento da viabilidade produtiva dos blocos através do desenvolvimento de metodologia em larga escala por meio de um equipamento que envolva, além do aquecimento e da pressão, a mistura dos componentes automatizada e que permita a manufatura de vários blocos simultaneamente, além de formatos variados, viabilizando uma coordenação modular;

- Estudo detalhado de custo a longo prazo, envolvendo ciclo de vida do bloco e contabilização da poluição que deixa de ser gerada em comparação com outros métodos construtivos;

- Delineamento da interação da pasta polimérica com blocos construtivos, sejam poliméricos ou não, buscando a viabilização da utilização do produto comercialmente;

- Investigação do comportamento do bloco compósito no ambiente através de ensaios que relacionem resistência ao fogo, impacto, dureza, durabilidade, desempenho de edificações, dentre tantas outras variáveis existentes no desenvolvimento de um novo produto para a construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULRAHMAN, Payam Ismael; BZENI, Dillshad Khidhir. Bond strength evaluation of polymer modified cement mortar incorporated with polypropylene fibers. **Case Studies In Construction Materials**, v. 17, p. 1-33, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01387>.

AKIN, Muhammed Halil; POLAT, Rıza. The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress–strain properties of polyester-based polymer concretes. **Construction And Building Materials**, v. 325, p. 126741, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126741>.

ALAM, Pravez; SINGH, Davinder; KUMAR, Sanjeev. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: a sustainable and cost-efficient building material. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 1566-1572, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.346>.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252-2261, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.

ALI, Majid; LIU, Anthony; SOU, Hou; CHOUW, Nawawi. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. **Construction And Building Materials**, v. 30, p. 814-825, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>.

ALMADA, Bruna Silva; MELO, Luciane de Souza; DUTRA, Julia Baptistella; BUBANI, Larissa Cardoso; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; SANTOS, White José dos; AGUILAR, Maria Teresa Paulino. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction And Building Materials**, v. 262, p. 120036, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-62: Standard specification for building brick (solid masonry units made from clay or shale)**, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1747 M-13: Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion**, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.

ANDREW, Robbie M. Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 4, p. 1675-1710, 20 nov. 2019. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, p. 2. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, p. 9. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16590-1: Composto polimérico para assentamento de alvenaria de vedação - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-3: Alvenaria estrutural – Parte 3: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 39. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, p. 9. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8215: Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural - Preparo e ensaio à compressão**. Rio de Janeiro, p. 2. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, p. 4. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9023: Termoplásticos - Determinação do índice de fluidez.** Rio de Janeiro, p. 9. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, p. 3. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, p. 3. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, p. 8. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, p. 8. 2003.

AUSTROADS. Specification and use of geopolymer concrete. Sydney, NSW: Austroads, 2017.

AVAMI, Akram; SATTARI, Sourena. Energy Conservation Opportunities: cement industry in iran. **International Journal Of Energy**, Iran, v. 1, n. 3, p. 65-71, 2007.

AZEKO, Salifu Tahiru; MENSAH, Jacob Kofi; ARTHUR, Emmanuel Kwesi; ABIWU, Napoleon; FLOMO, Moses Kingsford; BOADU, Joseph Asiamah; YAMBA, Philip; LARSON, Enoch Asuako; AKAYETI, Anthony; SATANKAR, Raj Kumar. Eco-friendly green composites reinforced with recycled polyethylene for engineering applications. **Journal Of Material Cycles And Waste Management**, v. 25, n. 4, p. 2431-2441, 21 maio 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-023-01701-z>.

BALA, Alba; ARFELIS, Sergi; OLIVER-ORTEGA, Helena; MÉNDEZ, José Alberto. Life cycle assessment of PE and PP multi film compared with PLA and PLA reinforced with nanoclays film. **Journal Of Cleaner Production**, v. 380, p. 134891, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134891>.

BEDI, Raman; CHANDRA, Rakesh; SINGH, S P. Reviewing some properties of polymer concrete. **Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 8, p. 47-68, ago. 2014.

BENSAADA, Abdelhalim; SOUDANI, Khedoudja; HADDADI, Smail. Effects of short-term aging on the physical and rheological properties of plastic waste-modified bitumen. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, n. 3, p. 1-12, 15 abr. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-021-00471-7>.

BERNARDI, D.; DEJONG, J.T.; MONTOYA, B.M.; MARTINEZ, B.C. Bio-bricks: biologically cemented sandstone bricks. **Construction And Building Materials**, v. 55, p. 462-469, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.019>.

BLASS, Arno. Processamento de polímeros. 2. ed. Florianópolis: Editora da Ufcs, 2001.

BOMEDIANO, Karen Sorgi; GOMES, Carlos Eduardo Marmorato; FONTANINI, Patrícia Stella Pucharelli. Propriedades da argamassa modificada com polímeros redispersíveis de etileno-acetato de vinila (EVA). **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 419-429, jul. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300437>.

BULUT, H. Alperen; ŞAHIN, Remzi. A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. **Composite Structures**, v. 178, p. 50-62, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.058>.

BYRON, Diana; HEITMAN, Ana Pacheli; NEVES, Juliana; SOUZA, Patterson Patricio de; PATRICIO, Patrícia Santiago de Oliveira. Evaluation of properties of polymer concrete based on epoxy resin and functionalized carbon nanotubes. **Construction And Building Materials**, v. 309, p. 125155, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125155>.

CÁCERES, Carlos A.; CANEVAROLO, Sebastião V. Degradação do polipropileno durante a extrusão e a geração de compostos orgânicos voláteis. **Polímeros**, v. 19, n. 1, p. 79-84, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282009000100017>.

CAO, Xiaodong; DAI, Xilei; LIU, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy And Buildings**, v. 128, p. 198-213, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.

CARVALHO, Elaine Aparecida Santos; VILELA, Natália de Figueiredo; MONTEIRO, Sergio Neves; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes; Silva, Luís Carlos da. Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite. **Materials Research**, v. 21, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1104>.

CHATURVEDI, Rishabh; SINGH, Pradeep Kumar; SHARMA, Vikas Kumar. Analysis and the impact of polypropylene fiber and steel on reinforced concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 2755-2758, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.606>.

COHEN, Ehud; PELED, Alva; BAR-NES, Gabriela. Dolomite-based quarry-dust as a substitute for fly-ash geopolymers and cement pastes. **Journal Of Cleaner Production**, v. 235, p. 910-919, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.261>.

FAROOQ, Mohammed; BANTHIA, Nemkumar. Strain-hardening fiber reinforced polymer concrete with a low carbon footprint. **Construction And Building Materials**, v. 314, p. 125705, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125705>.

FOMINA, N. N.; KHOZHIN, V. G. Compatibilization of polymer mixtures during processing of waste products from thermoplastics. **Nanotechnologies In Construction A Scientific Internet-Journal**, v. 13, n. 4, p. 229-236, 31 ago. 2021. CNT Nanostroitelstvo. <http://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-229-236>.

GAO, Danying; LUO, Feifei; YAN, Yongming; TANG, Jiyu; YANG, Lin. Experimental investigation on the flexural performance and damage process of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. **Structures**, v. 51, p. 1205-1218, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.122>.

GONÇALVES, Jorge Antônio Vieira; CAMPOS, Diego Adalberto Teles; OLIVEIRA, Gislane de Jesus; ROSA, Maria de Lourdes da Silva; MACÊDO, Marcelo Andrade. Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites. **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 878-887, 4 jul. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392014005000100>.

GU, Lei; OZBAKKALOGLU, Togay. Use of recycled plastics in concrete: a critical review. **Waste Management**, v. 51, p. 19-42, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>.

GUPTA, Arun Kumar; BISWAL, Manoranjan; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Mechanical, Thermal Degradation, and Flammability Studies on Surface Modified Sisal Fiber Reinforced Recycled Polypropylene Composites. **Advances In Mechanical Engineering**, v. 4, p. 418031, jan. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/418031>.

HAFEZ, Azza I.; KHEDR, Maaly M.A.; OSMAN, Randa M.; SABRY, Rania; MOHAMMED, Mona S. A comparative investigation of the unit cost for the preparation of modified sand and clay bricks from rice husk waste. **Journal Of Building Engineering**, v. 32, p. 101765, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101765>.

HAMEED, Awham M.; HAMZA, Mohammad T. Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. **Energy Procedia**, v. 157, p. 43-50, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.162>.

HORSAKULTHAI, Veera. Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars. **Case Studies In Construction Materials**, v. 15, p. 00725, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00725>.

HOSSAIN, F.M. Zahid; SHAHJALAL, Md.; ISLAM, Kamrul; TIZNOBAIK, Mohammad; ALAM, M. Shahria. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber. **Construction And Building Materials**, v. 225, p. 983-996, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.245>.

JAFARI, Khashayar; TABATABAEIAN, Mojtaba; JOSHAGHANI, Alireza; OZBAKKALOGLU, Togay. Optimizing the mixture design of polymer concrete: an experimental investigation. **Construction And Building Materials**, v. 167, p. 185-196, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.191>.

JAFARI, Khashayar; TOUFIGH, Vahab. Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete. **Construction And Building Materials**, v. 155, p. 495-510, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.097>.

JAVADI, Armin Saeedi; BADIIEE, Hassan; SABERMAHANI, Mohsen. Mechanical properties and durability of bio-blocks with recycled concrete aggregates. **Construction And Building Materials**, v. 165, p. 859-865, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.079>.

JOZEF, Zajac; ONDREJ, Petruska; SVETLANA, Radchenko; DARINA, Duplakova; DAVID, Goldyniak. Hardness Testing of Polymer Concrete Castings by Schmidt Hammer. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 293-299, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.154>.

KANDYMOV, Nurmurat; HASHIM, Nor Fazilah Mohd; ISMAIL, Syuhaida; DURDYEV, Serdar. Derivation of Empirical Relationships to Predict Cambodian Masonry Strength. **Materials**, v. 15, n. 14, p. 5030, 20 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15145030>.

KHAN, Muhammad Azhar; KHAN, Muhammad Zahir; ZAMAN, Khalid; NAZ, Lubna. Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 336-344, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.091>.

KIRUTHIKA, C.; PRABHA, S. Lavanya; NEELAMEGAM, M. Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 1622-1625, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766>.

LEE, Tai Sik; LEE, Jaeho; ANN, Ki Yong. Manufacture of polymeric concrete on the Moon. **Acta Astronautica**, v. 114, p. 60-64, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.04.004>.

MADLOOL, N. A.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; KAMALISARVESTANI, M. An overview of energy savings measures for cement industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 18-29, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.046>.

MARTÍNEZ-LÓPEZ, Miguel; MARTÍNEZ-BARRERA, Gonzalo; SALGADO-DELGADO, René; GENCEL, Osman. Recycling polypropylene and polyethylene wastes in production of polyester based polymer mortars. **Construction And Building Materials**, v. 274, p. 121487, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121487>.

MATOS, J. R.; MERCURI, L.; BARROS, G. Análise térmica aplicada a fármacos e medicamentos. **Biofarmacotécnica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009. Cap 4, p. 32-65.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. (2008) – Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais, Editora IBRACON.

MIRANDA, L. V.; NASCIMENTO, J. W. B. do; VALDES, J. R. Hot mix method for the manufacture of sand-polymer bricks. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 17, p. 17410, 2024. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000400010>.

MIRANDA, L. V.; VALDES, J. R.; CORTES, D. D. Solar bricks for lunar construction, **Construction And Building Materials**, v. 139, p. 241-246, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.029>.

MOFOKENG, J. P.; LUYT, A. S.; TÁBI, T.; KOVÁCS, J. Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. **Journal Of Thermoplastic Composite Materials**, v. 25, n. 8, p. 927-948, 2 nov. 2011. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0892705711423291>.

MOHAMMED, Hazha; GIUNTINI, Francesca; SADIQUE, Monower; SHAW, Andy; BRAS, Ana. Polymer modified concrete impact on the durability of infrastructure exposed to chloride environments. **Construction And Building Materials**, v. 317, p. 125771, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125771>.

MOHAMMED, T. K., HAMA, S. M. Mechanical properties, impact resistance and bond strength of green concrete incorporating waste glass powder and waste fine plastic aggregate. **Innov. Infrastruct. Solut**, v. 7, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00652-4>.

MOKHTAR, Alireza; NASOOTI, Mohsen. A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. **Energy Strategy Reviews**, v. 28, p. 100458, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2020.100458>.

MONATSHEBE, Tshiyoyo; MULABA-BAFUBIANDI, Antoine F.; NYEMBWE, Didier Kasongo. Mechanical properties and mineralogy of artisanal clay bricks manufactured in Dididi, Limpopo, South Africa. **Construction And Building Materials**, v. 225, p. 972-982, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.247>.

MOODI, Faramarz; KASHI, Amin; RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar; POUREBRAHIMI, Mohammadreza. Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes. **Construction And Building Materials**, v. 191, p. 145-154, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.198>.

MOUJOURD, Zineb; HARRATI, Achraf; MANNI, Ahmed; NAIM, Amine; BOUARI, Abdeslam El; TANANE, Omar. Study of fired clay bricks with coconut shell waste as a renewable pore-forming agent: technological, mechanical, and thermal properties. **Journal Of Building Engineering**, v. 68, p. 106107, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2023.106107>.

MUKHAMEDZHANOVA, Olga; DOLGORUKOV, Dmitrii. A method for calculating the uncertainty of the tensile strength during bending of concrete prisms used in the construction of transport infrastructure. **Transportation Research Procedia**, v. 63, p. 2608-2613, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.300>.

NIAKI, Mostafa Hassani; AHANGARI, Morteza Ghorbanzadeh; PASHAIAN, Matin. A material-independent deep learning model to predict the tensile strength of polymer concrete. **Composites Communications**, v. 36, p. 101400, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coco.2022.101400>.

NICOLINI, Adriana; RODRIGUES, Adalberto Viana; BRAGANÇA, Saulo Roca; JACOBI, Marly Maldaner. Evaluation of Latex Polymeric mortar properties for laying bricks in non-structural masonry. **Journal Of Building Engineering**, v. 59, p. 105080, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105080>.

OH, Kiwon; YI, Haozhe; KOU, Rui; QIAO, Yu. Sectioned processing of compaction self-assembly of an ultralow-binder-content particulate composite. **Composites Communications**, v. 23, p. 100588, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coco.2020.100588>.

OLIVEIRA, Helington Neves de. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos para aplicação em deck**. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Fundação Oswaldo Aranha - Unifoa, Volta Redonda, 2013.

OLIVEIRA, Jean de Lima. **Processamento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras da palmeira real australiana**. 2015. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Fundação Oswaldo Aranha - Unifoa, Volta Redonda, 2015.

PăRPăRIÑă, Elena; NISTOR, Manuela Tatiana; POPESCU, Maria-Cristina; VASILE, Cornelia. TG/FT–IR/MS study on thermal decomposition of polypropylene/biomass composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 109, p. 13-20, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.001>.

PHUONG, Nguyen Tri; SOLLOGOUB, Cyrille; GUINAULT, Alain. Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp/bamboo fiber composites. **Journal Of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 21, p. 3244-3256, 9 ago. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684410370905>.

PIRATELLI-FILHO, Antonio; SHIMABUKURO, Frank. Characterization of compression strength of granite-epoxy composites using design of experiments. **Materials Research**, v. 11, n. 4, p. 399-404, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392008000400003>.

REIS, J.M.L.; MOTTA, E.P. Mechanical behavior of piassava fiber reinforced castor oil polymer mortars. **Composite Structures**, v. 111, p. 468-472, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.023>.

ROMERO, Louis; CORTES, Douglas D.; VALDES, Julio R. Experimental assessment of the heal-ability of a polymer bonded sand. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 610-617, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.184>.

SALAOU, Nourou Mahaman Lawali; THUO, Joseph; KABUBO, Charles; GARIY, Zachary Abiero. Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Laterite Masonry Bricks. **Civil Engineering and Architecture**, v. 9, n. 7, p. 2178-2186, dez. 2021. Horizon Research Publishing Co., Ltd. <http://dx.doi.org/10.13189/cea.2021.090707>.

SARDE, Bhagyashri; PATIL, Y.D. Recent Research Status on Polymer Composite Used in Concrete-An Overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 3780-3790, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.316>.

SARKAR, Madhuchhanda; DANA, Kausik; GHATAK, Sankar; BANERJEE, Amarnath. Polypropylene-clay composite prepared from Indian bentonite. **Bulletin Of Materials Science**, v. 31, n. 1, p. 23-28, fev. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12034-008-0005-5>.

SATHIPARAN, Navaratnarajah; JEYANANTHAN, Pratheeba. Prediction of masonry prism strength using machine learning technique: effect of dimension and strength

parameters. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 106282, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106282>.

SILVA, Thaís Leal da Cruz; CARVALHO, Elaine Aparecida Santos; BARRETO, Gabriela Nunes Sales; SILVA, Tatiane Brito Perim da; DEMARTINI, Tcharllis João da Cunha; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes. Characterization of artificial stone developed with granite waste and glass waste in epoxy matrix. **Journal Of Materials Research and Technology**, v. 26, p. 2528-2538, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.045>.

SOSOI, Gavril; BARBUTA, Marinela; SERBANOIU, Adrian Alexandru; BABOR, Dan; BURLACU, Andrei. Wastes as aggregate substitution in polymer concrete. **Procedia Manufacturing**, v. 22, p. 347-351, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.052>.

SOUZA JUNIOR, Tennon Freire de; HEINECK, Karla Salvagni; SILVA, Cezar Falavigna; ROSA, Francisco Dalla. Mechanical behavior and durability of a typical frictional cohesive soil from Rio Grande do Sul/Brazil improved with Portland cement. **Transportation Geotechnics**, v. 34, p. 100751, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100751>.

SUHENDRO, Bambang. Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 305-320, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>.

TANAKA, N., STIGSON, B., 2009. Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development, 1-36.

US EPA, 2011. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010. USEPA (United States Environmental Protection Agency), Washington, DC, 20460.

WANG, Jiaqing; DAI, Qingli; GUO, Shuaicheng; SI, Ruizhe. Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays.

Construction And Building Materials, v. 203, p. 469-480, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.085>.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. **Getting the numbers right: cement industry energy and CO2 performance**. p. 42, 2011.

WWF - World Wide Fund for Nature, Solucionar a poluição plástica: Transparência e responsabilização, 2019.

ZANVETTOR, Giovanni; BARBUTA, Marinela; ROTARU, Ancuta; BEJAN, Liliana. Tensile Properties of Green Polymer Concrete. **Procedia Manufacturing**, v. 32, p. 248-252, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.210>.

ZHANG, Xijun; DU, Mingrui; FANG, Hongyuan; SHI, Mingsheng; ZHANG, Chao; WANG, Fuming. Polymer-modified cement mortars: their enhanced properties, applications, prospects, and challenges. **Construction And Building Materials**, v. 299, p. 124290, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124290>.

ZIMMERMANN, Matheus V.G.; ZATTERA, Ademir J. Recycling and reuse of waste from electricity distribution networks as reinforcement agents in polymeric composites. **Waste Management**, v. 33, n. 7, p. 1667-1674, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.002>.