



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
MARCELA REIS CARVALHO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE
AGREGADO RECICLADO POLIMÉRICO

ESTÂNCIA/SE
2022

MARCELA REIS CARVALHO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE
AGREGADO RECICLADO POLIMÉRICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância/SE,
como pré-requisito para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

ESTÂNCIA/SE
2022

C331a Carvalho, Marcela Reis.
Avaliação das propriedades do concreto com incorporação de agregado reciclado polimérico. / Marcela Reis Carvalho. - Estância, 2022.
80 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2022.

Orientadora: Profa. Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo.

1. Agregado reciclado. 2. Cola polimérica. 3. Resíduo. 4. Sustentabilidade. 5. Concreto. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Melo, Fernanda Martins Cavalcante de. III. Título.

CDU: 624:502.131.1

MARCELA REIS CARVALHO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE
AGREGADO RECICLADO POLIMÉRICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância/SE,
como pré-requisito para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

Aprovado em: 19 / 07 / 2022

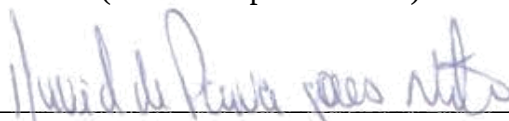
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo
(IFS – Campus Estância)



Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira
(IFS – Campus Estância)



Prof. Dr. David de Paiva Gomes Neto
(IFS – Campus Lagarto)

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que sempre me conduziu em todos os momentos.

Aos meus pais, Maria das Graças Reis Teixeira e Marcelo Fonseca de Carvalho, que sempre estiveram ao meu lado nas horas mais difíceis e felizes da minha vida.

A minha irmã, Sara Reis Teixeira, meus queridos avós, meus tios, minhas tias e toda a minha família, por todo apoio, energia positiva e compreensão durante essa trajetória.

A minha prezada e querida orientadora, Prof. ^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo, pela dedicação, compreensão e empenho para realização deste trabalho. Gratidão pela confiança!

A técnica de laboratório Juci, por todo auxílio e disponibilidade durante a execução dos ensaios.

Aos colegas, Emerson, Guilherme, Karoline, Handellon, Íris e Carol, por toda ajuda no laboratório e na pesquisa.

A FAMOSSUL, pelo fornecimento do resíduo de cola polimérica, em particular a técnica Isadora, por toda atenção e disponibilidade do seu tempo.

A Ouro *Plastic*, pelo apoio no processo de trituração do resíduo polimérico, em especial o engenheiro Alan Prata, pela atenção e suporte.

RESUMO

A indústria da construção civil tem um elevado consumo de concreto e, em proporções equivalentes, de insumos para sua produção. Aliado a isso, tem-se o crescimento do volume de resíduos gerados nas construções e em outras indústrias, a exemplo dos resíduos de polímeros, que são descartados de forma inadequada na natureza. Em busca por alternativas sustentáveis para tais problemas, o estudo da utilização de resíduos poliméricos como agregado é uma opção de aplicação para a produção de um concreto mais sustentável. Assim, esta pesquisa tem como objetivo produzir um concreto com agregado reciclado de cola polimérica, em substituição parcial ao agregado graúdo. Nesse estudo foram dosadas cinco formulações, com substituição do agregado graúdo convencional (brita granítica) por agregado reciclado (cola polimérica), em 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os materiais componentes das misturas: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e agregado polimérico foram ensaiados, conforme as prescrições normativas. Para o concreto produzido foi determinado um traço de 1:1,76:2,82, com relação água/cimento constante em 0,46. Os concretos foram ensaiados quanto às suas propriedades no estado fresco (consistência, teor de ar e massa específica aparente) e no estado endurecido (massa específica real, índice de vazios, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade). Os resultados obtidos nos ensaios foram tratados e analisados por meio da metodologia de análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey e foram comparados e discutidos com os dados explorados na revisão bibliográfica, que apresentaram estudos similares. Os resultados mostraram que ao substituir o agregado natural pelo resíduo de cola polimérica no estado fresco ocorreu uma redução (13% - 16%) da consistência, um acréscimo (180% - 640%) do teor de ar e uma redução (4% - 13%) da massa específica aparente. No estado endurecido, um decréscimo (2% - 8%) para os valores da massa específica real, um aumento (13% - 31%) do índice de vazios, acompanhado do aumento (15% - 36%) da absorção de água e uma redução (34% - 81%) nos valores de resistência à compressão dos concretos. Nas amostras com agregado reciclado foi observado uma redução na descoloração e degradação visual das amostras em solução agressiva, indicando um aumento da durabilidade. Conclui-se, neste estudo, que é possível utilizar o resíduo de cola polimérica como agregado na produção de concreto, contribuindo com a redução da extração de grandes quantidades de matérias-primas e da poluição desses materiais no meio ambiente. Da mesma forma, sua utilização na produção de concretos pode aumentar a durabilidade desse material, o que favorece uma diminuição nos reparos e manutenções prediais.

Palavras-Chave: Agregado reciclado. Cola polimérica. Resíduo. Sustentabilidade. Concreto.

ABSTRACT

The construction industry has a high consumption of concrete and, in equivalent proportions, of inputs for its production. Allied to this, there is a growth in the volume of waste generated in construction and in other industries, such as polymers, which are improperly disposed of in nature. In search of sustainable alternatives for such problems, the study of the use of polymeric residues as aggregate is an application option for the production of a more sustainable concrete. In this study, five formulations were dosed, with substitution of the conventional coarse aggregate (granitic gravel) by recycled aggregate (polymer glue), in 0%, 10%, 20%, 30% and 40%. The materials components of the mixtures were cement, fine aggregate, coarse aggregate and polymeric aggregate were tested, according to the normative requirements. For the concrete produced was determined a trace of 1:1,76:2,82, with constant water/cement ratio at 0,46. The concretes were tested for their properties in the fresh state (consistency, air content and apparent density) and in the hardened state (real density, void index, water absorption, compressive strength and durability). The results obtained in the trials were treated and analyzed using the methodology of analysis of variance (ANOVA), followed by the Tukey test, and they were compared and discussed with the data explored in the literature review, which presented similar studies. The results showed that replacing the natural aggregate with the polymer glue residue in the fresh state resulted in a reduction in consistency (13% - 16%), an increase in air content (180% - 640%) and a reduction in apparent specific mass (4% - 13%). The hardened state decreased (2% - 8%) for the real density values, an increase (13% - 31%) of the void index, accompanied by the increase (15% - 36%) of the water absorption and a reduction (34% - 81%) in the compressive strength values of the concretes were observed. As well as, for the samples with recycled aggregate was observed a reduction in discoloration and visual degradation of the samples in aggressive solution, indicating an increase in durability. It is concluded in this study that it is possible to use the polymer glue residue as aggregate in the production of concrete, contributing to the reduction of the extraction of large quantities of raw materials and the pollution of these materials in the environment. Likewise, its use in buildings can increase durability, which favors a decrease in repairs and building maintenance.

Keywords: Recycled aggregate. Polymeric glue. Residue. Sustainability. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do roteiro experimental	39
Figura 2 – Resíduo de cola polimérica retirado da fábrica	41
Figura 3 – Resultados da resistência à compressão de concretos com agregado reciclado polimérico	43
Figura 4 – Medição do índice de consistência	45
Figura 5 – Ensaio pelo método gravimétrico	46
Figura 6 – Etapas do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real	47
Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão com a prensa hidráulica, após rompimento da amostra	48
Figura 8 – Ensaio de durabilidade com amostras em solução de sulfato de sódio	49
Figura 9 – Curva granulométrica do agregado miúdo	53
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado graúdo convencional	54
Figura 11 – Resultados dos valores de consistência dos concretos	56
Figura 12 – Resultados do teor de ar dos concretos	57
Figura 13 – Resultados de massa específica aparente dos concretos	59
Figura 14 – Resultados da massa específica real dos concretos	60
Figura 15 – Resultados do índice de vazios dos concretos	62
Figura 16 – Resultados da absorção de água dos concretos	63
Figura 17 – Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias	64
Figura 18 – Resultados da variação de massa das amostras de concreto em solução de sulfato de sódio	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo para produção de concreto	40
Quadro 2 – Ensaio de caracterização do agregado graúdo para produção de concreto	41
Quadro 3 – Ensaio de caracterização do agregado graúdo polimérico	42
Quadro 4 – Resultados da variação de cor e aspecto visual dos concretos em solução de de sódio	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de polímeros utilizados como agregados poliméricos em materiais cimentícios	22
Tabela 2 – Resultados obtidos na literatura para consistência de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	25
Tabela 3 – Resultados obtidos na literatura para teor de ar de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	27
Tabela 4 – Resultados obtidos na literatura para massa específica aparente de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	28
Tabela 5 – Resultados obtidos na literatura para massa específica real de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	30
Tabela 6 – Resultados obtidos na literatura para índice de vazios de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	32
Tabela 7 – Resultados obtidos na literatura para absorção de água de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	33
Tabela 8 – Resultados obtidos na literatura para resistência à compressão de matrizes cimentícias com agregados poliméricos	35
Tabela 9 – Resultados obtidos na literatura para durabilidade de matrizes cimentícias com agregados poliméricos em solução de sulfato de sódio	38
Tabela 10 – Ensaio de caracterização do cimento Portland	40
Tabela 11 – Composição para dosagem em volume por lote de concreto	44
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland	51
Tabela 13 – Composição química do CP II F-32	52
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo	52
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo convencional.	53
Tabela 16 – Propriedades físicas e químicas do agregado polimérico	54
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo polimérico	55
Tabela 18 – Variação percentual da massa das amostras em solução de sulfato de sódio	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – Instituto Americano do Concreto

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CO₂ – Gás carbônico

IFS – Instituto Federal de Sergipe

NBR – Normas Brasileiras

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio

MPa – Mega Pascal

ρ_{ap} – Massa específica aparente

ρ_r – Massa específica real

pH – Potencial hidrogeniônico

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Percentual

° C – Temperatura em Celsius

g – Grama

m³ – Metro cúbico

mm – Milímetro

kg – Quilograma

Kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

g/cm³ – Grama por centímetro cúbico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	20
2.2	USO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO AGREGADOS PARA MATERIAIS CIMENTÍCIOS	21
2.3	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO POLIMÉRICO	23
2.3.1	Propriedades do concreto com agregado polimérico	24
2.3.1.1	<i>Propriedades do concreto com agregado polimérico no estado fresco</i>	24
2.3.1.1.1	<u>Consistência</u>	24
2.3.1.1.2	<u>Teor de ar</u>	26
2.3.1.1.3	<u>Massa específica aparente</u>	28
2.3.1.2	<i>Propriedades do concreto com agregado polimérico no estado endurecido</i>	29
2.3.1.2.1	<u>Massa específica real</u>	30
2.3.1.2.2	<u>Índice de vazios</u>	31
2.3.1.2.3	<u>Absorção de água</u>	32
2.3.1.2.4	<u>Resistência à compressão</u>	34
2.3.1.2.5	<u>Durabilidade</u>	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	MATERIAIS	40
3.1.1	Cimento	40
3.1.2	Agregado Miúdo	40
3.1.3	Agregado graúdo convencional	41
3.1.4	Agregado graúdo polimérico	41

3.1.5	Água	42
3.1.6	Aditivo	42
3.2	MÉTODOS	43
3.2.1	Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos corpos de prova	43
3.2.2	Ensaio de caracterização do concreto com agregado polimérico	44
3.2.2.1	<i>Ensaio no estado fresco</i>	45
3.2.2.1.1	<u>Ensaio de consistência</u>	45
3.2.2.1.2	<u>Ensaio de teor de ar e massa específica aparente</u>	45
3.2.2.2	<i>Ensaio no estado endurecido</i>	46
3.2.2.2.1	<u>Ensaio de massa específica real, índice de vazios e absorção de água</u>	47
3.2.2.2.2	<u>Ensaio de resistência à compressão</u>	48
3.2.2.2.3	<u>Ensaio de durabilidade</u>	49
3.2.3	Tratamento e análise dos dados	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES	51
4.1.1	Cimento Portland	51
4.1.2	Agregado miúdo	52
4.1.3	Agregado graúdo convencional	53
4.1.4	Agregado graúdo polimérico	54
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	56
4.2.1	Ensaio para caracterização das propriedades dos concretos no estado fresco	56
4.2.1.1	<i>Ensaio de consistência</i>	56
4.2.1.2	<i>Ensaio de teor de ar</i>	57
4.2.1.3	<i>Ensaio de massa específica aparente</i>	58
4.2.2	Ensaio para caracterização das propriedades dos concretos no estado endurecido	60
4.2.2.1	<i>Ensaio de massa específica real</i>	60
4.2.2.2	<i>Ensaio de índice de vazios</i>	61

4.2.2.3	<i>Ensaio de absorção de água</i>	62
4.2.2.4	<i>Ensaio de resistência à compressão</i>	64
4.2.2.5	<i>Ensaio de durabilidade</i>	65
4.2.2.5.1	<u>Variação da massa</u>	66
4.2.2.5.2	<u>Variação da cor e aspecto visual</u>	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1	CONCLUSÕES	70
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção artificial mais consumido em todo o mundo, o que se traduz em enorme consumo de energia e emissões de gás carbônico (CO_2) durante a sua produção e transporte. Enquanto isso, o agregado representa cerca de dois terços do volume total do concreto, e a fabricação de agregado natural envolve a mudança do ecossistema de terras, pedreiras, escavação, consumo de energia, classificação, transporte e poluição do solo e do ar. A maioria dessas etapas está associada ao alto consumo de combustível, que contribui para as emissões de CO_2 na atmosfera, que é estimado em 0,8-0,95 kg para a produção de 1 kg de cimento. Assim, grandes esforços têm sido feitos para desenvolver alternativas sustentáveis para a produção de concreto, o que pode resultar em múltiplas vantagens para esse material (AL-MANSOUR, et al., 2022).

A redução do consumo de carbono do concreto na indústria da construção é, portanto, um passo fundamental para mitigar as mudanças climáticas. O uso de resíduos e materiais reciclados em concreto tem como objetivo desviar massa de aterro ou incineração para substituir os materiais convencionais normalmente usados no concreto (NARAN, et al., 2022).

O concreto polimérico é um dos materiais artificiais mais aplicáveis nos últimos anos. É conhecido pelas suas modificações nas propriedades em comparação ao concreto convencional, incluindo algumas propriedades consideradas apropriadas, como por exemplo, endurecimento rápido, boa resistência a ambientes corrosivos e durabilidade adequada. Assim, os concretos poliméricos estão sendo usados em diversas aplicações, como para reparo e como material funcional para aumentar a vida útil da construção (ATAABADI, et al., 2021).

A fim de investigar o comportamento e a influência das propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregado polimérico, inúmeras pesquisas têm sido realizadas. Os estudos de Algahtani, et al. (2017) baseiam-se no uso do agregado polimérico manufaturado em substituição ao agregado leve do concreto. Os resultados obtidos nas misturas de concreto, incorporando o agregado polimérico fabricado, tiveram um comportamento dúctil e sugeriram um nível de substituição de até 25%, comprometendo minimamente as propriedades para o concreto leve. Foi concluído que a influência do nível de substituição dos agregados determina uma redução da resistência mecânica e no módulo de elasticidade dos concretos.

Nematzadeh, Shahmansouri e Fakoore (2020) analisaram a resistência à compressão de um concreto reforçado com fibras de polímeros e a partir dos resultados obtidos, concluíram que substituindo 10% de areia natural por PET reciclado seria uma substituição ideal para

determinar uma resistência à compressão confiável para o concreto endurecido, porém com benefícios ambientais e mais leve que o convencional.

Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021) investigaram sobre os concretos produzidos com misturas de resíduos poliméricos reciclados em compósitos de cimento para a produção de concreto leve de alta resistência. Os resultados dos ensaios indicam uma redução na trabalhabilidade, densidade e resistência à compressão, na medida que aumentavam as quantidades de grânulos poliméricos reciclados, porém observaram que o uso de resíduos poliméricos na proporção de 10% para a produção de concreto leve de alta resistência é muito semelhante para a resistência ao concreto leve produzido com materiais convencionais. Do mesmo modo, Senhadji, et al. (2019) analisaram que o formato granulométrico dos resíduos poliméricos é considerado um parâmetro importante, pois afeta diretamente a ligação entre a matriz e os agregados.

Mohammed, et al. (2022) avaliaram o efeito que o concreto modificado com polímeros termoplásticos recicláveis tem sobre o processo de corrosão das estruturas de concreto armado. Os resultados mostraram que o efeito da incorporação dos polímeros em substituição pelo agregado miúdo, em 3% e 5% no concreto, preveniu a migração de água via capilaridade que ocorre entre 2 a 3 dias após a exposição do concreto à água. Ainda, a substituição de agregados miúdos naturais por alguns polímeros levou a uma redução da migração de íons cloretos para as amostras de concreto, indicando que alguns deles impedem os cloretos livres no interior do concreto.

Apesar de muitos trabalhos na literatura abordarem a produção de concreto com a incorporação do agregado reciclado polimérico, nota-se escassez de pesquisas sobre o uso de resíduo de cola polimérica a base de poliuretano em concretos. Assim, este estudo busca produzir um concreto com agregado reciclado de cola polimérica, em substituição parcial ao agregado graúdo. O agregado reciclado é oriundo de resíduo de cola polimérica a base de poliuretano, utilizada em colagens de portas e componentes de madeira. Foram dosadas cinco formulações, com substituição do agregado graúdo natural (brita granítica) por agregado reciclado (cola polimérica), em 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os materiais componentes das misturas foram ensaiados, conforme as prescrições normativas. O concreto produzido foi analisado quanto às suas propriedades no estado fresco (consistência, massa específica aparente e teor de ar) e no estado endurecido (massa específica real, índice de vazios, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade).

1.1 JUSTIFICATIVA

As fábricas que utilizam materiais poliméricos no seu processo de produção, normalmente destinam esse material de forma inadequada no meio ambiente e sendo um material não-biodegradável, que em presença de determinados agentes pode causar toxicidades, promove altos impactos ambientais e malefícios para a população do município.

A crescente taxa de geração de resíduos e as consequentes penalidades ambientais do aterro de resíduos de polímeros precisam de atenção global para buscar aplicações industriais sustentáveis e inovadoras que possam desviar esses resíduos dos aterros para atividades úteis da construção civil (MOHAMMADINIA, et al., 2019).

Atualmente, é crescente a necessidade de soluções mais adequadas para manter o meio ambiente e sustentar as fontes naturais. Portanto, o uso de resíduos como agregado na produção de novos concretos torna-se mais comum em todo o mundo, por isso os efeitos dos agregados reciclados nas propriedades do novo concreto precisavam ser investigados (TOBEIA, et al., 2021).

Nota-se na literatura a existência de autores como Wong, et al. (2020), Boucendra, Bederina e Ghernouti (2020) que tentam implementar estudos com o concreto de agregado reciclado, buscando desenvolver a sustentabilidade na construção civil. No entanto, ainda se encontram poucas pesquisas voltadas para desenvolver esse tipo de concreto com agregado de cola polimérica, assim como existe a problemática no município de Estância/SE sobre o descarte desse material. Portanto, aprofundar sobre a influência das propriedades do concreto com agregado reciclado de resíduo polimérico, que seria descartado em aterros com lixo comum, é uma alternativa sustentável e inovadora, voltada para a preservação socioeconômica do município de Estância/SE, diminuindo a extração dos recursos naturais e contribuindo com a diminuição do impacto ambiental.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da presente pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Esse estudo tem como objetivo geral produzir um concreto com agregado reciclado de cola polimérica, em substituição parcial ao agregado graúdo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Explorar o referencial bibliográfico no que se refere a incorporação do agregado reciclado polimérico;
- Determinar e compreender as propriedades dos materiais constituintes do concreto, como também sua influência nas características do material fabricado;
- Desenvolver formulações para produção do concreto com agregado reciclado de cola polimérica;
- Investigar a influência da incorporação do agregado reciclado de cola polimérica nas seguintes propriedades: consistência, massa específica aparente, teor de ar, massa específica real, índice de vazios, absorção de água, resistência à compressão, e durabilidade das amostras de concreto;
- Relacionar os dados experimentais obtidos nessa pesquisa, com resultados disponíveis na literatura para sistemas semelhantes;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com o objeto de estudo, neste tópico serão abordadas as diversas literaturas da mesma linha de pesquisa, a fim de solidificar a vertente desse estudo com seu referencial teórico, que fará parte da análise e comparação dos resultados.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A indústria da construção civil tem contribuído na geração de alguns prejuízos ao meio ambiente, devido ao elevado volume de resíduos gerados. Como solução para este problema, os detritos nas construções, bem como os materiais residuais de outras indústrias, tais como pneus, polímeros e vidros, podem ser utilizados como agregados na composição de concreto e argamassa (GRANZOTTO; SOUZA ALVES, 2013).

O descarte aleatório desses materiais de resíduo libera emissões nocivas de gás carbônico, assim como também o seu acúmulo causa problemas de gestão de resíduos, deterioração ambiental e ocupa locais vazios. Além disso, mais de 6 bilhões de toneladas de concreto são produzidos (anualmente) em todo o mundo para realizar atividades de construção, o que demanda uma grande quantidade de materiais naturais para utilização como agregado (SURESH; PAL, 2021).

No entanto, uma alternativa para essas problemáticas seria a sustentabilidade que está presente na área da construção civil e nela se inclui, o consumo consciente de matéria-prima, o reaproveitamento e a minimização de resíduos. Assim, entre as principais vantagens dessas boas práticas estão a redução de custos, por meio da otimização de processos, e incentivos fiscais; mais conforto para os proprietários, garantido por cuidados arquitetônicos sustentáveis relacionados a fatores térmicos, luminosos e outros ambientais; e um melhor argumento de venda, uma vez que o conceito de sustentabilidade é muito valorizado no mundo contemporâneo (TRINDADE, et al., 2020).

O conceito de sustentabilidade também poderia ser adotado para desenvolver os materiais modernos, onde resíduos reciclados e descartados de diversas indústrias ajudam no desenvolvimento de materiais sustentáveis e na redução do impacto adverso ao meio ambiente (MARAVEAS, 2020).

Logo, nas últimas décadas, devido ao aumento do custo das matérias-primas e à redução contínua dos recursos naturais, a reciclagem de resíduos industriais tornou-se uma opção interessante para a construção civil (LUCOLANO, et al., 2013).

2.2 USO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO AGREGADOS PARA MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Os resíduos poliméricos podem ser encontrados em todos os lugares e se tornaram uma fonte significativa de compostos tóxicos, que são uma ameaça para os ecossistemas marinhos e terrestres. Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021) estimaram que só em 2010, aproximadamente 5 a 13 milhões de toneladas métricas de resíduos de polímeros foram lançados nos corpos d'água. O aumento desse consumo e a taxa na qual os resíduos sólidos de polímeros são criados vêm desde a primeira produção em escala industrial de polímeros sintéticos na década de 1940. Estima-se que o mundo produz cerca de 150 milhões de toneladas desse material por ano, o que é quase 4,8 toneladas por segundo e um *per capita* de produção de 25 Kg/ano (OLOFINNADE; CHANDRA; CHAKRABORTY, 2021 apud MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, FLORESTAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2018).

Os polímeros atendem a uma ampla variedade de mercados devido às suas características, como baixa densidade, boa resistência, facilidade de projeto, processabilidade, durabilidade e baixo custo. Consequentemente, grandes quantidades de materiais poliméricos são utilizados pela sociedade, o que acaba exercendo uma pressão sobre o meio ambiente, devido à sua baixa biodegradabilidade. Por conseguinte, pesquisas como a de Jacob-Vaillancourt e Sorelli (2018) propõem a utilização desses polímeros como agregado para a produção de concreto, sendo os tipos mais frequentemente usados: tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC) e policarbonato (PC).

Na Tabela 1 são apresentados os principais tipos de polímeros utilizados em pesquisas experimentais para produção de agregados poliméricos. Nota-se uma grande utilização de polímero do tipo PET, a qual pode ser justificada pela sua fácil acessibilidade e o grande volume que é descartado desse material. Apesar disso, alguns pesquisadores utilizaram outros tipos de polímeros como Colangelo, et al (2016) que usaram a poliolefina e obtiveram resultados satisfatórios como a redução do peso unitário do agregado e consequentemente da matriz cimentícia.

Registra-se na Tabela 1 as proporções granulométricas de polímeros utilizados na produção de agregados poliméricos; os autores adotaram distintas granulometrias (0,1 mm – 10 mm) e avaliaram a sua influência nas propriedades da matriz cimentícia. Boucedra, Bederina e Ghernouti (2020) observaram que a distribuição granulométrica do agregado influencia diretamente nas propriedades do concreto, uma vez que as partículas com menores diâmetros

melhoram a área de contato da superfície da mistura, o que consequentemente, melhora a consistência. Logo, isso facilita a redução de vazios, de poros interligados e de adensamento do concreto.

Tabela 1 –Tipos de polímeros utilizados como agregados poliméricos em materiais cimentícios (Continua)

Autores	Polímero utilizado	Granulometria (mm)	Percentual de Polímero	Material Produzido
Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021)	PET	0,10 – 4,0	0%,10%,30%,50%	C
Boucedra, Bederina e Ghernouti (2020)	PET	1,5 – 3,5	0%,25%,50%,75%,100%	C
Mohammadinia, et al. (2020)	Polímeros residuais	1,18 – 5,0	0%,1%,3%,5%,7%,10%	C
Nematzadeh, Shahmansouri e Fakoor (2020)	PET	4,0 – 7,0	0%,5%,10%	C
Wong, et al. (2020)	Polímeros residuais	< 5,0	0% e 10%	C
Senhadji, et al. (2019)	PVC	4,0	0%,10%,30%,50%,70%	A
Faraj, Sherwani e Daraei (2019)	Polipropileno	4,0 – 8,0	0%,10%,20%,30%,40%	C
Zaleska, et al. (2018)	polipropileno	0,10 – 10,0	0%,20%,30%,40%,50%	C
Badache, et al. (2018)	PET	< 3,15	0%,15%,30%,45%,60%	A
Jacob-Vaillancourt e Sorelli (2018)	PVC e PP, PE, PS	2,0 – 11,4	0%,5%,10%,20%	C
Bui, Satomi e Takahashi (2018)	PET	2,5 – 3,0	0%,25%,50%,75%	C
Algahtani, et al. (2017)	PET	10,0	0%,25%,50%,75%,100%	C
Medina, et al. (2017)	Poli-isopreno	4,0 – 8,0	0%,20%,40%,60%,80%,100%	C
Coppola, et al. (2016)	PET e Polipropileno	0,18 – 1,4	0%,10%,25%	A
Colangelo, et al. (2016)	Poliolefina	< 6,0	0%,10%,20%,30%	C
Dulsang, et al. (2016)	EVA	4,5	0%,3%,5%,7%,10%	C
Ramírez-Arreola, et al. (2015)	PET	9,5	0%, 18%,36%,54%,72%,100%	A
Lucolano, et al. (2013)	PET	< 8,0	0%,10%,15%,20%,33%,50%	A
Safi, et al. (2013)	PET	1,5 – 5,0	0%,10%,20%,30%,50%	A

Tabela 1 –Tipos de polímeros utilizados como agregados poliméricos em materiais cimentícios (Conclusão)

Autores	Polímero utilizado	Granulometria (mm)	Percentual de Polímero	Material Produzido
Silva, Brito e Saikia (2013)	PET	1,0 – 4,0	0%,7,5%,15%	A
Reis e Carneiro (2012)	PET	4,76	0%,5%,10%,15%,20%	A
Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010)	PET e PC	1,6 – 10,0	0%,3%,10%,30%,40%	A
Kout, et al. (2009).	PVC	< 5	0%,5%,15%,30%,45%	C
Batayneh, Marie e Asi (2007)	Polímeros residuais	0,15 – 9,5	0%,5%,10%,15%,20%	C

Fonte: O autor, 2022.

Notas: PET - tereftalato de etileno, PP - polipropileno, PE - polietileno, PVC - policloreto de vinila, PC - policarbonato, EVA - etileno acetato de vinila, Polímeros residuais – não mencionado o tipo específico de polímero.

(-) intervalo de valores.

A – argamassa e C – Concreto.

Na Tabela 1, foi disposto os percentuais (0%-100%) de incorporação de polímeros em argamassas e concretos, para a determinação da sua influência nas propriedades do material. O tipo de material polimérico e a sua granulometria afeta diretamente as propriedades do concreto. Alyousef, et al. (2021) justificaram esse comportamento entre o aumento de teor polimérico com o aumento do índice de vazios pelo fato das ligações entre a matriz e os agregados tornarem-se fracas, devido ao formato, textura dos grãos e seu comportamento hidrofóbico. No entanto, o polímero pode contribuir de forma positiva e proporcionar melhorias nas propriedades. O percentual ideal desse material poderá acarretar na diminuição do consumo de agregados graúdos e miúdos, na medida que o material for substituído parcialmente na mistura da argamassa ou do concreto, resultando numa menor emissão de gases tóxicos, podendo ser caracterizada como uma opção sustentável para o desenvolvimento de materiais de construção.

2.3 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO POLIMÉRICO

O concreto certamente é um dos materiais mais utilizados na construção civil, como também é o grande usuário de fontes naturais, como água, areia, cascalho e brita. Os agregados ocupam aproximadamente 65-80% do volume de concreto e têm uma grande influência nas

propriedades, como resistência, permeabilidade, estabilidade de volume, trabalhabilidade e durabilidade (FARAJ, SHERWANI, DARAEI, 2019).

A substituição parcial dos agregados naturais por resíduos poliméricos reciclados pode reduzir o peso do concreto, devido à baixa massa específica da estrutura dos polímeros, em comparação com os agregados naturais. Dentre essas vantagens do concreto com agregado polimérico estão: o tamanho reduzido dos componentes estruturais, maior flexibilidade de projeto, redução do peso próprio da estrutura, melhor resposta dinâmica à carga, menos reforço de aço e uma redução geral nos custos de construção. Outra grande mudança que ocorre no concreto incorporando resíduos de origem polimérica é o melhor isolamento térmico, sendo o principal critério para a conservação de energia (BASHA, et al., 2020).

Além disso, os trabalhos de investigação nesta área de influência do agregado polimérico nas propriedades do concreto, encontram-se ainda em curso e os resultados alcançados até agora mostram que o concreto e argamassa, assim desenvolvidos, abrem um amplo espectro de aplicações. É importante destacar que o uso de agregados poliméricos também tem sido estudado para determinados concretos especiais, como o concreto autoadensável (BOUCEDRA; BEDERINA; GHERNOUTI, 2020).

2.3.1 Propriedades do concreto com agregado reciclado polimérico

Verificou-se dentre as diversas pesquisas que utilizaram agregados poliméricos em matrizes cimentícias, que o estudo sobre as propriedades no estado fresco (consistência, teor de ar, massa específica aparente) e endurecido (massa específica real, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade) são de grande importância para a determinação do comportamento do concreto com substituição do agregado convencional pelo reciclado polimérico e que serão contemplados como critérios de análise neste estudo.

2.3.1.1 Propriedades do concreto com agregado polimérico no estado fresco

Neste tópico são apontadas e definidas as propriedades essenciais do concreto no seu estado fresco, bem como os resultados encontrados por outros autores.

2.3.1.1.1 Consistência

A ABNT NBR 16889: 2020 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone, define a propriedade da consistência como a mobilidade relativa ou a capacidade

de fluidez do concreto recém-misturado e ela pode ser medida pelo abatimento do tronco de cone, ou seja, ensaio *slump-test*.

Para Bauer (2019) a propriedade da consistência refere-se à firmeza da forma de um material ou à facilidade com a qual ele flui. No caso do concreto, algumas vezes, a consistência é adotada para traduzir o grau de umidade (a quantidade de água na mistura), pois, dentro de certos limites, concretos mais úmidos são mais trabalháveis do que concretos secos. Contudo, concretos de mesma consistência podem ter diferentes trabalhabilidades.

Silva, Brito e Veiga (2014) pesquisaram como o resíduo polimérico influencia na consistência. A partir de amostras com diferentes percentuais de resíduo em substituição parcial da areia, eles observaram que a consistência da mistura teve um aumento pouco significativo e menor que 2% em relação à amostra de referência. Essa pequena variação deve-se a trabalhabilidade ser pouco afetada com uma substituição de até 15% do resíduo polimérico, uma vez que o material polimérico até esse percentual não afetaria de forma expressiva a coesão entre os componentes do concreto.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, foi observado uma frequente redução da consistência (2,7%-47%).

Tabela 2 – Resultados obtidos na literatura para consistência de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (mm)	Acréscimo/ Decréscimo Máximo (%) – (% de resíduo)
Tanli, Damdelen e Pehlivan (2022)	C	0%/30%/40%/50%	175/75/85/95	↓45,72 (50%)
Algahtani (2022)	C	0%/25%/50%/75%/100%	175/ 45-95	↓47 (100%)
Bamigboye, et al. (2021)	C	0%/10%/20,30%/40%/100%	30/45/60/100/105/40	↑33% (100%)
Rukavina, et al. (2021)	C	0%/12%/20%	180/175/175	↓2,7 (20%)
Coppola, et al. (2016)	A	0%/10%/25%/50%	180/175/160/140	↓22% (50%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

A – Argamassa e C – Concreto.

Algahtani (2022) concluiu que a consistência diminuiu em até 47% para a maior proporção que foi incorporado o agregado polimérico (100%). A justificativa desse decréscimo seria pela

grande influência do tamanho, formato dos grãos e também a natureza hidrofóbica do polímero, que dificultaria a coesão entre as partículas da mistura. Entretanto, Rukavina, et al. (2021) investigaram a incorporação do agregado polimérico no concreto com a utilização de superplastificantes (aditivos) que mantiveram uma consistência semelhante à amostra controle e variação reduzida da sua consistência.

Dentre os autores da Tabela 2, Coppola, et al. (2016) menciona um outro fator de influência na propriedade da consistência, a forma dos agregados poliméricos e como esta afeta a reologia da matriz cimentícia: partículas alongadas, como polímeros. De forma similar, Tanli, Damdelen e Pehlivan (2022) analisaram o estudo da influência do resíduo polimérico na consistência do concreto e ambos concluíram, que independentemente do tipo de polímero utilizado, a forma não uniforme e as arestas vivas das partículas poliméricas reduzem a fluidez e aumentam o atrito entre os constituintes da mistura.

No entanto, pesquisas como a de Bamigboye, et al. (2021) que realizaram um pré-tratamento térmico para o agregado polimérico, observaram um aumento contínuo na trabalhabilidade com o aumento da incorporação do polímero em até 40%, após o qual a trabalhabilidade foi reduzida. O aumento da trabalhabilidade pode ser atribuído à redução da rigidez devido às baixas taxas de absorção de água pelos agregados poliméricos, levando à menor ligação entre a matriz e os agregados. Logo, em termos de consistência, a utilização de resíduos poliméricos em materiais cimentícios é viável, sendo observada a avaliação quanto a necessidade do uso de aditivos para cada tipo de matriz cimentícia.

2.3.1.1.2 Teor de ar

A ABNT NBR 16887:2020 - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico, define que o teor de ar é o volume de ar aprisionado ou incorporado no concreto, expresso em porcentagem do volume total de concreto fresco adensado.

Para Neville (2015) os vazios no concreto são constituídos tanto por bolhas de ar aprisionadas quanto por espaços originados, após o excesso de água ter sido removido, e dependem principalmente da relação água/cimento da mistura. Além disso, podem existir vazios advindos da água aprisionada embaixo e nas laterais das grandes partículas dos agregados, que representam o “ar acidental”, ou seja, vazios entre os grãos dos agregados originalmente em estado solto. Esses vazios são determinados pela granulometria das partículas mais finas da mistura e são removidos mais facilmente de misturas mais úmidas do que de misturas secas.

Abu-Saleem, et al. (2021) pesquisaram o efeito do resíduo polimérico no teor de ar do concreto. Foram produzidas amostras com os percentuais de 0%, 10% e 20% de resíduo polimérico como substituto parcial do agregado graúdo. Observou-se que as amostras contendo até 10% de resíduo apresentaram uma diminuição do teor de ar próximo de 20%, em relação à amostra de referência. O autor identifica essa redução em até 10% de incorporação do agregado polimérico devido à natureza hidrofóbica dos polímeros em comparação aos agregados naturais, o que proporciona uma menor interação entre o agregado e a pasta.

A partir da análise dos valores apresentados na Tabela 3, percebe-se que a maioria dos autores chegou a resultados semelhantes e um frequente aumento percentual (35,82%-89%) entre os valores do teor de ar proporcional a elevação do percentual de polímeros na matriz cimentícia. Desta forma, o estudo sobre a quantidade de vazios existentes no concreto é fundamental no controle da qualidade do mesmo, já que é uma propriedade que influencia na coesão das partículas, pois as bolhas de ar mantêm as partículas em suspensão reduzindo a sedimentação e evitando que a água seja eliminada.

Tabela 3 – Resultados obtidos na literatura para teor de ar de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (%)	Acréscimo/Decréscimo Máximo (%) (% de resíduo)
Abu-Saleem, et al. (2021)	C	0%/10%/20%	7,00/5,60/7,00	↓20% (10%)
Steyn, et al. (2021)	C	0%/15%/30%	1,50/1,75/2,25	↑50% (30%)
Rukavina, et al. (2021)	C	0%/12%/20%	1,50/2,20/2,30	↑53% (20%)
Roque-Silva (2020)	C	0%/5%/10%/15%/ 20%	3,00/3,60/6,70/5,50/ 4,30	↑35,82 (10%)
Jacob-Vaillancourt e Sorelli (2018)	C	0%,5%,10%,20%	3,70/3,80/5,80/7,00	↑89% (20%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

A – Argamassa e C – Concreto.

O teor de ar é geralmente influenciado pela quantidade de água adicionada em uma mistura, o teor de cimento e o tamanho dos agregados. Roque-Silva (2020) propuseram um estudo sobre o comportamento do teor de ar em amostras de concreto, porém com diferentes teores de 5%, 10%, 15% e 20% de agregado polimérico em substituição ao agregado graúdo. Observou-se que conforme incorporava o polímero nas amostras, o teor de ar aumentava em relação à

amostra controle (3,0%), sendo este de respectivamente, 3,6%, 6,7%, 5,5% e 4,3%. O aumento foi justificado pela formação de bolhas de ar que se aderem na superfície do polímero e são lançadas durante a moldagem do concreto, contribuindo para o aumento da porosidade da pasta cimentícia.

2.3.1.1.3 Massa específica aparente

Para os materiais granulares, a massa específica aparente é por definição a massa das partículas sólidas que ocupam uma unidade de volume aparente, que inclui o volume dos sólidos (com seus vazios permeáveis e impermeáveis). E deve ser menor que a real (ρ), uma vez que o volume aparente é maior que o volume de sólidos (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

Observou-se nas pesquisas de Silva, Brito e Veiga (2014) que ocorreu uma diminuição de até 8% da massa específica aparente da amostra em relação ao percentual de 15% de resíduo polimérico, em substituição ao agregado miúdo. Na medida que se aumenta a incorporação parcial do material polimérico na mistura, nota-se uma diminuição nos valores das massas específicas aparente para o concreto preparado. Esse fato deve-se ao material polimérico ter uma estrutura interna mais leve que os agregados convencionais.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4 observou-se uma constante diminuição (6,2%-45,5%) dos valores da massa específica aparente. Assim, pode-se concluir que pelo fato de o material polimérico ter uma estrutura mais leve que o agregado convencional, há uma contribuição na redução do peso próprio estrutural dos elementos de concreto e, consequentemente, uma economia no custo final da obra.

Tabela 4 – Resultados obtidos na literatura para massa específica aparente de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

(Continua)

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (g/cm ³)	Acréscimo/ Decréscimo Máximo (%) (% de resíduo)
Senhadji, et al. (2019)	A	0%/10%/30%/50%/70%	2188/2104/1889/1704 /1547	↓29,3 (70%)
Badache, et al. (2018)	A	0%/15%/30%/45%/60%	2100/2000/1850/1700 /1550	↓26 (60%)
Silva, Brito e Veiga (2014)	A	0%/5%/10% /15%	1740/1650/1620/1590	↓8 (15%)

Tabela 4 – Resultados obtidos na literatura para massa específica aparente de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (g/cm ³)	(Conclusão)
				Acréscimo/ Decréscimo Máximo (%) (% de resíduo)
Lucolano, et al. (2013)	A	0%/10%/15%/20%/25%/35%	1650/1420/1300/1230/1060/900	↓45,5 (35%)
Hannawi, Kamali-Bernanrd e Prince (2010)	A	0%/3%/10%/20%/ 50%	2173/2154/2088/2023/1755	↓19 (50%)
Islam e Shahjalal (2021)	C	0%/10%/20%/30%	2353/2300/2200/2150	↓8,4 (30%)
Olofinnade, Chandra, Chakraborty (2021)	C	0%/10%/30%/50%	2450/2370/2190/1950	↓20,4 (50%)
Algahtani, et al. (2017)	C	0%/25%/50%/75%/100%	1803/1798/1778/1752/1692	↓6,2 (100%)
Colangelo, et al. (2016)	C	0%/10%/20%/30%	2156/1987/1840/1660	↓23 (30%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

A – Argamassa e C – Concreto.

Islam e Shahjalal (2021) registraram que a massa específica aparente do concreto diminui com o aumento da porcentagem de teor do agregado polimérico na mistura. Para a a/c de 0,45, a massa unitária teve uma maior redução de 8,4% em relação ao teor de incorporação de 30% do agregado polimérico. Essa redução é causada pela morfologia do material, sendo um material que contém na sua composição cadeias de carbonos que o torna mais leve em comparação aos agregados convencionais na produção do concreto.

Lucolano, et al. (2013) obteve uma redução em torno de 45,50% da massa específica aparente em comparação a amostra de referência. Devido a essa redução expressiva na massa específica aparente desse material, o agregado reciclado polimérico seria uma ótima opção para utilização em concretos leves.

2.3.1.2 Propriedades do concreto com agregado polimérico no estado endurecido

Neste tópico são apontadas e definidas as propriedades essenciais dos concretos no seu estado endurecido, bem como os resultados encontrados por outros autores.

2.3.1.2.1 Massa específica real

A massa específica é a determinação da densidade em material particulado, considerando o volume real do material (excluindo-se os poros acessíveis à água pela superfície das partículas). O volume real das partículas pode ainda ser diferenciado de acordo com as definições, se incluídos os poros abertos (acessíveis à água) ou fechados (inacessíveis à água) das partículas (BAUER, 2019).

Os valores apresentados na Tabela 5 retratam a diminuição da massa específica real dos materiais com agregado reciclado, variando entre 8% a 29,3%, em relação à amostra de referência. Logo, percebe-se que há uma constância entre os resultados abordados e que essa propriedade atribuída a matriz cimentícia com agregado polimérico, é extremamente explorada pela natureza do material ser constituída de cadeias carbônicas leves e, portanto, influencia no peso específico real do concreto e reforça a indicação para estudos de concretos leves.

Tabela 5 – Resultados obtidos na literatura para massa específica real de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (g/cm ³)	Acréscimo/Decréscimo Máximo (%) - (% de resíduo)
Kangavar, et al. (2022)	C	0%/10%/30%/50%	2417/2340/2125/1845	↓21,16 (50%)
Hameed e Ahmed (2019)	C	0%/1%/3%/5%/7%/10%	2496/2276/2272/2176/2126/2150	↓13,9 (10%)
Colangelo, et al. (2016)	C	0%/10%/20%/30%	2570/2504/2350/2222	↓13,5 (30%)
Silva, Brito e Veiga (2014)	A	0%/5%/10%/15%	1912,5/1875/1825/1800	↓8 (15%)
Lucolano, et al. (2013)	A	0%/10%/15%/20%/25%/35%	2500/2300/2160/2110/1860/1670	↓29,3 (35%)
Ferreira, Brito e Saikia (2012)	C	0%/7,5%/15%	2360/2240/2090	↓11,4 (15%)
Hannawi, Kamali-Bernanrd e Prince (2010)	A	0%/3%/10%/20%/50%	2331/2318/2252/2170/1919	↓17,67 (50%)
Kout, et al. (2009)	C	0%/5%/15%/30%/45%	1795/1740/1660/1590/1530	↓14,8 (45%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 ↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 A – Argamassa e C – Concreto.

Hameed e Ahmed (2019) explicam que apesar da heterogeneidade em relação ao tipo e tamanho das partículas, o uso do agregado polimérico diminui a massa específica real em até 70%, em

relação ao convencional. E esses resultados são consistentes com os encontrados por Kangavar, et al. (2022) que observaram uma mesma diminuição da massa específica real do concreto com o incremento do teor de polímero. A massa específica real do concreto com taxas de substituição de 10% e 30% foi de 2.340 g/cm³ e 2.125 g/cm³, respectivamente, que foram relativamente próximas da amostra controle (2.417 g/cm³). Ainda, esse valor para o concreto com 50% de teor de grânulos poliméricos foi de 1845 g/cm³, demonstrando uma queda significativa de 21,16% em relação ao da amostra controle. A justificativa da redução da massa específica real seria a densidade mais leve dos polímeros em comparação aos agregados convencionais.

Os trabalhos de Safi, et al. (2013) mostraram que as resinas à base de PET reciclado podem ser utilizadas para produzir um concreto pré-moldado de boa qualidade e eles investigaram o efeito de resíduos de garrafas PET como agregados nas propriedades do concreto. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que esses resíduos poliméricos incorporados em até 10% na produção do concreto podem reduzir o peso entre 2% a 6% em relação ao peso normal do concreto.

2.3.1.2.2 Índice de vazios

A ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica, define que o índice de vazios é a relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total da mistura.

Para Neville (2015) o índice de vazios é definido como o volume total de poros maiores do que os poros de gel, sendo expresso como uma porcentagem do volume total da pasta de cimento hidratada.

Roque-Silva (2020) pesquisou o comportamento do índice de vazios em concretos com incorporação de agregado polimérico e as amostras foram produzidas com substituições de 5%,10%,15% e 20% do resíduo polimérico como substituto parcial do agregado graúdo. Verificou-se que as amostras contendo 20% de resíduo apresentaram um aumento de 19,44% do índice de vazios, em relação à amostra de referência.

O índice de vazios é geralmente influenciado pela relação água/cimento da mistura, forma e dimensão dos agregados. Colangelo, et al. (2016) avaliaram o comportamento do índice de vazios em amostras de argamassas, incorporando teores de 10%, 20% e 30% do agregado polimérico na mistura. Uma diferença considerável em termos dessa propriedade foi observada

para a substituição em 30% da massa do agregado miúdo pelo agregado polimérico, o índice de vazios passou de 15,4% para 25,2% em relação à amostra controle, um aumento de 63,63% dessa propriedade na mistura. Esse acréscimo foi justificado pelos autores em função da morfologia extremamente heterogênea do material e sua tendência hidrofóbica, ou seja, fibras ou agregados poliméricos que permitem um menor preenchimento dos vazios na matriz cimentícia.

Avaliando os valores apresentados na Tabela 6, observa-se que os estudos tiveram resultados similares e um gradual aumento percentual (18,75%-63,63%) do índice de vazios, na mesma proporção que se aumentava os teores de agregado polimérico na matriz cimentícia. Portanto, a avaliação sobre o índice de vazios existentes no concreto é relevante, visto que essa propriedade permite controlar o fluxo de fluidos e agentes agressivos dentro da microestrutura do concreto, influenciando diretamente na durabilidade da matriz cimentícia.

Tabela 6 – Resultados obtidos na literatura para índice de vazios de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores (%)	Acréscimo/Decréscimo Máximo (%) (% de resíduo)
Roque-Silva (2020)	C	0%,5%,10%,15%, 20%	3,6/3,7/4,1 /3,9/4,3	↑19,44 (20%)
Leite (2018)	C	0%/5%/10%/20%	6,53/7,32/8,00/8,49	↑30% (20%)
Correa, et al. (2017)	C	0%/30%/40%	8,93/12,98/13,64	↑52,74% (40%)
Colangelo, et al. (2016)	A	0%/10%/20%/30%	15,4/18,4/20,2/25,2	↑63,63 (30%)
Coppola, et al. (2016)	A	0%/10%/25%	16,00/17,00/19,00	↑18,75% (25%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

A – Argamassa e C – Concreto.

2.3.1.2.3 Absorção de água

A absorção de água representa a massa de água absorvida nos poros do material, durante um intervalo de tempo, sob pressão atmosférica (BAUER, 2019). Segundo Neville (2015) o volume de poros no concreto é medido pela absorção e é diferente da facilidade com a qual os fluidos podem penetrar no concreto. Essas duas grandezas não estão necessariamente relacionadas. A absorção normalmente é medida pela secagem de um corpo de prova até atingir uma massa

constante, seguida por sua imersão em água e pela verificação do aumento de massa como uma porcentagem da massa seca. Diversos procedimentos podem ser utilizados e diferentes resultados obtidos para essa propriedade.

Os resultados experimentais, dispostos na Tabela 7, revelam alguns comportamentos semelhantes entre vários autores. Os valores obtidos do percentual de absorção de água para o concreto apresentaram resultados maiores, em razão da granulometria heterogênea dos agregados poliméricos. De acordo com os dados obtidos na literatura, ocorreu um constante aumento dos valores de absorção de água que variaram entre 10% a 114% em relação à amostra de referência. E constatou-se que para a substituição do agregado convencional com mais de 20% pelo agregado de polímero, houve um significativo aumento percentual da absorção de água na matriz na maioria dos estudos. Sendo esta propriedade influenciada pela sua granulometria e consequentemente a variação no teor de ar da matriz. Portanto, deve-se analisar com maior clareza outras características que podem influenciar de forma positiva e que não foram aprofundadas pelos autores, como as variações do teor de água e do cimento da matriz cimentícia.

Tabela 7 – Resultados obtidos na literatura para absorção de água de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Percentual da absorção de água (%)	Acréscimo/Decréscimo (%) (% de resíduo)
Abu-Saleem, et al. (2021)	C	0%/10%/20%	7,23/7,62/7,78	↑10,6 (20%)
Colangelo, et al. (2016)	C	0%/10%/20%/30%	7,1/9,0/10,8/15,2	↑114 (30%)
Gonzalez - Corominas e Etxeberria (2016)	C	0%/20%/50%/100%	1,39/1,76/1,93/2,43	↑74,8 (100%)
Silva, Brito e Veiga (2014)	A	0%/5%/10%/15%	1,34/1,36/1,55/1,48	↑10 (15%)
Ferreira, Brito e Saikia (2012)	C	0%/7,5%/15%	9,68/12,48/7,84	↓19 (15%)
Hannawi, Kamali-Bernanrd e Prince (2010)	A	0%/3%/10%/20%/50%	7,22/7,23/7,56/7,58/8,67	↑20 (50%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 ↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 A – Argamassa e C – Concreto.

Silva, Brito, Veiga (2014) mostraram em sua pesquisa percentuais de substituição do polímero reciclado por agregado natural em 5%, 10% e 15%. Os percentuais de absorção de água tiveram

um aumento de até 10% em relação à amostra de referência. Esse acréscimo é fundamentado pelo fato de quanto maior o teor de vazios, maiores os espaços entre os grãos e assim será maior a absorção da água pela matriz cimentícia.

No estudo de Colangelo, et al. (2016) foram utilizadas variações de até 50% em incorporação de agregado reciclado em substituição pelo agregado miúdo, o que causou um aumento de mais de 100% do percentual de absorção de água no concreto com resíduo em relação à amostra de referência. Em razão da frágil ligação matriz/agregado polimérico, que possui mais poros passíveis de serem preenchidos com água. Abu-Saleem, et al. (2021) observaram que o aumento da taxa de substituição do polímero levou a um aumento na absorção de água e os valores para todas as misturas eram mais elevados do que a mistura controle. Isto pode ser atribuído à ausência de uma forte ligação entre o agregado polimérico e a pasta de cimento no interior da matriz do concreto.

2.3.1.2.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão é definida pelo quanto o material resiste à ação das solicitações, considerada a propriedade mais importante do material para a construção civil (BAUER, 2019). Boucedra, Bederina, Ghernouti (2020) citaram que existem vários fatores que influenciam na diminuição da resistência de compressão: diferença na natureza, no diâmetro do grão, na forma, no estado superficial e no módulo de elasticidade.

Existe a possibilidade de obter-se uma razoável resistência à compressão na produção de concreto com agregado polimérico. Faraj, Sherwani e Daraei (2019) no decorrer da sua pesquisa experimental, compararam a resistência à compressão das amostras que continham agregado reciclado com as amostras de controle, em substituições de 0%,10%,20%,30% e 40% do agregado convencional pelo polimérico. Para a amostra controle com 0% de resíduo, o valor foi de aproximadamente de 83 Mpa, entretanto, para o concreto com o resíduo polimérico incorporado em um percentual para 10%, houve uma redução no valor da resistência à compressão e atingiu uma média de 76 MPa. Já no intervalo entre 20% a 40% de incorporação de resíduo polimérico foi observada uma redução de mais de 26% em relação à amostra controle.

Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021) desenvolveram um estudo sobre as micrografias e estas revelaram claramente, que a relação de diminuição da aderência entre os grânulos de polímero e a matriz de cimento nas interfaces, podem causar a baixa transferência de tensão e

baixos valores de resistência à compressão. Esses registros, especialmente, em misturas de concreto contendo uma grande quantidade de grânulos de polímero reciclado.

Steyn, et al. (2021) investigaram a influência do aumento da incorporação do agregado polimérico na propriedade da resistência à compressão do concreto, curado em 28 dias. Os resultados apresentaram uma redução de até 55% da força compressiva em relação à mistura controle para o teor de incorporação de 30% do agregado polimérico no concreto. Nota-se que a resistência à compressão diminui à medida que o conteúdo de polímero é incorporado, essa relação é atribuída ao maior atrito na interface entre polímero/pasta que anula o efeito de redistribuição da força.

Gonzalez - Corominas e Etxeberria (2016) analisaram percentuais de 0%, 20%, 50% e 100% de resíduo de polímero em substituição ao agregado natural. Avaliaram que a resistência à compressão teve um aumento de 2% para a incorporação de resíduo de até 20%, mas à medida que aumentava o percentual relatou-se uma diminuição de até 11% em relação ao concreto convencional. Esse fato se deve a granulometria desuniforme, já que a resistência à compressão atribuída ao concreto com agregado polimérico é decorrente da união das partículas dos agregados com seus componentes e do preenchimento dos vazios na matriz cimentícia.

Por conseguinte, foram quantificados na Tabela 8 os resultados observados na literatura. Foi constatado que existe uma redução da resistência à compressão (11%-96%) à medida que é feita a incorporação do resíduo polimérico na formulação.

Tabela 8 – Resultados obtidos na literatura para resistência à compressão de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

(Continua)

Autores	Material	Percentual de resíduo	Valores (MPa)*	Acréscimo/Decréscimo Máximo(%) (% de resíduo)
Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021)	C	0%/10%/30%/50%	30/37/27/18	↓40 (50%)
Steyn, et al. (2021)	C	0%/15%/30%	45/30/20	↓55 (30%)
Basha, et al. (2020)	C	0%/25%/50%/75%/100%	46,8/35/26/19/17	↓63,6 (100%)
Boucedra, Bederina e Ghernouti (2020)	C	0%/25%/50%/75%/100%	27/20/14/17/5	↓81 (100%)
Mohammadinia, et al. (2019)	C	0%/10%/20%/30%/40%/50%	57/38/24,8/20/12/5	↓91 (50%)
Algahtani, et al. (2017)	C	0%/25%/50%/75%/100%	31,7/26,5/21/18,9/13,8	↓56 (100%)

Tabela 8 – Resultados obtidos na literatura para resistência à compressão de matrizes cimentícias com agregados poliméricos

Autores	Material	Percentual de resíduo	Valores (MPa)*	(Conclusão)
				Acréscimo/Decréscimo Máximo(%) (% de resíduo)
Coppola, et al. (2016)	A	0%/10%/25%	51,97/32,13/21,02	↓59 (25%)
Gonzalez - Corominas e Etxeberria (2016)	C	0%/20%/50%/100%	100,05/102,42/91,22/89,03	↓11 (100%)
Ramírez-Arreola, et al. (2015)	A	0%/18%/36%/54%/72%/100%	13,44/9,2/7,0/5,2/3,8/1,8	↓86,6 (100%)
Silva, Brito e Veiga (2014)	A	0%/5%/10%/15%	3,75/3,5/2,0/1,7	↓54 (15%)
Lucolano, et al. (2013)	A	0%/10%/15%/20%/25%/35%	5,55/2,86/1,89/1,35/0,84	↓84 (50%)
Silva, Brito e Saikia (2013)	C	0%/7,5%/15%	36,74/24,4/19,7	↓46 (15%)
Ferreira, Brito e Saikia (2012)	C	0%/7,5%/15%	37/30/23	↓37,8 (15%)
Kout, et al. (2009).	C	0%/5%/15%/30%/45%	40,8/37,1/33,2/31,9/21,5	↓96 (45%)
Batayneh, Marie e Asi (2007)	C	0%/5%/10%/15%/20%	34/26/22/17/10	↓70 (20%)

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).

A – Argamassa e C – Concreto.

2.3.1.2.5 Durabilidade

A durabilidade é uma propriedade definida pela capacidade que o material tem em manter as suas propriedades e desempenhar sua função no decorrer do tempo, sendo suscetíveis à ação de agentes agressivos (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020). É um conceito que deve ser entendido em termos relativos, proporcionados pelo conhecimento do comportamento desse material, sujeito à deterioração em maior ou menor grau em face de determinadas situações. Situações essas que podem conduzir ao desenvolvimento progressivo, normalmente lento, de desordens que, em um processo contínuo, podem levar a uma desagregação completa da estrutura (BAUER, 2019).

Existem três fluidos muito importantes para a durabilidade que podem penetrar no concreto: a água, pura ou com íons agressivos, o gás carbônico e o oxigênio. Eles podem se movimentar através do concreto de diferentes formas, mas todo o transporte depende, essencialmente, da estrutura da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2015).

Um dos mecanismos para avaliar a durabilidade da matriz cimentícia é o ensaio da mesma em meio ácido. Wongkvanklom, et al. (2021) concluíram que o uso de material polimérico favorece a diminuição da degradação visual e da perda de massa, por causa do consumo de hidróxido de cálcio na reação pozolânica que impede a formação de gesso, e que desencadeia uma reação entre o polímero e o meio ácido, aumentando o pH circundante e, conseqüentemente, melhorando a resistência ao ataque de ácidos em relação ao concreto convencional.

Apesar dos resultados da durabilidade apresentados por Dulsang, et al. (2016) serem divergentes dos outros autores, o estudo apresentou um mesmo resultado positivo quanto ao aumento na resistência à corrosão do concreto com polímero em ambientes agressivos, devido à presença desse tipo de resíduo. Foi observado na Tabela 9, que outros pesquisadores obtiveram redução expressiva de perda da massa das amostras, entre 2,92% a 47%, em relação à matriz, para o parâmetro de resistência a solução de sulfato de sódio que seguiu as diretrizes normativas da *American Society for Testing Materials* (ASTM C267-20), com percentuais de até 40% de incorporação de agregado polimérico. Logo, os resultados mostraram que a substituição dos agregados convencionais pelo polímero no concreto tem um impacto significativo no aumento da resistência em meio ácido, conseqüentemente, diminuindo a degradação do concreto.

Surendar, et al. (2021) exploraram a relação da durabilidade das amostras em solução de sulfato de sódio com o aumento de resíduos poliméricos na aplicação do concreto. Foram utilizadas cinco substituições de agregado polimérico de 0%, 5%, 10% ,15% e 20%, que foram expostos em solução ácida, e concluíram que houve um aumento na resistência ao ácido, com diminuição da perda de massa de 2,92% para o teor polímero de 10% incorporado na mistura. Esse resultado foi justificado pelo fato dos materiais poliméricos possuírem uma menor porosidade em comparação aos agregados naturais, dificultando a difusão dos agentes químicos no concreto. Diante disso, foi avaliado que os materiais poliméricos podem auxiliar de forma satisfatória na prevenção de reações químicas entre o meio agressivo e o concreto, assim como podem diminuir os custos quanto a manutenção e ajustes, levando a um aumento na vida útil do empreendimento.

Tabela 9 – Resultados obtidos na literatura para durabilidade de matrizes cimentícias com agregados poliméricos em solução de sulfato de sódio

Autores	Material produzido	Percentual de resíduo	Valores de ganho/perda de massa (%)	Concentração de sulfato de sódio	Dias de exposição ao ácido
Wongkvanklom, et al. (2021)	C	0%	↓6,00	1%	28 dias
		20%	↓5,40		
		40%	↓4,30		
Ramakrishnan, et al. (2021)	C	0%	↓59	5%	45 dias
		15%	↓47		
Sá Ribeiro, et al. (2021)	C	0%	↓9,40	5%	28 dias
		10%	↓7,90		
		15%	↓5,50		
Surendar, et al. (2021)	C	0%	↓3,32	3%	28 dias
		5%	↓4,17		
		10%	↓2,92		
		15%	↓8,30		
		20%	↓7,11		
Qu, et al. (2021)	A	0%	↓14,90	5%	84 dias
		1%	↓10,40		
		3%	↓4,10		
		5%	↓5,60		
		0%	↓9,00		
Dulsang, et al. (2016)	C	3%	↑17,40	1%	56 dias
		5%	↑11,20		
		7%	↑8,60		
		10%	↑7,80		

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ decréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 ↑ acréscimo dos valores em relação a amostra de referência (% de resíduo polimérico).
 A – Argamassa e C – Concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância. Os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa têm como objetivo produzir um concreto com agregado reciclado de cola polimérica, em substituição parcial ao agregado graúdo. Na Figura 1, está esquematizada a metodologia utilizada neste estudo.

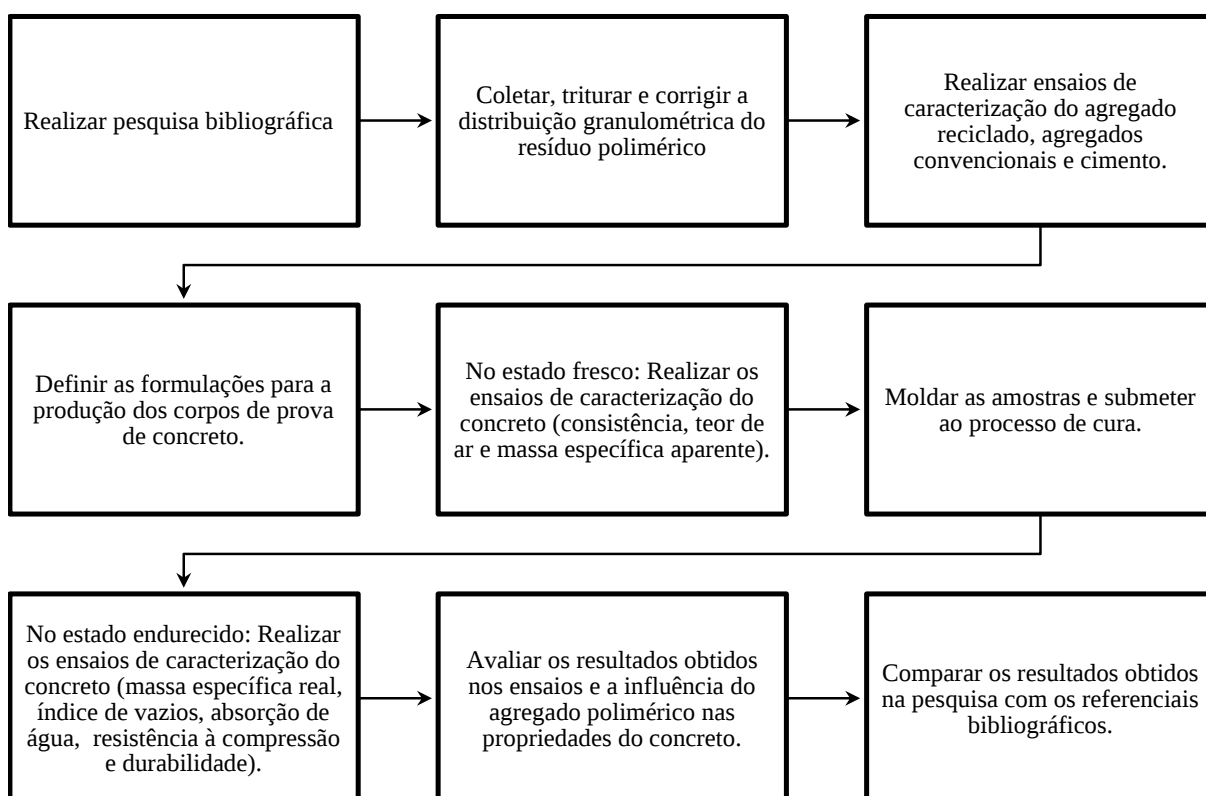


Figura 1 - Fluxograma do roteiro experimental (O autor, 2022).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para produção dos concretos foram caracterizados conforme as normas apresentadas a seguir.

3.1.1 Cimento

O cimento adotado foi o CP II-F-32 (Cimento Portland composto com material carbonático), e para obtenção das suas propriedades físicas e mecânicas, foi ensaiado, seguindo as normas descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Ensaio de caracterização do cimento Portland

Características	Requisitos normativos	Normas adotadas
Índice de finura (%)	$\leq 12,0$	ABNT NBR 11579:2013
Consistência Normal (% de água)	-	ABNT NBR 16606:2018
Início de Pega (min.)	≥ 60	ABNT NBR 16607:2018
Massa Específica (g/cm ³)	-	ABNT NBR 16605:2017
Expansibilidade <i>Le Chatelier</i> a quente (mm)	$\leq 5,0$	ABNT NBR 11582:2016
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	≥ 32	ABNT NBR 7215:2019

Fonte: O autor, 2022.

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção do concreto foi uma areia natural. Essa foi fornecida por uma empresa local no município de Estância/SE. Antes do uso a areia foi seca em estufa a (105±5°C) e armazenada em recipientes fechados, para impedir a absorção de umidade e possíveis impurezas. Os ensaios de caracterização desse agregado miúdo estão apresentados no Quadro 1, de acordo com as condições exigidas pelas normas.

Características	Normas adotadas
Distribuição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Densidade (g/cm ³) e Absorção de água (%)	ABNT NBR 16916:2021
Massa unitária (kg/m ³) e Índice de vazios (%)	ABNT NBR 16972:2021

Quadro 1 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo para produção de concreto (O autor, 2022).

3.1.3 Agregado graúdo convencional

O agregado graúdo utilizado na produção dos corpos de prova foi a brita granítica. Após a coleta, o agregado foi lavado e seco em estufa (105±5°C) para diminuição de impurezas. E posteriormente, foi feita a correção da brita para a faixa de distribuição granulométrica (9,5/25), conforme Tabela 6 da ABNT NBR 7211:2019 – Agregados para concreto – Especificação. Os ensaios de caracterização da brita granítica, foram realizados conforme as normas apresentadas no Quadro 2.

Características	Norma adotadas
Distribuição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Densidade (g/cm ³) e Absorção de água (%)	ABNT NBR 16917:2021
Índice de forma*	ABNT NBR 7809:2019
Perda de massa por abrasão (%)	ABNT NBR 16974:2021
Massa unitária (kg/m ³) e Índice de vazios (%)	ABNT NBR 16972:2021

*- propriedades que não possuem unidade.

Quadro 2 – Ensaio de caracterização do agregado graúdo para produção de concreto (O autor, 2022).

3.1.4 Agregado graúdo polimérico

O agregado graúdo polimérico foi utilizado em substituição ao agregado graúdo convencional, na produção dos concretos tendo origem do resíduo de cola polimérica, base de poliuretano, utilizada na fábrica da FAMOSSUL no município de Estância/SE, para a produção de portas e componentes de madeira. Esse resíduo é adquirido em tonéis, na forma líquida, e como o equipamento não consegue extrair todo o conteúdo do recipiente, geram sobras (840 kg/ano), que são endurecidas e ficam em grandes pedaços, conforme a Figura 2. Foi classificado na Classe II B (Resíduo não perigoso – inerte), de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação.



Figura 2 – Resíduo de cola polimérica retirado da fábrica (O autor, 2022).

Inicialmente foi feita a coleta do resíduo, e então ele foi triturado em duas fases, primeiro no equipamento triturador com malha de aço maior, posteriormente, em malha menor, pertencente à fábrica de reciclagem da Ouro *Plastic* no município de Estância/SE. Por seguinte, foi realizada a correção do agregado reciclado para a faixa de distribuição granulométrica (9,5/25), limites

indicados na Tabela 6 da ABNT NBR 7211:2019. Após essa etapa, o agregado passou pelos ensaios de caracterização, conforme as especificações normativas do Quadro 3.

Características	Normas adotadas
Diâmetro máximo (mm)	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura*	ABNT NBR NM 248:2003
Densidade (g/cm ³)	ABNT NBR 16916:2021
Absorção de água (%)	ABNT NBR 16917:2021
Índice de forma*	ABNT NBR 7809:2019
Perda de massa por abrasão (%)	ABNT NBR 16974:2021
Massa unitária (kg/m ³)	ABNT NBR 16972:2021
Índice de vazios (%)	ABNT NBR 16972:2021

*- propriedades que não possuem unidade.

Quadro 3 – Ensaio de caracterização do agregado graúdo polimérico (O autor, 2022).

3.1.5 Água

A água da mistura foi fornecida pelo sistema autônomo de água e esgoto – SAAE, no município de Estância/SE, conforme ABNT NBR 15900-1:2009 - Água para amassamento do concreto. A água fornecida foi límpida para não influenciar na resistência mecânica do concreto, que é baseada na qualidade e na quantidade de teor de sólidos representados pelos compostos hidratados da massa cimentícia.

3.1.6 Aditivo

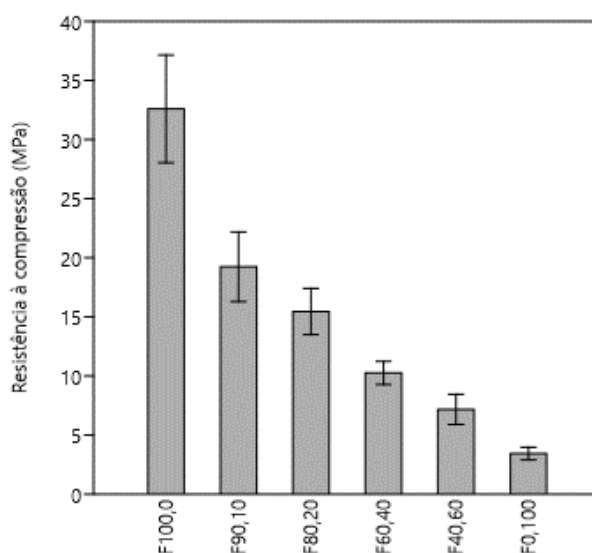
Foi utilizado um aditivo plastificante (*Maximent NT 19*) com o objetivo de proporcionar maior fluidez à mistura para uma menor relação água-cimento. Conforme, as especificações da norma ABNT NBR 11768-1:2019 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos.

3.2 MÉTODOS

O processo de preparação dos corpos de prova, bem como os ensaios de caracterização do concreto com agregado polimérico foram baseados em resultados experimentais relatados na literatura e pelas condições estabelecidas em normas, e serão apresentados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos corpos de prova

Inicialmente, o traço de dosagem do concreto foi definido para uma resistência à compressão de 30 MPa, aos 28 dias. As dosagens foram produzidas em cinco formulações para o concreto, contendo uma amostra de controle com os agregados convencionais e quatro com 10%, 20%, 30% e 40% de incorporação do agregado polimérico. Os percentuais de substituição foram determinados considerando a realização de um estudo prévio, cujos os resultados experimentais estão apresentados na Figura 3, para concretos com agregados reciclados de cola polimérica, da mesma natureza da presente pesquisa. Assim, determinaram-se percentuais de substituição que resultaram em um limite mínimo de resistência à compressão de 10 MPa, valor alcançado para um teor de substituição de 40% de agregado convencional pelo reciclado (Figura 3).



$F_{x,y}$ – Formulação com x% de agregado gráudo natural e y% de agregado reciclado.

Figura 3 – Resultados da resistência à compressão de concretos com agregado reciclado polimérico (Melo, et al., 2022).

Foi determinado o traço de 1:1,76:2,82:0,46 (cimento:agregado; miúdo:agregado; gráudo:água) para o concreto de referência (F100,0), através do método do Instituto Americano do Concreto (ACI) adaptado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e apresentado por RODRIGUES (1998). Para as demais formulações do concreto foi realizada a substituição em volume do agregado convencional pelo polimérico, em 10%, 20%, 30% e 40%. A composição para dosagem em volume por lote de concreto, contendo em cada lote 06 amostras, é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição para dosagem em volume por lote de concreto

Formulação	Cimento (g)	Agregado miúdo (g)	Agregado graúdo natural (g)	Agregado graúdo polimérico (g)	Água (g)	Aditivo (g)
F100,00	4990	8782	14071	0	2295	25
F90,10	4990	8782	12663,9	441	2295	25
F80,20	4990	8782	11257	881	2295	25
F70,30	4990	8782	9850	1322	2295	25
F60,40	4990	8782	8443	1763	2295	25

Fonte: O autor, 2022.

Notas: $F_{x,y}$ – Formulação com x% de agregado graúdo natural (brita) e y% de agregado reciclado (polímero).

A preparação da mistura foi através de uma betoneira, na seguinte ordem: foi adicionado o agregado graúdo no equipamento, adicionando uma parte da água e misturado por um minuto, em seguida, com o equipamento em funcionamento, foram colocados: o cimento, areia e o restante da água (com o aditivo). O tempo total de mistura foi de 5 minutos. Após a realização dos ensaios no estado fresco (consistência, teor de ar e massa específica aparente), foi efetuada a moldagem e cura dos corpos de prova, conforme as prescrições ABNT NBR 5738:2016 - Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Após o desmolde, o concreto passou pelo processo de cura inicial, respeitando o período de 24 horas para os corpos de provas cilíndricos. Então, foi devidamente identificado e armazenado em solução saturada de cal, durante vinte e oito dias.

3.2.2 Ensaios de caracterização do concreto com agregado polimérico

Neste tópico, serão apresentados os ensaios de caracterização do concreto, primeiramente no estado fresco e depois no estado endurecido.

3.2.2.1 Ensaios no estado fresco

Nos tópicos a seguir, serão apresentados e descritos os ensaios realizados no concreto em seu estado fresco.

3.2.2.1.1 Ensaio de consistência

No estado fresco, foi realizado o ensaio de consistência dos corpos de prova, conforme a ABNT NBR 16889:2020 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Esse ensaio consiste no método para determinação da consistência do concreto fresco pela medida de seu assentamento, a partir do preenchimento de um tronco de cone em 3 camadas e cada camada uma aplicação de 25 golpes. O ensaio é ilustrado na Figura 4.



Figura 4 – Medição do índice de consistência (O autor, 2022).

3.2.2.1.2 Ensaio de teor de ar e massa específica aparente

Para o ensaio de teor de ar e massa específica aparente, foi utilizado o método gravimétrico, conforme a ABNT NBR 9833:2009 – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. O ensaio consiste na utilização de um recipiente cilíndrico, que foi preenchido em três camadas, com aplicação de 25 golpes em cada camada e depois realizada a pesagem do recipiente com o concreto nivelado na borda, conforme a Figura 5.



Figura 5 – Ensaio pelo método gravimétrico, a) Determinação da massa do recipiente; b) Determinação da massa do recipiente com o concreto (O autor, 2022).

As equações para o cálculo da massa específica aparente, Equação (1), e do teor de ar, Equação (2), foram:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \times 1000 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ρ_{ap} : é a massa específica aparente do concreto, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

m : é a massa de concreto, expressa em quilogramas (kg);

V : é o volume do recipiente, expresso em decímetros cúbicos (m^3).

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

A : é o teor de ar do concreto, expresso em porcentagem (%).;

I_a : é o índice de ar presente na mistura, conforme item 8.5 da ABNT NBR 9833:2009.

3.2.2.2 Ensaio no estado endurecido

Para a realização dos ensaios do concreto em seu estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com adensamento em quatro camadas, sendo cada uma com 30 golpes uniformes, com auxílio de haste metálica. Para cada formulação foram moldados 18 corpos de prova, sendo seis para o ensaio de absorção de água,

índice de vazios e massa específica real, seis para o ensaio de resistência à compressão e seis para o ensaio de durabilidade.

3.2.2.2.1 Ensaio de massa específica real, índice de vazios e absorção de água

A ABNT NBR 9778:2009 determina os procedimentos para o ensaio da massa específica real, índice de vazios e absorção de água. Após 28 dias de cura, seis amostras de cada formulação foram colocadas em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período de 72h. Posteriormente, foram submersas em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por mais 72h. Completada a etapa de saturação, as amostras foram dispostas em um recipiente com água, que foi progressivamente levada à ebulição, por um período de 5 h. Após essa etapa, foi feita a pesagem das amostras na balança hidrostática e retirada a amostra para o registro da massa saturada em balança convencional, conforme a Figura 6 que apresenta todas as etapas do ensaio.



Figura 6 – Etapas do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real, a) Amostras em estufa; b) Determinação da massa seca em estufa; c) Amostras submersas em água; d) Processo de ebulição da água com as amostras; e) Determinação da massa da amostra saturada imersa em água, após fervura (O autor, 2022).

A determinação das massas em cada etapa possibilita o cálculo da absorção de água, conforme Equação (3), do índice de vazios, conforme Equação (4), e da massa específica real, conforme Equação (5).

$$A = \frac{M_{sat}-M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

$$I_v = \frac{M_{sat}-M_s}{M_{sat}-M_i} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s-M_i} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

A : representa a absorção de água, expressa em porcentagem;

M_{sat} : representa massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

M_s : representa massa da amostra seca em estufa;

I_v : representa o índice de vazios, expresso em porcentagem;

M_i : representa a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

ρ_r : representa a massa específica real, expressa em porcentagem;

3.2.2.2.2 Ensaio de resistência à compressão

No estado endurecido foi determinada a resistência à compressão dos concretos produzidos. Assim, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, segundo a ABNT NBR 5739:2018 – Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos. Os corpos de prova foram rotulados, desmoldados com 24 horas e colocados no processo de cura por imersão em água, onde permaneceram até a idade de 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 5738: 2016 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Posteriormente, foram rompidos os corpos de prova, através do equipamento da prensa hidráulica Pavitest HD-200T, conforme a Figura 7.



Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão com a prensa hidráulica, após rompimento da amostra (O autor, 2022).

3.2.2.2.3 Ensaio de durabilidade

O ensaio da durabilidade foi realizado pelo método de teste da *American Society for Testing Materials* - ASTM C267-20:2020, que se destina a avaliar a resistência química do concreto com material polimérico. Os parâmetros avaliados neste ensaio foram a variação da massa e aspectos das amostras, como formação de fissuras e mudança de coloração.

De acordo com a ASTM C 267-20: 2020, o diâmetro do cilindro deve ser no mínimo quatro vezes o diâmetro máximo do agregado da mistura. Assim, foram moldados seis corpos de provas cilíndricos para cada formulação. Posteriormente, as amostras passaram por cura de 28 dias em água saturada com cal. Após o período de cura, as amostras foram condicionadas no recipiente com concentração de 100 gramas de sulfato de sódio (Na_2SO_4), para 800 mL de água destilada, adicionada a quantidade suplementar até obter 1 litro de solução, que foi preparada no dia anterior e o valor do pH medido entre 6,0 e 8,0, em temperatura ambiente, até a idade final de 56 dias, conforme Figura 8 (adaptação da ABNT NBR 13583:2014 - Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio).

Posteriormente, as amostras foram retiradas e lavadas com água corrente para eliminar qualquer resíduo ou impureza, deixando-as descansar na posição do seu lado mais curvo durante um período de 30 minutos. Em seguida, foi realizada a leitura da massa, o registro da cor e do aspecto superficial das amostras, antes da imersão dos corpos de prova em meio ácido e nas idades: 1, 7, 14, 28, 56 e 84 dias de imersão na solução agressiva. Nas idades de 28 dias e 84 dias, as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão.



Figura 8 – Ensaio de durabilidade com amostras em solução de sulfato de sódio (O autor, 2022).

A solução foi considerada agressiva de acordo com a classificação da Tabela 04 da ABNT NBR 12655:2022 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, para composição e controle tecnológico do concreto fresco e endurecido em condições de agentes agressivos.

Dessa forma, a variação de massa indicará se o material sofrerá com ataques químicos durante sua vida útil, assim como a formação de fissuras superficiais, perda de brilho, descoloração média e formação de sedimentos determinarão se o ataque foi progressivo ou não para esse tipo de concreto com agregado polimérico.

3.2.3 Tratamento e análise dos dados

Os dados coletados nos ensaios de caracterização dos concretos foram apresentados considerando a média aritmética das amostras, por formulação, seguida do desvio padrão. Para avaliação dos resultados obtidos nos ensaios, apurou-se a normalidade dos dados e, assim, foi realizada uma análise estatística por meio do ANOVA (metodologia de análise de variância), através do PAST (software *Paleontological Statistics*), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que, ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do Teste de Tukey que avalia entre quais formulações existe diferença significativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados, tanto dos materiais componentes estudados nesta pesquisa quanto dos concretos produzidos com estes.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES

Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais componentes empregados nesse estudo para a produção dos concretos.

4.1.1 Cimento Portland

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do cimento Portland CII F-32 estão representados na Tabela 12. Os valores dos ensaios de caracterização do cimento, atenderam aos requisitos mínimos especificados pela ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland – Requisitos.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland

Características	Resultados	Requisitos normativos	Normas adotadas
Índice de finura (%)	5,4	$\leq 12,0$	ABNT NBR 11579:2013
Consistência Normal (% de água)	30	-	ABNT NBR 16606:2018
Início de Pega (min.)	144	≥ 60	ABNT NBR 16607:2018
Massa Específica (g/cm ³)	3,08	-	ABNT NBR 16605:2017
Expansibilidade <i>Le Chatelier</i> a quente (mm)	1,20*	$\leq 5,0$	ABNT NBR 11582:2016
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	36,73*	≥ 32	ABNT NBR 7215:2019

Fonte: O autor, 2022.

Notas: * – Dados fornecidos pelo fabricante.

Na Tabela 13 estão apresentados os percentuais dos compostos químicos presentes nesse tipo de cimento, os dados obtidos foram fornecidos pelo fabricante. Os requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018 quando comparados com os resultados, mostraram-se satisfatórios e dentro dos parâmetros normativos.

Tabela 13 – Composição química do CP II F-32

Composto	Percentual (%)	Requisitos normativos
Perda ao fogo (PF)	10,47	$\leq 12,5$
Resíduo insolúvel (RI)	3,82	$\leq 7,5$
Trióxido de enxofre (SO_3)	3,12	$\leq 4,50$
Óxido de cálcio (CaO)	58,42	-

Fonte: O autor, 2022.

4.1.2 Agregado miúdo

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do agregado miúdo estão representados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Diâmetro máximo	mm	2,36
Módulo de finura	-	2,17
Densidade	g/cm ³	2,67
Absorção de água	%	0,5
Massa unitária	----	----
<i>Estado Solto</i>	kg/m ³	1573
<i>Estado Compactado</i>	kg/m ³	1702
Índice de vazios	----	----
<i>Solta</i>	%	41
<i>Compactada</i>	%	36

Fonte: O autor, 2022.

A curva granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Figura 9, que foi utilizada nesta pesquisa. A granulometria dos grãos é de grande relevância quanto a coesão das partículas com a pasta e o desempenho do concreto. Nota-se, pelo comportamento da curva na Figura 9, que o agregado tem uma distribuição granulométrica bem graduada de acordo com a Tabela 2 da NBR 7211:2019. Como também, conforme esta norma, o módulo de finura do agregado miúdo se encontra na zona utilizável inferior que varia de 1,55 a 2,20.

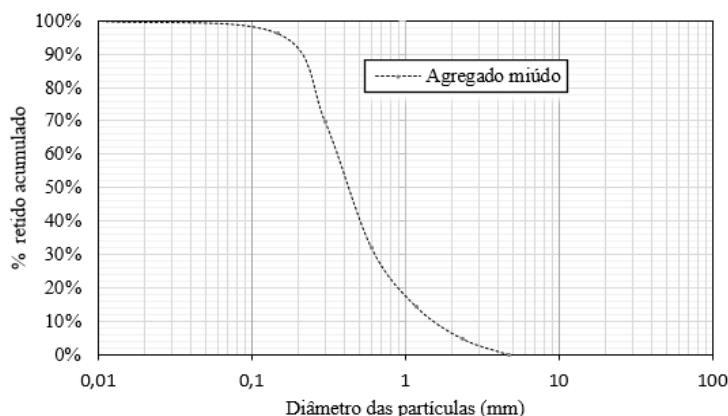


Figura 9 – Curva granulométrica do agregado miúdo (O autor, 2022).

4.1.3 Agregado graúdo convencional

Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do agregado graúdo convencional. A densidade encontrada foi de 2610 Kg/m³ e, portanto, de acordo com a norma ABNT NBR 12655:2022 é classificado como agregado normal ($\leq 3000 \text{ Kg/m}^3$).

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo convencional

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Densidade (g/cm ³)	g/cm ³	2,61
Absorção de água (%)	%	0,4
Módulo de finura	-	6,93
Índice de forma	-	2,87
Perda de massa por abrasão(%)	%	28,4
Diâmetro máximo	mm	19
Massa unitária	----	----
<i>Solta</i>	kg/m ³	1430
<i>Compactada</i>	kg/m ³	1443
Índice de vazios	----	----
<i>Solta</i>	%	45
<i>Compactada</i>	%	45

Fonte: O autor, 2022.

Neste estudo, a curva granulométrica do agregado graúdo convencional está apresentada na Figura 10. Os agregados com a granulometria correta proporcionam melhor adensamento do concreto, permitindo uma maior coesão entre os grãos. Assim, percebe-se uma distribuição bem graduada (Figura 10) do agregado graúdo convencional. E conforme a Tabela 6 da NBR

7211:2019, a distribuição granulométrica se encontra numa faixa de 9,5/25. Portanto, os resultados obtidos nesse ensaio foram condizentes com os requisitos estabelecidos pelas normas no Quadro 2.

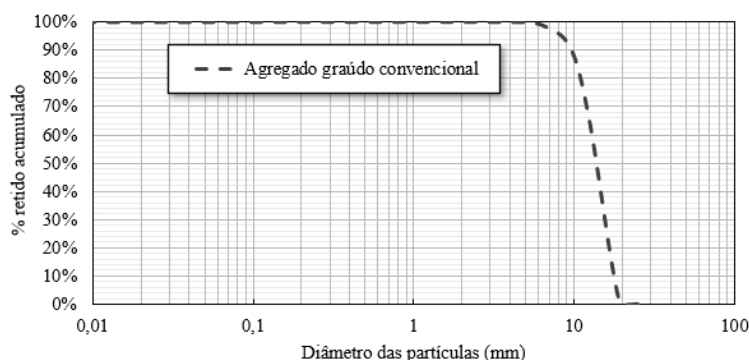


Figura 10 – Curva granulométrica do agregado graúdo convencional (O autor, 2022).

4.1.4 Agregado graúdo polimérico

Para obtenção da caracterização do material, foram avaliadas as suas características físicas e químicas, que são apresentadas na Tabela 16. Os dados foram obtidos pelo fabricante e observou-se que o agregado polimérico apresenta insolubilidade na presença de água, o que faz com que esse material tenha potencial para aumentar a resistência ao ataque de íons e ácidos, já que diminui a penetração de agentes agressivos no interior da matriz cimentícia (SÁ RIBEIRO, et al., 2021).

Tabela 16 – Propriedades físicas e químicas do agregado polimérico

Informações gerais	
Nome comercial	<i>Jowatherm Reaktant</i> 605.20
Forma	Sólido
Cor	Amarelo
Ponto de fusão	Não classificado
Ponto de ebulição	Não classificado
Ponto de inflamação	$\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura de ignição	$341\text{ }^{\circ}\text{C}$
Densidade em $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1,17\text{ g/cm}^3$
Solubilidade em/ miscibilidade com água	insolúvel
Porcentagem de solventes orgânicos	0,0%
Tipo de polímero	poliuretano

Fonte: Adaptado de Jowat SE, 2022.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo polimérico. Destaca-se que a absorção do agregado reciclado foi de 0%, esse comportamento já era esperado, considerando a natureza hidrofóbica do polímero. A massa específica do agregado polimérico encontrada foi de 1080 kg/m³ e, portanto, de acordo com ABNT NBR 12655:2022 é classificado como agregado leve (≤ 2000 kg/m³).

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo polimérico

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Densidade (g/cm ³)	g/cm ³	1,08
Absorção de água (%)	%	0
Módulo de finura	-	6,93
Índice de forma	-	2,50
Perda de massa por abrasão(%)	%	0
Diâmetro máximo	mm	19
Massa unitária	----	----
<i>Solta</i>	kg/m ³	423
<i>Compactada</i>	kg/m ³	490
Índice de vazios	----	----
<i>Solta</i>	%	61
<i>Compactada</i>	%	54

Fonte: O autor, 2022.

A curva granulométrica do agregado graúdo polimérico foi a mesma representada pela Figura 10, com uma distribuição contínua, numa faixa de 9,5/25 (9,5/25), conforme a Tabela 6 da NBR 7211:2019. Ressalta-se que o agregado graúdo polimérico possuía a mesma composição granulométrica que o agregado natural convencional.

Em relação à massa unitária, em comparação com o agregado convencional, esta apresentou uma redução em torno de 70%. O índice de forma do agregado reciclado obtido no ensaio foi de 2,50, e assim como o agregado convencional, esse valor está de acordo com o estabelecido na ABNT NBR 12655:2022, cujo valor limite não deve ser superior a 3. O percentual de perda de massa por abrasão do agregado polimérico foi de 0%, o que já era previsto considerando a natureza do material (polimérico) e a ABNT NBR 7211:2019 estabelece que a perda de massa por abrasão deve ser menor que 50%. Registra-se um aumento de até 35% no índice de vazios do agregado reciclado polimérico, em relação ao convencional. De acordo com Roque-Silva (2020) esse comportamento é justificado em função da morfologia extremamente heterogênea

do material e sua tendência hidrofóbica, ou seja, fibras ou agregados poliméricos que permitem um menor preenchimento dos vazios na matriz cimentícia.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Neste tópico serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades dos concretos tanto no estado fresco quanto no endurecido.

4.2.1 Ensaios para caracterização das propriedades dos concretos no estado fresco

Nesse tópico serão abordados os resultados e discussões das propriedades do concreto no seu estado fresco.

4.2.1.1 Ensaio de consistência

Na Figura 11 são apresentados os resultados médios dos valores de consistência obtidos nos ensaios realizados com as amostras de concreto com substituição parcial da brita pelo agregado de cola polimérica.

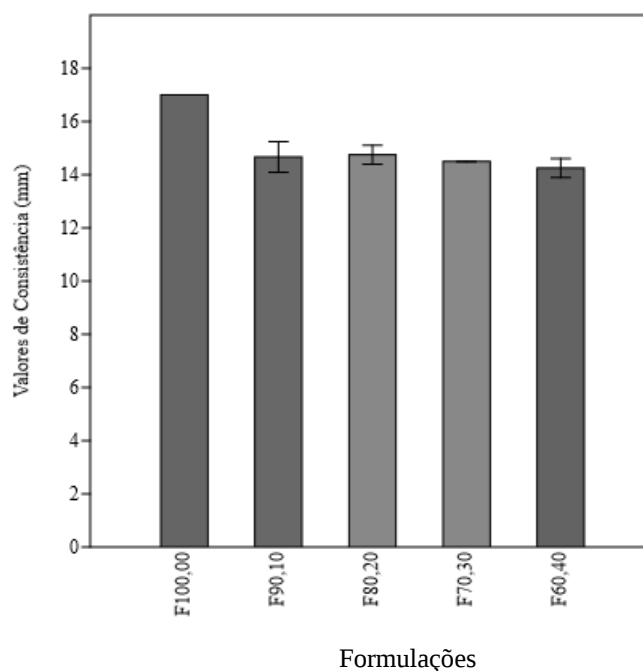


Figura 11 – Resultados dos valores de consistência do concreto (O autor, 2022).

Para constatar se existe influência significativa nos valores da consistência nas amostras de concreto, sem e com agregado de cola polimérica, foi realizada a análise de variância ($F=13,375$; f crítico=5,19 e valor $p=7,019 \times 10^{-3}$), seguida do teste de Tukey e verificou-se diferenças significativas entre as médias.

Dentre essas diferenças, foi observado uma diminuição da consistência para todas as formulações com incorporação do agregado de cola polimérica, quando comparadas à composição de referência, sendo essa redução, entre as médias, de 13,70%, 13,24%, 14,71% e 16,18%, respectivamente, para o F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 em relação ao F100,00. As amostras não apresentaram variações significativas entre as suas formulações, apenas em relação à referência. Logo, isso implica numa tendência à constância dos valores de consistência com a incorporação dos resíduos até 40%.

Sendo assim, todas as amostras apresentaram redução, entre 13,24% – 16,18%, do valor de consistência quando comparadas à amostra de referência. Portanto, é possível constatar que a substituição do agregado gráúdo natural pelo agregado reciclado presente nas amostras de concreto influenciou diretamente na diminuição desta propriedade. Rukavina, et al. (2021) justifica que existe uma grande influência do formato dos grãos e também a natureza hidrofóbica do polímero, que dificulta a coesão entre as partículas da mistura. A reduzida variação deve-se à utilização de superplastificantes (aditivos) que conseguem manter uma consistência semelhante à amostra controle.

4.2.1.2 Ensaio de teor de ar

Serão apresentados na Figura 12, os resultados dos valores do teor de ar obtidos nos ensaios realizados com as amostras de concreto.

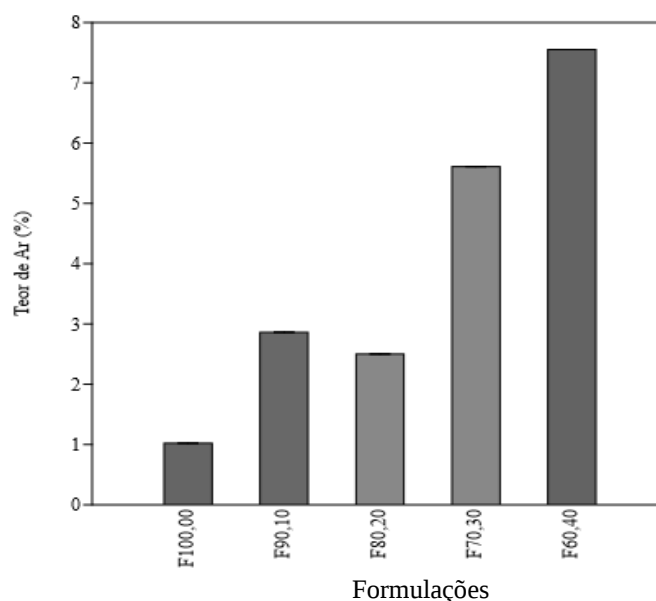


Figura 12 – Resultados do teor de ar dos concretos (O autor, 2022).

O resultado do teor de ar das amostras não se aplica à análise do teste de variância, considerando uma única determinação. Entretanto, percebe-se um aumento do teor de ar para todas as formulações com incorporação do agregado de cola polimérica, quando comparadas à composição de referência, sendo um aumento expressivo, de 180,39%, 145,10%, 450% e 640,20%, respectivamente, para o F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 em relação ao F100,00.

Observa-se que na mesma proporção que o agregado de cola polimérica é incorporado, ocorre um aumento gradual do teor de ar entre as formulações. Onde a amostra F60,40 apresentou um acréscimo de 163,99%, 202% e 34,58% em relação a F90,10, F80,20 e F70,30, já a amostra F70,30 mostrou um aumento em 96,15% e 124,40% em relação às amostras F90,10 e F80,20, respectivamente. Entretanto, a amostra F80,20 em comparação a F90,10 apresentaram valores aproximados.

As amostras apresentaram variações entre as suas formulações, como também quando comparadas à amostra de referência. Estes resultados estão em concordância com os estudos de Roque-Silva (2020) e Jacob-Vaillancourt e Sorelli (2018) que atribuem esse aumento ao fato de os grãos poliméricos terem menor massa específica e uma superfície mais rugosa com arestas mais irregulares, além de sua natureza hidrofóbica, provocando um aumento na formação de bolhas de ar na superfície polimérica, que são incorporadas à matriz cimentícia.

Portanto, existe uma proporção entre o aumento do teor de ar com a incorporação dos resíduos; assim é possível constatar, considerando a análise de uma única determinação, que a substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado presente nas amostras de concreto influenciou diretamente no aumento desta propriedade. O resultado está consoante com o índice de vazios mensurado na caracterização do agregado, exposto na Tabela 17.

4.2.1.3 *Ensaio de massa específica aparente*

Na Figura 13 estão plotados os resultados médios de massa específica aparente, obtidos nos ensaios realizados com os concretos.

Com o propósito de constatar se a substituição do agregado de cola polimérica pelo agregado gráudo no concreto exercia influência significativa nos resultados da massa específica aparente, foi realizada a análise de variância ($F=25,20$; f crítico= 3,48 e valor $p= 3,32 \times 10^{-5}$) e através do teste de Tukey notou-se diferenças significativas entre as médias.

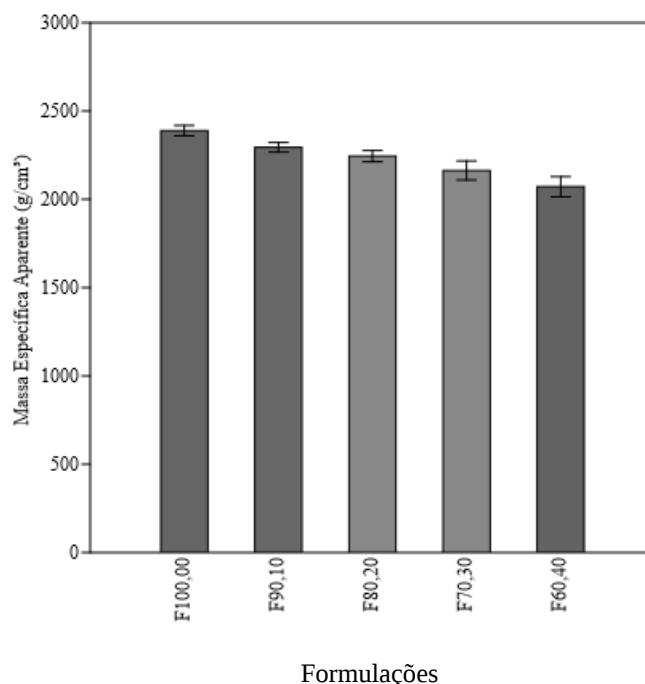


Figura 13 – Resultados de massa específica aparente dos concretos (O autor, 2022).

Entre essas diferenças, foi observado uma redução da massa específica aparente com a incorporação do agregado polimérico, quando comparada à composição de referência, sendo essa redução, entre as médias, de 4%, 6%, 9,5% e 13%, respectivamente, para o F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 em relação ao F100,00.

Constata-se que, à medida que se aumenta o teor de substituição do polímero pela brita, ocorre uma redução gradual dos valores de massa específica aparente. As amostras F80,20, F70,30 e F60,40 apresentaram diminuição de 2,17%, 5,75% e 9,73% em relação a F90,10, respectivamente, já em comparação ao F80,20 houve uma redução de 3,66% para F70,30 e 7,73% para F60,40. Sendo observado entre as amostras F70,30 e F60,40 uma redução de 4,23%.

Verifica-se que as amostras apresentaram uma frequente diminuição, entre 4% – 13%, da massa específica aparente quando comparadas à amostra de referência. Esse comportamento é atribuído à morfologia do material polimérico, sendo um material que contém na sua composição cadeias de carbonos que o tornam mais leve em comparação aos agregados convencionais na produção do concreto (ISLAM; SHAHJALAL, 2021).

Percebe-se a influência direta entre a substituição do polímero na mistura e a redução da massa específica aparente do concreto. Esse comportamento, corroborando com a justificativa dos autores, deve-se ao fato da densidade do polímero ser menor em comparação com a brita, sendo essa no valor de 1,08 g/cm³ (Tabela 17) e está no valor de 2,61 g/cm³ (Tabela 15), com uma

diminuição em torno de 58% em comparação a densidade do agregado graúdo natural, o que favorece um decréscimo da massa específica aparente da mistura.

4.2.2 Ensaios para caracterização das propriedades dos concretos no estado endurecido

Nesse tópico serão abordados os resultados e discussões das propriedades do concreto no seu estado endurecido.

4.2.2.1 Ensaio de massa específica real

Na Figura 14 são apresentados os resultados médios de massa específica real obtidos nos ensaios realizados com os concretos.

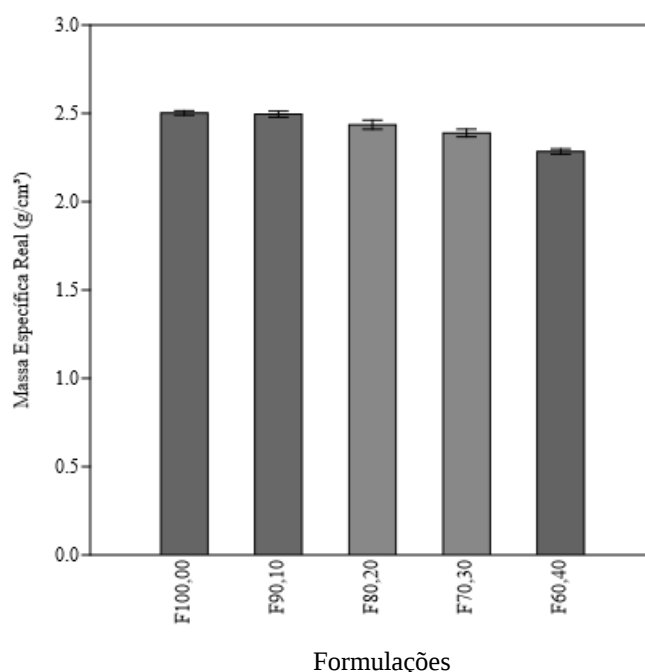


Figura 14 – Resultados da massa específica real dos concretos (O autor, 2022).

A partir da análise da Figura 14, percebe-se uma diferença dos resultados da massa específica real do concreto. Por meio da análise de variância ($F=88,86$, f crítico= 3,06 e valor $p=2,94 \times 10^{-10}$) e em seguida pelo teste de Tukey.

Entre as diferenças observadas dos resultados, nota-se que a incorporação da cola polimérica como agregado graúdo reciclado reduziu a massa específica real do concreto. As amostras F80,20, F70,30 e F60,40 apresentaram redução em relação à amostra de referência (F100,00), de 2,67%, 4,53% e 8,71%, respectivamente. No entanto, para a formulação F90,10 não houve uma variação significativa em relação à amostra controle (F100,00). A amostra F60,40 apresentou a maior redução da massa específica real em relação à amostra de referência, sendo

um valor de 2,50 g/cm³ para a amostra de referência (F100,00) e 2,28 g/cm³ de massa específica real para a amostra F60,40.

Constata-se que conforme o agregado graúdo convencional (brita) é substituído pelo agregado reciclado de cola polimérica nas amostras de concreto, ocorre um decréscimo progressivo entre as formulações em relação aos valores médios de massa específica real. As amostras F80,20, F70,30 e F60,40 apresentaram diminuição de 2,42%, 4,28% e 8,48% em relação a F90,10, respectivamente, já em comparação ao F80,20 houve uma redução de 1,91% para F70,30 e 6,21% para F60,40. E para F70,30 houve uma redução de 4,39% em comparação com a amostra F60,40.

As amostras apresentaram um frequente decréscimo, entre 2,67% – 8,71%, da massa específica real quando comparadas à amostra de referência. Esse comportamento é consoante com os estudos de Kangavar, et al. (2022), que determinaram uma redução em torno de 12% da massa específica real do concreto para taxa de substituição de 30% de agregado convencional pelo agregado polimérico na mistura, em comparação a amostra controle. Assim como para massa específica aparente, Hameed e Ahmed (2019) justificam essa redução de massa específica real, a uma densidade mais leve dos polímeros em comparação aos agregados convencionais. Logo, compreende-se que existe uma influência direta entre o aumento da incorporação do polímero e a redução da massa específica real do concreto.

4.2.2.2 *Ensaio de índice de vazios*

Na Figura 15 são apresentados os resultados médios do índice de vazios, obtidos nos ensaios realizados com as amostras de concreto.

Os resultados obtidos do índice de vazios foram comparados, por meio da análise de variância ($F=49,76$; f crítico=2,80 e valor $p= 5,367 \times 10^{-11}$) e teste de Tukey. Notou-se diferença significativa entre as médias.

Verifica-se uma variação do índice de vazios das amostras com agregado de cola polimérica em relação às amostras de referências. As amostras F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 em comparação à amostra de referência (F100,00) apresentaram um aumento do índice de vazios, de 13,92%, 22,93%, 31,44% e 25,33%, respectivamente.

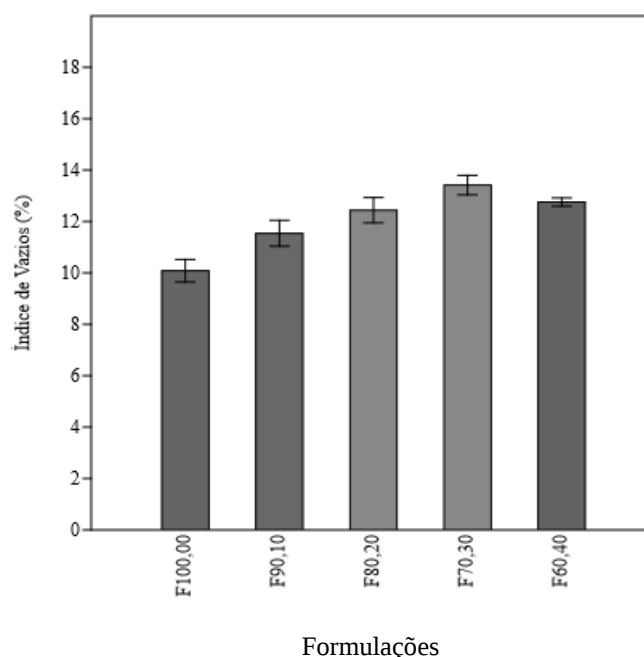


Figura 15 – Resultados do índice de vazios dos concretos (O autor, 2022).

Assim como também constatou-se um aumento do índice de vazios entre as formulações a medida que o agregado de cola polimérica no concreto foi incorporado. A amostra F70,30 apresentou um acréscimo significativo de 15,38% em relação a F90,10, já as formulações F80,20 e F60,40 mostraram um aumento de 7,91% e 10,01%, respectivamente, quando comparadas a F90,10. No entanto, para a formulação F60,40 houve um decréscimo de 4,65% em comparação ao F70,30.

Percebe-se que a incorporação do agregado de cola polimérica em substituição à brita, influencia diretamente no aumento do índice de vazios. Roque-Silva (2020) atribui esse comportamento ao enfraquecimento da zona de transição na interface (ZTI), que representa uma pequena região próxima às partículas dos agregados graúdos e a pasta de cimento. A ZTI fica mais porosa e sem coesão em diversos pontos, contribuindo para espaços vazios significativos.

4.2.2.3 Ensaio de absorção de água

Na Figura 16 é possível observar os resultados médios obtidos através dos ensaios de absorção de água realizados com os concretos. Os dados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ($F=5091$; f crítico= 3,48 e valor $p= 1,71 \times 10^{-16}$) e pelo teste de Tukey as seguintes diferenças foram pontuadas.

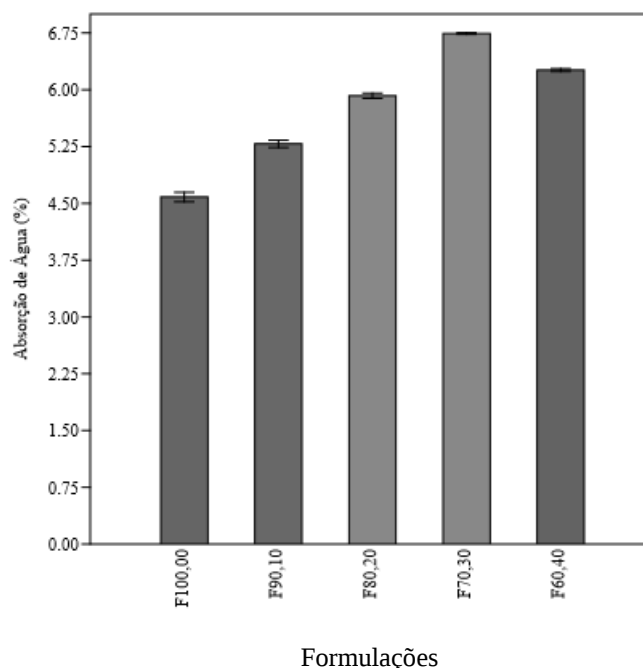


Figura 16 – Resultados da absorção de água dos concretos (O autor, 2022).

Observa-se que houve um acréscimo na absorção de água dos concretos à medida que o agregado natural foi substituído pelo agregado de cola polimérica. As formulações F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 apresentaram aumento expressivo em relação à amostra de referência (F100,00), de 15,35%, 29,16%, 47,13% e 36,58%, respectivamente.

As amostras F80,20, F70,30 e F60,40 obtiveram um acréscimo da absorção de água de 11,98%, 27,55% e 18,41%, respectivamente. Como também, a F70,30 em comparação com a amostra F80,20 teve um aumento da absorção de água de 13,91% e a amostra F60,40 de 5,74% em relação ao F80,20.

Foi visto que as amostras apresentaram um frequente aumento, entre 15,35% – 47,13%, de absorção de água quando comparadas à amostra de referência. Resultados semelhantes foram encontrados por Colangelo, et al. (2016) que analisaram um significativo aumento percentual da absorção de água na matriz, podendo chegar em até 114% em relação à amostra controle para substituição do agregado convencional com mais de 20% pelo agregado de polímero. E o mesmo comportamento foi observado por Abu-Saleem, et al. (2021), onde os valores para todas as formulações eram mais elevados do que a mistura controle. Logo, justificaram que o acréscimo da absorção de água na mistura, seria pela ausência de uma forte ligação entre o agregado polimérico e a pasta de cimento no interior da matriz do concreto, possibilitando que mais poros sejam passíveis de serem preenchidos com água.

A variação do teor de agregado de cola polimérica em substituição à brita influencia diretamente na variação da absorção de água e deve-se ao fato do polímero apresentar um aumento de vazios no concreto, já que a absorção do agregado polimérico foi de 0% (Tabela 17), promovendo uma maior absorção da quantidade de água pela mistura. Silva, Brito, Veiga (2014) explicam esse acréscimo pelo formato irregular dos grãos dos polímeros que permitem um aumento no teor de ar, consequentemente, possibilitando maiores espaços entre os grãos e assim maior taxa de absorção da água pelo concreto. Logo, percebe-se que existe uma correlação direta entre a propriedade de teor de ar com a absorção de água no concreto.

4.2.2.4 Ensaio de resistência à compressão

Na Figura 17 estão os resultados médios da resistência à compressão, aos 28 dias, obtidos nos ensaios realizados com os concretos.

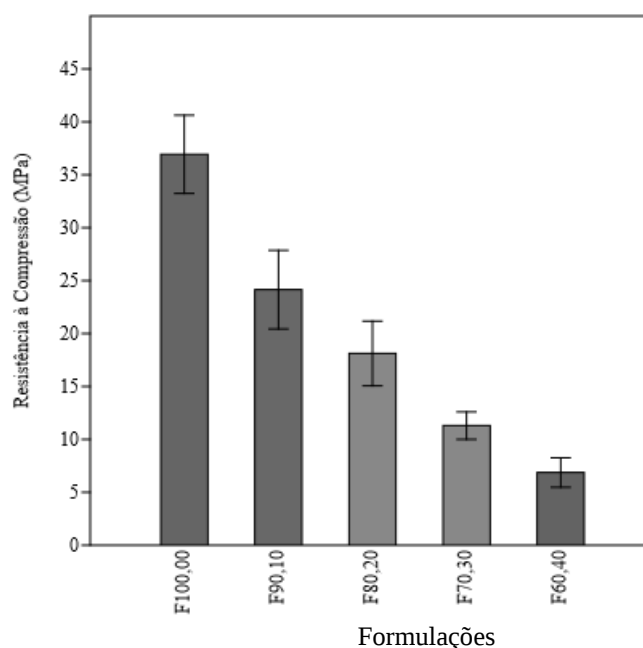


Figura 17 – Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias (O autor, 2022).

Para cada formulação os resultados foram comparados por meio da análise de variância ($F=87,82$; f crítico=2,80 e valor-p $1,38 \times 10^{-13}$); e teste de Tukey. Diferenças significativas entre as médias foram notadas e estão descritas a seguir:

Observa-se uma variação nos valores de resistência à compressão das amostras com agregado de cola polimérica em comparação a referência. As amostras F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40, quando comparadas à composição de referência, apresentam um decréscimo significativo da resistência à compressão de 34,60%, 50,90%, 69,40% e 81,40%, respectivamente.

Verifica-se que com o aumento do teor de cola polimérica na mistura, há redução da resistência à compressão. A amostra F 80,20 apresentou diminuição significativa de 24,97% em relação a F90,10; já as formulações F60,40 e F70,30 mostraram uma redução de 53,20% e 71,55%, respectivamente, quando comparadas a F90,10. Para a formulação F60,40 houve um decréscimo de 39,20% em comparação ao F70,30. Esse efeito de diminuição da resistência à compressão é proporcional ao aumento da incorporação do agregado polimérico nas amostras e deve-se ao fato do aumento de vazios no concreto, uma vez que 5% de vazios implicam na redução de 30%, e até mesmo 2% de vazios podem resultar em uma diminuição da resistência superior a 10% (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

Todas as amostras com mistura contendo agregado de cola polimérica apresentaram redução da resistência à compressão, quando comparadas à amostra de referência, evidenciando o F60,40, que registrou o maior índice de decréscimo, sendo este de 81,40%. Steyn, et al. (2021) e Mohammadinia, et al. (2019) estudaram as micrografias e justificaram esse comportamento pela redução da resistência de aderência nas interfaces entre os grânulos de polímero e a matriz de cimento, que pode ter resultado na baixa transferência de esforços e, consequentemente, baixos valores de resistência à compressão registrados especialmente em misturas de concreto contendo uma grande quantidade de grânulos poliméricos. Além disso, a resistência mecânica dos polímeros é bem menor do que a do agregado de rocha granítica.

Assim, constata-se que todas as amostras contendo percentual a partir de 10% de agregado polimérico, registraram uma redução em seus valores de resistência com o aumento do teor de polímero. No entanto, Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2021) propuseram uma melhora nessa propriedade para a incorporação do polímero no concreto em até 10% em relação à formulação de referência, sendo feito o estudo pela adição de aditivos superplastificantes e diferentes relações de água/cimento para alcançar um aumento dessa propriedade.

4.2.2.5 Ensaio de durabilidade

Na Figura 18, Tabela 18 e Quadro 4, serão apresentadas as análises de variação de massa, cor e aspecto visual para todas as amostras de concreto deste estudo. De forma geral é possível identificar possíveis ganhos ou perdas de massa, alteração da cor padrão para tons mais esbranquiçados, aparecimento de fissuras e desgastes causados pela reação entre as amostras e o meio agressivo.

4.2.2.5.1 Variação da massa

Na Figura 18 são apresentados os resultados de variação da média das massas de 06 amostras de cada formulação do concreto para o ensaio em meio ácido. Percebe-se que até os 28 dias não foi perceptível uma variação da massa para todas as formulações, porém após esse período houve uma redução desses valores. Assim, analisou-se as variações entre as massas das amostras em relação ao primeiro dia de exposição e após o período de 7, 14, 28 e 56 dias em solução de Sulfato de sódio (Na_2SO_4).

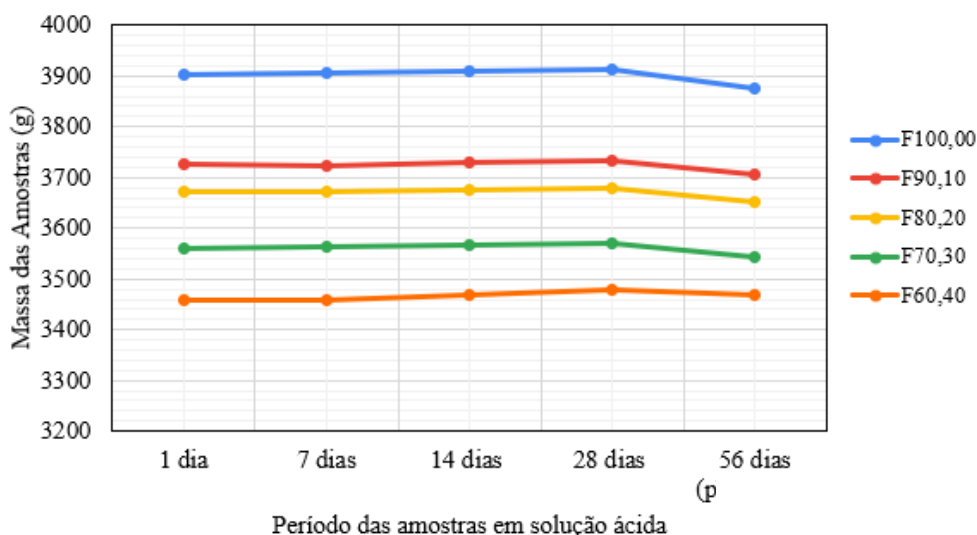


Figura 18 – Resultados da variação de massa das amostras em solução de sulfato de sódio (O autor, 2022).

Observa-se que a formulação F60,40, foi a que obteve menor perda de massa aos 56 dias em solução de Na_2SO_4 , conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Percentuais de variação da massa das amostras em solução de sulfato de sódio

Dias de imersão	Ganho/perda de massa das amostras em comparação a 1 dia de exposição a solução de sulfato de sódio (%)				
	F100,00	F90,10	F80,20	F70,30	F60,40
7	↑0,06	↓0,02	↑0,05	↑0,05	0
14	↑0,21	↑0,13	↑0,14	↑0,16	↑0,36
28	↑0,23	↑0,22	↑0,23	↑0,21	↑0,65
56	↓0,66	↓0,54	↓0,59	↓0,51	↓0,39
σ (desvio padrão)	0,26	0,22	0,24	0,20	0,27

Fonte: O autor, 2022.

Notas: ↓ perda de massa em relação a 1 dia de exposição das amostras em solução agressiva.

↑ ganho de massa em relação a 1 dia de exposição das amostras em solução agressiva.

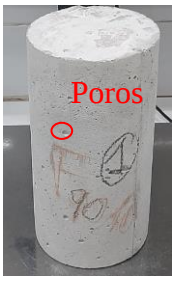
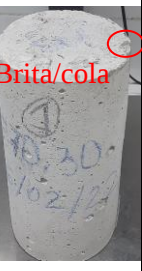
Além disso, as amostras F90,10, F80,20 e F70,30 obtiveram uma perda de massa menos significativa em comparação a amostra de referência (F100,00) nesse mesmo período. Também, verifica-se pela Figura 18 que houve uma alteração do pH (Potencial hidrogeniônico) da solução, começando com pH neutro e passando para uma solução alcalina (pH=11) aos 56 dias. Esse comportamento é justificado por Wongkvanklom, et al. (2021) pela microestrutura do agregado polimérico na matriz cimentícia ter a capacidade de reagir com a solução ácida em torno do concreto, aumentando o pH circundante, e fazendo a solução ser menos agressiva ao concreto e melhorando a resistência do mesmo ao ataque ácido.

Assim, nota-se uma variação dos resultados entre as formulações à medida que se aumenta o teor polimérico na mistura, porém todas as formulações tiveram uma redução da variação de ganho/perda de massa em comparação a amostra de referência após exposição de 1 dia na solução agressiva. Esse comportamento é justificado por Dulsang, et al. (2016) pela natureza hidrofóbica do material polimérico, que diminui a velocidade de hidratação dos grãos de cimento na zona de ligação entre o agregado e a pasta de cimento e, conseqüentemente, proporciona uma menor absorção de agentes agressivos nos poros do concreto.

4.2.2.5.2 Variação da cor e aspecto visual

As observações visuais foram feitas em relação a alteração da cor, perda de brilho, surgimento de fissuras e desgaste superficial das amostras. Por meio da análise do Quadro 4, foi possível notar claramente que as amostras 01 de cada formulação após 1 dia de solução, já apresentaram algumas alterações no parâmetro de perda de brilho e coloração. Entretanto, foram observadas variações significativas após 14 dias em solução para todos os parâmetros, principalmente para o concreto de referência.

Em relação ao parâmetro de cor, foi observado uma descoloração da cor cinza padrão para uma cor esbranquiçada em todas as amostras, exceto para a F80,20, que apresentou uma cor cinza mais escuro antes da exposição a solução ácida e após isso apresentou uma descoloração com tom mais claro. Para o parâmetro de perda de brilho, foi observado uma perda quase uniforme do brilho natural do concreto, em todas as formulações, após 56 dias de exposição em solução ácida. Porém, a amostra F60,40, foi a que apresentou maior perda de brilho em suas amostras quando comparada com F90,10, F80,20 e F70,30. No entanto, para a amostra de referência (F100,00) foi observado uma perda de brilho acentuada em comparação com as outras formulações contendo agregado polimérico.

	Antes da exposição	1 Dia	7 Dias	14 Dias	28 Dias	56 Dias
F100,0 0						
F90,10						
F80,20						
F70,30						
F60,40						

Quadro 4 – Resultados da variação de cor e aspecto visual dos concretos em solução de sulfato de sódio (O autor, 2022).

Percebe-se que ocorreu o surgimento de fissuras nas amostras F100,00, F90,10, F80,20, F70,30 e F60,40 a partir de 7 dias de exposição ao sulfato de sódio, assim como uma progressão e surgimento de novas fissuras, com o aumento da exposição dos espécimes a solução agressiva. É perceptível a propagação dessas fissuras através dos poros aparentes em todas as formulações. Apesar da amostra F60,40 possuir um maior número visível de poros, verificou-se uma menor profundidade desses poros devido ao desgaste causado pelo ataque ácido.

As amostras também apresentaram mudança aparente no desgaste superficial, verificada pela formação de sedimentos na solução e perda de massa das amostras após 28 dias (Tabela 18). Da mesma forma, foi observado um maior desgaste das bordas e extremidades na superfície do concreto, principalmente da amostra de referência (F100,00). Estes fatores indicam que o agregado polimérico substituindo o agregado graúdo convencional poderia aumentar a resistência do concreto ao ataque de agente agressivos e diminuir sua deterioração. Esse comportamento é confirmado por Surendar, et al. (2021) que o justificaram pelo fato desses materiais poliméricos possuírem uma menor porosidade em comparação aos agregados naturais, dificultando a difusão dos agentes químicos no concreto. Diante disso, foi avaliado que os materiais poliméricos podem auxiliar de forma satisfatória na prevenção de reações químicas entre o meio agressivo e o concreto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão abordadas as principais conclusões obtidas neste estudo após a avaliação dos resultados de diversos ensaios para caracterização das amostras de concreto no estado fresco e endurecido, como também, sugestões para futuros trabalhos.

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi produzir um concreto com agregado reciclado de cola polimérica, em substituição parcial ao agregado graúdo.

As caracterizações dos componentes utilizados para a produção das amostras de concreto foram obtidas através de procedimentos experimentais realizados em laboratório e estabelecidos em normas técnicas para a determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Os resultados obtidos e apresentados no Capítulo 4 viabilizam uma sequência de considerações:

A incorporação dos resíduos de cola polimérica em substituição ao agregado graúdo natural na mistura, provoca uma redução do índice de consistência dos concretos em relação à amostra de referência. Logo, identifica-se a necessidade de um estudo de dosagem, considerando que nesta pesquisa optou-se pelo valor constante da relação água/cimento e do percentual de aditivo na mistura, independente da formulação.

Todavia, foi observado que o teor de ar obteve um aumento gradual com a substituição crescente do agregado polimérico. Isso contribuiu para variação das suas propriedades no estado endurecido, como o aumento da absorção de água e, conseqüentemente, da resistência à compressão do concreto.

Para os resultados da massa específica aparente, a presença do resíduo de cola polimérica nos concretos diminuiu essa propriedade. Logo, esse tipo de concreto com incorporação de agregado de cola polimérica pode ser uma alternativa para redução do peso próprio da edificação e conseqüentemente, da fundação. Assim, traria benefícios ambientais e redução do custo final da obra.

No que diz respeito ao comportamento dos concretos em seu estado endurecido, analisou-se que a massa específica real dos concretos contendo os polímeros sofreu uma redução em relação ao concreto convencional, em função da menor densidade dos agregados poliméricos em comparação com os agregados convencionais.

Notou-se uma variação significativa quanto ao índice de vazios, que obteve um aumento gradual, à medida que foi incorporado o agregado polimérico na mistura e o mesmo comportamento foi observado para a absorção de água no concreto. Deste modo, ainda é possível associar esta análise a diminuição da resistência à compressão das amostras, visto que a redução da absorção de água e índice de vazios são parâmetros importantes para o desempenho desta propriedade.

Para os resultados de resistência à compressão, a maioria das formulações apresentou valores inferiores à amostra de referência e observou-se que a resistência à compressão diminuía de acordo com a proporção de acréscimo do agregado de cola polimérica na mistura. O aumento de porosidade com o acréscimo do teor de ar, absorção de água e índice de vazios são fatores que influenciaram diretamente na diminuição da resistência mecânica do concreto. Ainda assim, foi possível produzir concreto com agregado de cola polimérica com resistência média a partir de 24 MPa para até 10% de incorporação desse agregado reciclado. Logo, determina-se a necessidade de um estudo de dosagem, a fim de melhorar a resistência à compressão do concreto.

Já para durabilidade, observou-se uma diminuição da perda de massa, degradação da cor, perda de brilho, surgimento de fissuras e desgaste superficial com o aumento da substituição do agregado convencional pelo polimérico nos concretos. Com base nos resultados encontrados na pesquisa, pode-se concluir que a presença dos resíduos de cola polimérica na mistura do concreto alterou a durabilidade dos concretos, o que indica a influência direta nesta propriedade com o aumento dos percentuais de substituição do agregado convencional pelo agregado polimérico. Assim, demonstra-se que o agregado polimérico poderá ser utilizado na produção de concretos. Além disso, uma redução do ataque agressivo nas edificações traria uma redução dos custos com manutenções e reparos dessas estruturas.

É importante destacar que a utilização deste tipo de resíduo em substituição parcial ao agregado graúdo convencional na produção de concreto, proporciona alguns benefícios socioeconômicos no que diz respeito a uma finalidade mais sustentável dos resíduos industriais, isso levaria a diminuição das despesas com esses descartes, uma redução da extração de grandes quantidades de matérias-primas e a diminuição da poluição desses materiais no meio ambiente.

Logo, a substituição de resíduo polimérico na forma que foi utilizado neste trabalho, ou seja, em substituição ao agregado graúdo, representa uma alternativa para produção do concreto.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho motivou a percepção de lacunas de inviável cumprimento pleno em consequência do tempo disponível para a realização das pesquisas e de ensaios que viabilizassem maior aprofundamento de resultados. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo detalhado de dosagem, a fim de melhorar as propriedades do estado fresco e endurecido do concreto com agregado polimérico;
- Efetuar o estudo das formulações adotadas com a utilização de aditivos redutores de ar, a fim de atender a uma diminuição no teor de ar e, conseqüentemente no aumento da resistência à compressão;
- Produzir e avaliar o estudo de durabilidade para as formulações de referência e do concreto com agregado polimérico em soluções agressivas distintas.
- Investigar a viabilidade do material polimérico para a produção do agregado reciclado;
- Ampliar a investigação para verificar a influência da utilização dos resíduos adotados nesta pesquisa, na resistência à tração, flexão e da microestrutura dos concretos produzidos;

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C267-20**: Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 13583:** Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland – Determinação da pasta dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16887:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16917:** Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e dos índices de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16974:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2021.

ABU-SALEEM, M.; ZHUGE, Y.; HASSANLI, R.; ELLIS, M.; RAHMAN, M.; LEVETT, P. Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application. **Construction and Building Materials**. v. 293, 2021, p. 123-477.

ALGAHTANI, F. K. Assessment of fresh and mechanical characteristics of lightweight concrete containing manufactured plastic aggregates. **Journal of Building Engineering**. v. 148, 2022, p. 1-5.

ALGAHTANI, F. K.; GHATAORA, G.; KHAN, M. I.; DIRAR, S. Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 148, 2017, p. 386-397.

AL-MANSOUR, A.; CHEN, S.; XU, C.; PENG, Y.; WANG, J.; RUAN, S.; ZENG, Q. Sustainable cement mortar with recycled plastics enabled by the matrix-aggregate compatibility improvement. **Construction and Building Materials**. v. 318, 2022, p. 1-6.

ALYOUSEF, R.; AHMAD, W.; AHMAD, A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P.; ALABDULJABBAR, H. Potential use of recycled plastic and rubber aggregate in cementitious materials for sustainable construction: A review. **Journal of Cleaner Production**. v. 329, 2021, p. 129-736.

ATAABADI, H. S.; SEDAGHATDOOST, A.; RAHMANI, H.; ZARE, A. Microstructural characterization and mechanical properties of lightweight polymer concrete exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**. v. 311, 2021, p. 125-293.

BADACHE, A.; BENOSMAN, A. S.; SENHADJI, Y.; MOULI, M. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). **Construction and Building Material**. v. 163, 2018, p. 40-52.

BAMIGBOYE, G. O.; TARVERDI, K.; UMOREN, A.; BASSEY, D. E.; OKORIE, U.; ADEDIRAN, J. Evaluation of eco-friendly concrete having waste PET as fine aggregates. **Cleaner Materials**. v. 2, 2021, p. 26–100.

BASHA; S. I.; ALI, M. R.; AL-DULAIJAN, S. U.; MASLEHUDDIN, M. Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 32, 2020, p. 101-710.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**. v. 27, n. 12, 2007, p. 1870-1876.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de janeiro: LTC, 2019. v.1. 568 p.

BOUCEDRA, A.; BEDERINA, M.; GHERNOUTI, Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 256, 2020, p. 1-10.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. **Construction and Building Materials**. v. 78, 2018, p. 79-93.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R.; LIGUORI, B.; LUCOLANO, F. Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. **Composites Part B: Engineering**. v. 106, 2016, p. 234-241.

COPPOLA, B.; COURARD, L.; MICHEL, F.; INCARNATO, L.; MAIO, L. D. Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. **Composites Part B: Engineering**. v. 99, 2016, p. 75-83.

CORREA, P. M.; GABBARDO, G.; GUIMARÃES, D.; GRAEFF, A. G.; SANTANA, R. M. C. Influência da granulometria do polipropileno na durabilidade do concreto estrutural. In: Congresso Brasileiro De Polímeros, 14., 2017, SP. **Anais...**RS: UFRGS, 2017. p. 3586-3590.

DULSANG, N.; KASEMSIRI, P.; POSI, P.; HIZIROGLU, S.; CHINDAPRASIRT, P. Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. **Materials and Design**. v. 96, 2016, p. 350-356.

FARAJ, R. H.; SHERWANI, A. F. H.; DARAEI, A. Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. **Journal of Building Engineering**. v. 25, 2019, p. 2-26.

FERREIRA, L.; BRITO, J. D.; SAIKIA, N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 36, 2012, p. 196-204.

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. **Construction and Building Materials**. v. 115, 2016, p. 32-41.

GRANZOTTO, L.; SOUZA ALVES, R. Mechanical Properties of Structural Concrete With Partial Replacement of Fine Aggregate. **Acta Scientiarum Technology**. v. 35, n. 1, 2013, p. 39-44.

HAMEED, A. M.; AHMED, B. A. F. Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. Technologies and Materials for Renewable Energy. **Environment and Sustainability**. v. 157, 2019, p. 30-38.

HANNAWI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. **Waste Management**. v. 30, n. 11, 2010, p. 2312-2320.

ISLAM, J.; SHAHJALAL, Md. Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate. **Case Studies in Construction Materials**. v. 15, 2021, p. 1-19.

JACOB-VAILLANCOURT, C.; SORELLI, L. Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 182, 2018, p. 561-572.

LEITE, A. M. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. 2018. 257p. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil (estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2018.

LUCOLANO, F.; LIGUORI, B.; CAPUTO, D.; COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. **Materials and Design**. v. 52, 2013, p. 916-922.

KANGAVAR, M. E.; LOKUGE, W.; MANALO, A.; KARUNASENA, W.; FRIGIONE, M. Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16, 2022, p. 9-34.

KOUT, S. C.; POON, C. S.; LAI, W. L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. **Waste Management**, v. 29, n. 2, 2009, p. 621-628.

MARAVEAS, C. Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes. **Materials**. v. 13, n. 2, 2020, p. 262.

MELO, F. M. C.; OLIVEIRA, H. A.; ALMEIDA, V. G. O.; GAMA, K. S.; JESUS SANTOS, H. K.; CARVALHO, M. R. Concreto produzido com agregado reciclado polimérico em substituição ao agregado natural. **Concreto e Construções (IBRACON)**. ed. 105, 2022, p. 48-52.

MOHAMMADINIA, A.; WONG, Y. C.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths. **Construction and Building Materials**. v. 197, 2019, p. 489-496.

MOHAMMED, H.; GIUNTINI, F.; SADIQUE, M.; SHAW, A.; BRAS, A. Polymer modified concrete impact on the durability of infrastructure exposed to chloride environments. **Construction and Building Materials**. v. 317, 2022, p. 125-771.

NARAN, J. M.; GONZALEZ, G. E.; CASTILLO, E. D. R.; TOMA, C. L.; ALMESFER, N.; VREDEN, P. V.; SAGGI, O. Incorporating waste to develop environmentally-friendly concrete mixes. **Construction and Building Materials**. v. 314, Part A, 2022, p. 125-599.

NEMATZADEH, M.; SHAHMANSOURI, A. A.; FAKOOR, M. Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. **Construction and Building Materials**. v. 252, 2020, p. 1-12.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015. 912 p.

OLOFINNADE, O.; CHANDRA, S.; CHAKRABORTY, P. Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. **Journal of Building Engineering**. v. 38, part. 5, 2021, p. 2151-2156.

PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de Construção**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2020. 184 p.

QU, F.; LI, W.; WANG, K.; ZHANG, S.; SHENG, D. Performance deterioration of fly ash/slag-based geopolymer composites subjected to coupled cyclic preloading and sulfuric acid attack. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, 2021, p. 128-942.

RAMÍREZ-ARREOLA, D. E.; ROSA, C.S-D.; HARO-MARES, N. B.; RAMÍREZ-MORÁN, J. A.; PÉREZ-FONSECA, A. A., ROBLEDO-ORTÍZ, J. R. Compressive strength study of cement mortars lightened with foamed HDPE nanocomposite. **Journal of Building Engineering**. v. 74, 2015, p. 119-124.

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. **Construction and Building Materials**. v. 27, n. 1, 2012, p. 107-111.

RODRIGUES, P. P. F. **ET – 67 Parâmetros de dosagem do concreto**. 2. Ed. São Paulo: ABCP, 1998.

ROQUE-SILVA, L. R. **Análise de propriedades do concreto autoadensável com resíduo polimérico**. 2020. 156p. Dissertação (Mestrado em Materiais Para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2020.

RUKAVINA, J. M.; BARICEVIC, A.; SERDAR, M.; GRUBOR, M. Study on the post-fire properties of concrete with recycled tyre Polymer fibres. **Cement and Concrete Composites**. v. 123, 2021, p. 1-12.

SAFI, B.; SAIDE, M.; ABOUTALEB, D.; MALLEM, M. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. **Construction and Building Materials**. v. 43, 2013, p. 436-442.

SÁ RIBEIRO, M. G., KEANE, P. F., SARDELA, M. R., KRIVEN, W. M., SÁ RIBEIRO, R. A. Acid resistance of metakaolin-based, bamboo fiber geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, 302, 2021, p. 124-194.

SENHADJI, Y.; SIAD, H.; ESCADEILLAS, G.; BENOSMAN, A. S.; CHIHAOUI, R.; MOULI, M.; LACHEMI, M. Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride. **Construction and Building Materials**. v. 195, 2019, p. 198-207.

STEYN, Z. C.; BABAFEMI, A. J.; FATAAR, H.; COMBRINCK, R. Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement. **Construction and Building Materials**. v. 269, 2021, p. 1-9.

SILVA, A. M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction and Building Materials**. v. 71, 2014, p. 226-236.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; SAIKIA, N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. **Cement & Concrete Composites**. v. 35, n. 1, 2013, p. 23-31.

SURENDAR, M.; BEULAH GNANA ANANTHI, G.; SHARANIYA, M.; DEEPAK, M. S.; SOUNDARYA, T. V. Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M-sand. **Materials Today: Proceedings**, v.44, 2021, p. 1723–1730.

SURESH, M.; PAL, M. Utilization of recycled concrete wastes and látex polymer for sustainable road construction. **Materialstoday: Proceedings**. v. 47, part. 14, 2021, p. 4171-4176.

TANLI, T.; DAMDELEN, O.; PEHLIVAN, S. Influences of recycled plastic and treated wastewater containing with 50% GGBS content in sustainable concrete mixes. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 16, 2022, p. 110-128.

TOBEIA, S. B.; KHATTAB, M. M.; KHLAIF, H. H.; AHMED, M. S. Enhancing recycled aggregate concrete properties by using polymeric materials. **Materialstoday: Proceedings**. v. 42, Part. 5, 2021, p. 2785-2788.

TRINDADE, E. L. G.; LIMA, L. R.; ALENCAR, L. H.; ALENCAR, M. H. Identification of Obstacles to Implementing Sustainability in the Civil Construction Industry Using Bow-Tie Tool. **Buildings**. v. 9, 2020, p. 165.

WONGKVANKLOM, A., POSI, P., KAMPALA, A., KAEWNGAO, T., CHINDAPRASIRT, P. Beneficial utilization of recycled asphaltic concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete. **Case Studies in Construction Materials**. v.15, 2021, p. 06-15.

WONG, Y. C.; PERERA, S.; ZHANG, Z.; ARULRAJAH, A.; MOHAMMADINIA, A. Field study on concrete footpath with recycled plastic and crushed glass as filler materials. **Construction and Building Material**. v. 243, 2020, p. 118-277.

ZALESKA, M.; PAVLÍKOVÁ, M.; POKORNÝ, O.; PAVLÍK, Z.; CERNÝ, R. Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight. **Construction and Building Materials**. v. 180, 2018, p. 1-11.