



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO
AGREGADO MIÚDO POR SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA NA
AMAZÔNIA.**

**CAMILA DE SOUZA DUTRA
RENAN BATISTA MACEDO**

Belém - PA

2026

**CAMILA DE SOUZA DUTRA
RENAN BATISTA MACEDO**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO
MIÚDO POR SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA NA AMAZÔNIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto
de Tecnologia da Universidade Federal do
Pará, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo da Cruz de
Araujo
Co-orientador: Prof. Dr. Tony Carlos Dias da
Costa

**Belém - PA
2026**

**CAMILA DE SOUZA DUTRA
RENAN BATISTA MACEDO**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL E TOTAL
DO AGREGADO MIÚDO POR SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA.**

Belém, 25 de fevereiro de 2026

Prof. Rodrigo da Cruz de
Araujo
Dr. pela UFPA
Orientador

Prof. Tony Carlos Dias
da Costa
Dr. pela UFPA
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo da Cruz de Araujo (UFPA)
(Orientador)
Prof. Tony Carlos Dias da Costa (UFPA)
(Coorientador)
Prof. Marcelo Rassy Teixeira (UFPA)
(Avaliador Interno)
Prof. Rodrigo Rodrigues da Cunha (IFPA)
(Avaliador Externo)

CONCEITO FINAL: EXCELENTE

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à startup Flex Stone pela confiança e pelo fornecimento do material ecológica, material que fundamentou este estudo. À empresa Terra Meio Ambiente, pelo profissionalismo e eficiência na logística de entrega dos insumos. À Totalmix, pela valiosa parceria ao ceder seu espaço de laboratório, permitindo a realização dos ensaios fundamentais para a coleta de dados e ao orientador, Prof. Rodrigo da Cruz Araújo, cuja dedicação e acompanhamento foram determinantes para o sucesso e a conclusão desta pesquisa.

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO CONCRETO CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL E TOTAL DO AGREGADO MIÚDO POR SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA.

Camila de Souza Dutra (1)

Renan Batista Macedo (2)

(1) Universidade Federal do Pará

RESUMO

A crescente geração de resíduos plásticos e a extração de agregados naturais intensificam os impactos ambientais na construção civil. Nesse contexto, foi desenvolvido, na Amazônia, um material 100% ecológico, cuja viabilidade e desempenho em matrizes cimentícias foram avaliados neste estudo. O objetivo principal da pesquisa é analisar e comparar a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade de concretos produzidos com a substituição parcial e total do agregado miúdo por um segregado deste material, em diferentes teores, em relação ao concreto convencional. Para isso, foram moldados cinco traços de concreto, sendo um de referência e quatro com substituições de 25%, 50%, 75% e 100% do material ecológico. O concreto com substituição apresentou resultados que comprovam que podem ser destinados a fabricação de peças não estruturais e absorção de água por capilaridade com valores aproximados.

Palavras-chave: sustentabilidade, materiais alternativos, termoplásticos, habitações de baixo custo.

ABSTRACT

The increasing generation of plastic waste and the extraction of natural aggregates intensify environmental impacts in the construction industry. In this context, a 100% eco-friendly material was developed in the Amazon region, and its feasibility and performance in cementitious matrices were evaluated in this study. The main objective of this research is to analyze and compare the compressive strength and water absorption by capillarity of concrete produced with partial and total replacement of fine aggregate by a segregated fraction of this material, at different replacement levels, in comparison with conventional concrete. For this purpose, five concrete mixtures were produced: one reference mix and four with 25%, 50%, 75%, and 100% replacement of the ecological material. The concrete with replacement presented results demonstrating that it can be used for the manufacture of non-structural elements, showing capillary water absorption values close to those of conventional concrete.

Keywords: Sustainability, alternative materials, thermoplastics, low-cost housing.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta, ao longo de sua trajetória histórica, um contexto delicado no que se refere ao desenvolvimento econômico, uma vez que busca expandir sua economia enquanto ainda enfrenta profundas e persistentes desigualdades sociais. A adoção de estratégias voltadas ao crescimento acelerado pode gerar transformações significativas, muitas vezes realizadas em detrimento da sustentabilidade, ao priorizar o desenvolvimento a qualquer custo (Brasil, 2015). Programas habitacionais, como o Minha Casa, Minha Vida, representam iniciativas relevantes para a redução do déficit habitacional e para a promoção de um país mais justo e desenvolvido (Krause, 2013). No entanto, tais ações devem estar associadas ao respeito ao meio ambiente e alinhadas aos princípios estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados às cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), ao consumo e à produção responsáveis (ODS 12) e à ação contra a mudança global do clima (ODS 13) (ONU, 2015; Silva, 2024).

O descarte inadequado de resíduos plásticos é atualmente reconhecido como um dos principais problemas ambientais em escala global, cujas consequências tendem a se estender às gerações futuras (PNUMA, 2018). De acordo com dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, publicado pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), em 2020 cerca de 9,7 milhões de toneladas de plásticos deixaram de ser recicladas no país. Diante desse cenário, a engenharia tem sido cada vez mais demandada a propor soluções e destinações ambientalmente adequadas para os resíduos plásticos, uma vez que a lógica linear de “extrair–produzir–descartar” se mostra incompatível com o atual contexto de crise global socioambiental (Hopewell, 2019).

Em paralelo a isso, o elevado consumo de concreto, impulsionado pelo aumento da demanda por infraestrutura, configura-se como outro desafio global, evidenciando a necessidade de soluções construtivas que conciliem o desenvolvimento urbano, a eficiência no uso de recursos naturais e a redução dos impactos ambientais (Monteiro, 2014). Em termos de volume, o produto mais fabricado no mundo atualmente é o concreto. Sua ampla utilização está diretamente relacionada ao crescimento urbano e à expansão de infraestrutura, tornando-o indispensável para o desenvolvimento econômico e social (Monteiro, 2008). No entanto, a extração de agregados naturais para a produção de concreto gera pressões sobre ecossistemas e recursos hídricos, intensificando os desafios socioambientais (John, 2017).

Com o objetivo de incentivar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos plásticos, promover a reciclagem e fomentar a economia circular, surgiu no estado do Pará a startup FlexStone, responsável pelo desenvolvimento de um material denominado brita ecológica. Para a produção desse material, são utilizados exclusivamente resíduos termoplásticos, os quais podem ser moldados por meio da aplicação de pressão e temperatura (Manrich, 2005), resultando em um material com comportamento semelhante ao de uma pedra natural, apresentando caráter inerte e resistência adequada para aplicações na construção civil. Essa tecnologia foi aprimorada no Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá, vinculado à Universidade Federal do Pará, culminando no depósito de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Esta pesquisa avalia a viabilidade da substituição total ou parcial dos agregados miúdos naturais por agregados termoplásticos, provenientes da brita ecológica, visando sua aplicação em elementos não estruturais e na construção habitacional. Conforme a ABNT, por meio da NBR 15270, tijolos de vedação devem apresentar resistência mínima de 1,5 MPa. A escolha pela substituição do agregado miúdo justifica-se pelo fato de este representar um volume significativamente maior na composição do concreto quando comparado ao agregado graúdo, de modo que sua substituição tende a gerar impactos ambientais mais expressivos. Além disso, o estudo busca contribuir para a mitigação das desigualdades sociais ao ampliar as possibilidades de aplicação desse material.

Ademais, a pesquisa alinha-se às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial aos ODS 11 e 12, que tratam de cidades e comunidades sustentáveis e de padrões responsáveis de produção e consumo (ONU, 2015). Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o embasamento de políticas públicas e para o aprimoramento de práticas de engenharia orientadas à sustentabilidade, promovendo a inovação tecnológica, a eficiência produtiva e a responsabilidade socioambiental no setor da construção civil.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

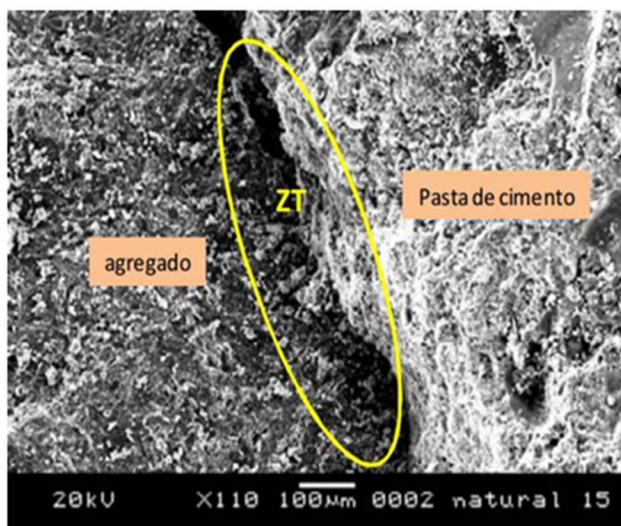
O crescente desenvolvimento mundial e o aumento da população são acompanhados da alta extração dos recursos naturais (Pimenta, 2018), além disso a produção descontrolada de plásticos no mundo causa poluição, aquecimento global e quando são submetidos a incineração liberam toxinas nocivas ao meio ambiente e a saúde humana (Subhashish, 2022). Dessa forma,

a engenharia civil inova ao incorporar resíduos plásticos no concreto, o que se configura como uma alternativa promissora para mitigar os dois problemas: a necessidade de reduzir a extração dos recursos naturais e uma alternativa de destinação adequada para esses resíduos.

Os resíduos termoplásticos apresentam características que permitem sua processabilidade por meio do aumento de temperatura e pressão (Manrich, 2013). Essa versatilidade possibilita sua transformação em novos materiais para a construção civil por meio da substituição parcial ou total dos agregados (Silva, 2024). Contudo, tais concretos são mais indicados para aplicações não estruturais, como blocos de vedação, pavimentações de baixo tráfego e mobiliário urbano, devido às limitações de resistência (Helene, 2011).

Essa limitação se justifica a partir da análise da microestrutura do concreto, especialmente na interação entre a pasta cimentícia, agregados e zona de transição interfacial (ZTI), conforme a figura 1, pois, quando ocorre a substituição dos agregados naturais por agregados poliméricos, há alterações nas características da superfície do agregado, como a afinidade química com a pasta de cimento, o que pode comprometer a aderência com a interface (Banazadeh, 2020). Considerando que a ZTI já é reconhecida como a região mais frágil do concreto mesmo quando é utilizado agregado natural (Monteiro, 2008), a inserção de materiais que tenham uma compatibilidade menor tende a intensificar essa vulnerabilidade.

Figura 1 - MEV do concreto: agregado, pasta e zona de interface.



Fonte: LMCC – UFSM (2005) apud Duarte (2008, p. 39).

Estudos semelhantes ao proposto confirmam a perda de resistência e a maior porosidade no concreto quando os agregados são substituídos por plástico reciclado. A exemplo disso, no

estudo de Siddique et al. (2008) é investigado o uso de resíduos plásticos triturados como substituição parcial do agregado miúdo. Na substituição foram utilizados 5% e 20% do agregado de plástico resultando na perda de resistência conforme o aumento de porcentagem de substituição. Entretanto, foi avaliado que o concreto fica mais leve. Já Saikia N. & de Brito J. (2012) investigaram o uso do PET reciclado como agregado fino e chegaram às mesmas conclusões, constatando que houve uma alteração significativa na zona de transição interfacial.

Embora a substituição de agregados naturais por resíduos plásticos possa reduzir a resistência à compressão, determinados percentuais de incorporação apresentam resultados positivos em propriedades específicas do concreto. Nesse sentido, Verma (2024) avaliou o desempenho de concretos estruturais contendo até 20 % de resíduos plásticos reciclados como substituição parcial de agregados. O autor observou que, apesar de reduções moderadas na resistência à compressão em maiores teores de substituição, houve melhorias significativas na resistência à flexão, bem como avanços relevantes em parâmetros de durabilidade, incluindo redução da penetração de cloretos, menor profundidade de carbonatação e melhor desempenho frente a ciclos de gelo-degelo.

Al-Luhybi et al. (2021), ao investigarem a adição de fibras de PET reciclado em baixos teores (até 0,5% em relação à massa de cimento), verificaram que a resistência à compressão foi mantida em níveis próximos ao concreto convencional, ao mesmo tempo em que houve incremento na resistência à tração por compressão diametral e na resistência à flexão. Os autores atribuíram esses resultados à atuação das fibras no controle da propagação de fissuras e ao aumento da capacidade de absorção de energia do compósito cimentício, promovendo comportamento mais dúctil.

Em 2019, uma startup paraense chamada de Flex Stone, submeteu termoplásticos a alta temperatura e pressão para transformar em um material denominado de brita ecológica. Com o objetivo de avaliar o comportamento do material foram submetidos e comparados dois materiais: um com o uso de seixo convencional e o outro com uso de 100% de brita ecológica como agregado graúdo. Os resultados obtidos indicaram que o concreto com seixo plástico atingiu resistência à compressão superior ao mínimo exigido pela ABNT NBR 6118. Contudo, por se tratarem de resultados pontuais e sem análise estatística, não é possível afirmar sua aplicabilidade estrutural. Ainda assim, o material apresenta potencial de aplicação em elementos não estruturais. O ensaio foi feito de acordo com a ABNT NBR 5739:2018 no

laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará e posteriormente teve a patente registrada no INPI sob o código: BR 10 2019 010176 8 de 19/05/2019.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico tem como intuito apresentar o cronograma experimental realizado e as respectivas metodologias realizadas para atingir os objetivos deste trabalho, considerando desde os ensaios iniciais de caracterização dos agregados miúdos até os ensaios finais de trabalhabilidade (slump test), resistência à compressão axial e absorção por capilaridade. A concretagem, moldagem dos corpos de prova e ensaios de compressão axial foram feitos no laboratório da Totalmix - Controle Tecnológico em Concreto e Argamassa, localizada na R. Raul Soares, 51, no bairro da Marambaia, Belém do Pará e os ensaios de absorção por capilaridade foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

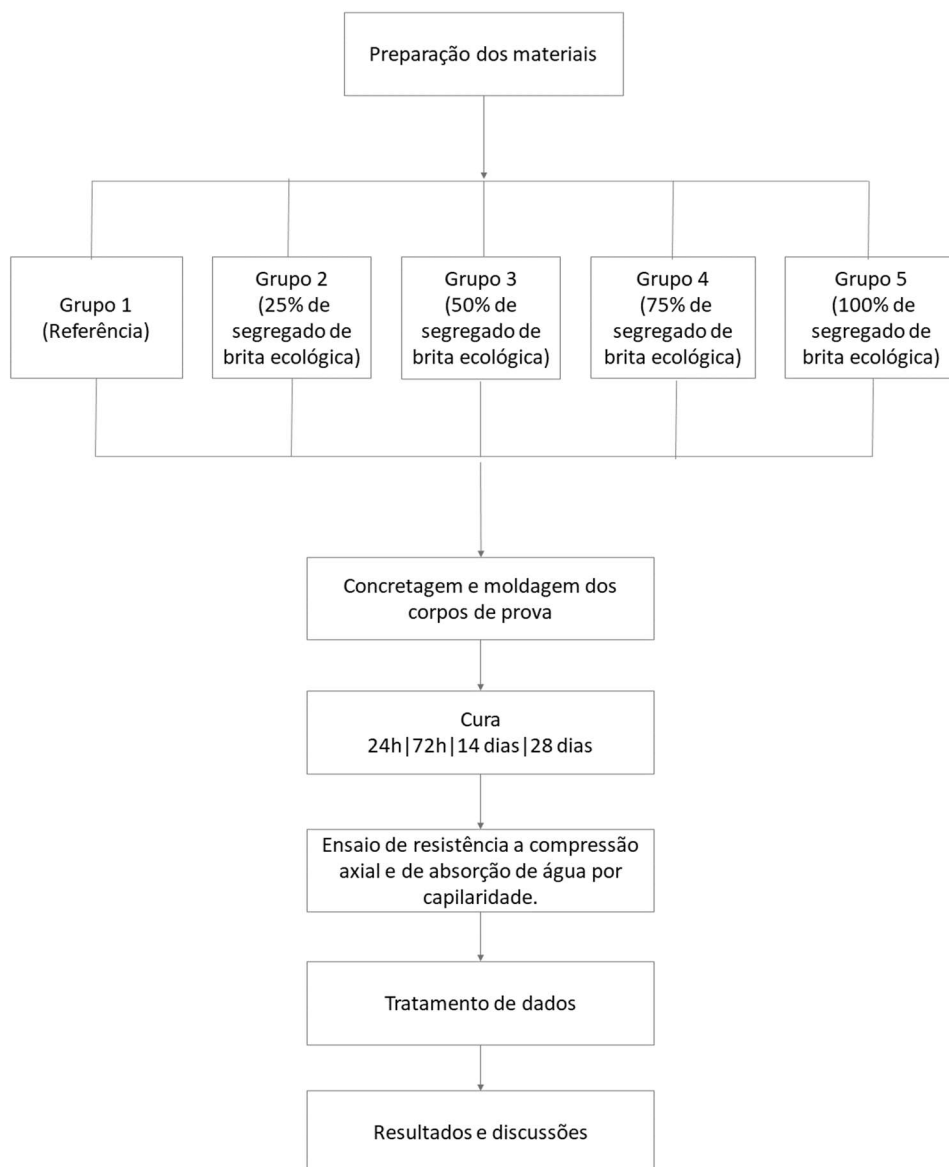
A pesquisa baseou-se na incorporação de diferentes teores de segregado de brita ecológica ao concreto, por meio da substituição do agregado miúdo nos percentuais de 25%, 50%, 75% e 100%. Para fins de comparação, foi adotado um traço de referência, correspondente ao concreto convencional, sem adição do material polimérico.

Para a realização dos ensaios, foram moldados 50 corpos de prova cilíndricos de concreto, com dimensões de 10×20 cm, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5738:2015 (Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos). Os corpos de prova (CPs) foram destinados aos ensaios de compressão axial e de absorção de água por capilaridade.

No ensaio de compressão axial, os CPs foram distribuídos da seguinte forma: dois CPs para rompimento aos 24 h, dois aos 72 h, dois aos 7 dias e dois aos 28 dias. A realização dos ensaios em idades iniciais (24 h e 72 h) teve como objetivo avaliar o ganho de resistência nas primeiras idades, considerando situações em que se demanda resistência inicial acelerada em função de requisitos construtivos. Adicionalmente, o valor correspondente à idade de 14 dias foi obtido por meio da análise do gráfico de evolução da resistência à compressão, a partir dos resultados experimentais.

Para o ensaio de absorção por capilaridade, foram moldados dois CP's para cada traço analisado. A figura 2 apresenta o fluxograma com as etapas da pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autores (2026).

3.1 MATERIAS

3.1.1 SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA

A brita ecológica foi desenvolvida e patenteada por uma startup paraense denominada Flex Stone. A tecnologia consiste na coleta de resíduos sólidos plásticos, abrangendo diferentes tipos de polímeros, como PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, entre outros. Esses materiais são submetidos a um processo de aquecimento e compressão, sem a utilização de água e sem a

necessidade de segregação por cores, resultando na formação de um material inerte e de elevada resistência mecânica, denominado brita ecológica. (Flex Stone, 2019).

3.1.2 ADITIVO

O aditivo escolhido foi o FLUXER® DRYMIX 400, um aditivo super plastificante e redutor de água de nível 2, apresentado na forma de pó, com o objetivo de evitar a adição excessiva de água à mistura e minimizar a interferência da água na zona de transição interfacial.

3.1.3 CIMENTO

O cimento Portland escolhido foi o CP II-F-40, por ser amplamente utilizado no mercado e apresentar boa resistência mecânica inicial e final. A adição de filer calcário contribui para melhor trabalhabilidade da mistura, reduzindo a demanda de água e permitindo maior controle da relação água/cimento. Além disso, o CP II-F-40 apresenta boa compatibilidade com diferentes aditivos, destacando-se sua adequada interação com o aditivo em pó utilizado na pesquisa. Ressalta-se ainda que esse tipo de cimento possui disponibilidade regional, sendo facilmente encontrado no comércio local de Belém do Pará, o que reforça a viabilidade prática de sua utilização no contexto da pesquisa.

3.1.4 BRITA 0

A brita é uma boa opção para a produção de concreto por apresentar granulometria mais fina e uniforme, favorecendo um melhor empacotamento dos agregados. Essa característica contribui para a redução de vazios, melhora a trabalhabilidade da mistura e proporciona uma zona de transição interfacial mais densa e consequentemente um melhor desempenho mecânico do concreto. Além disso, a brita 0 é amplamente disponível no mercado, o que facilita sua aplicação em diferentes regiões.

3.1.5 AREIA

A areia utilizada foi adquirida em uma estância localizada próxima à Universidade Federal do Pará, sendo de origem regional e classificada como areia fina quanto à sua granulometria, característica de materiais comumente utilizados na região Norte do país.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

3.2.1.1 AREIA

Para garantia do teor de umidade da areia, uma amostra de 1000g foi submetida à estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24h e posteriormente foi dividida em duas partes de 500g (m1 e m2) para análise granulométrica. Vale ressaltar que a ABNT NBR 17054:2022 estabelece uma massa mínima de 300 g para agregados miúdos, mas, optou-se pela utilização de amostras de 500 g com o objetivo de aumentar a representatividade dos resultados obtidos. O conjunto de peneiras em série norma utilizadas foram: #6,3 mm, #4,75 mm, #2,36 mm, #1,18 mm, #0,60 mm, #0,30 mm e #0,15 mm e o agitador mecânico de peneiras na frequência de 8 hertz, durante 5 minutos. Após a agitação foi obtida a massa retida em cada peneira e a dimensão máxima característica (DMC) da areia.

A massa específica da areia foi determinada conforme a NBR 9776 — Agregados miúdos: Determinação da massa específica por meio do frasco de Chapman. Esse ensaio é fundamental para a conversão de massa em volume, auxiliando diretamente na definição da dosagem do concreto. Para a execução do procedimento, utilizaram-se 500 g de areia previamente seca, inseridos no frasco de Chapman, contendo inicialmente 200 ml de água. Observou-se que parte do material permaneceu aderida às paredes do frasco; dessa forma, a amostra foi cuidadosamente manipulada, realizando-se movimentos circulares, a fim de garantir a completa acomodação da areia e a eliminação das bolhas de ar presentes no sistema. Em seguida, procedeu-se à leitura do volume final, a partir do qual foi determinada a massa específica da areia.

3.2.1.2 SEGREGADO DE BRITA ECOLÓGICA

De acordo com a ABNT NBR 7211:2009 - agregados para concreto, os agregados considerados miúdos devem apresentar a dimensão máxima característica inferior ou igual a 4,75 mm, por esse motivo, a brita ecológica foi passada na peneira 4,75mm para que fosse feita a divisão entre agregado miúdo e agregado graúdo, dessa forma, obteve-se o segregado da brita ecológica. Conforme apresentado na figura 3, observa-se o material em três condições distintas: (a) amostra não classificada; (b) fração retida na peneira de 4,75 mm; e (c) fração passante na peneira de 4,75 mm.

Figura 3 - Diferença granulométrica do material



(1) Material misturado; (2) Retido na peneira 4,75mm (agregado graúdo); (3) Passante na peneira 4,75 (Agregado miúdo).

Fonte Autores (2026)

Não foi necessário o controle do teor de umidade do material, uma vez que seu processo de fabricação ocorre integralmente a seco, com a aplicação de altas temperaturas e pressão para a obtenção do formato desejado. Ademais, o armazenamento e o transporte foram realizados em ambientes controlados e secos. Diante dessas condições, procedeu-se à análise granulométrica do material, para a qual foram separadas duas amostras de 500 g, posteriormente submetidas ao ensaio conforme a NBR 17054:2022, adotando-se o mesmo procedimento utilizado para a análise granulométrica da areia.

Para a determinação da massa específica desse material, foi necessária uma adaptação do procedimento descrito na NBR 9776 — Agregados miúdos: Determinação da massa específica por meio do frasco de Chapman. Tal adaptação justificou-se pelo fato de o material apresentar elevada aderência às paredes do frasco de Chapman, o que poderia comprometer a leitura do volume deslocado. Dessa forma, optou-se pela utilização de uma proveta graduada de 500 ml, previamente preenchida com 200 ml de água, na qual a amostra foi cuidadosamente inserida, permitindo a determinação da massa específica do material de maneira mais precisa.

3.2.1.3 DOSAGEM, CONCRETAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1.3.1 DOSAGEM

Para a confecção dos concretos, adotou-se o método de dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/EPUSP), conforme as diretrizes estabelecidas por Helene e Terzian (1992). Inicialmente, por meio de ensaios de tentativa e erro, definiu-se um teor de argamassa de 57% para o traço unitário de 1:4,78 (cimento: agregados, em massa). Manteve-se a relação

água/cimento (a/c) fixa em 0,53, condizente com a Classe de Agressividade I, e buscou-se a consistência de classe S220, com abatimento de tronco de cone fixado em 220 ± 30 mm.

Além do concreto de referência produzido com agregado natural (areia da região de Belém), foram confeccionadas quatro grupos experimentais com a incorporação de agregado segregado da brita ecológica em diferentes teores. Por meio desse estudo experimental de dosagem, verificou-se que as características intrínsecas de cada teor incorporado, como a massa específica reduzida e a textura superficial, impediam um comportamento reológico uniforme sob as mesmas condições no estado fresco.

Dessa forma, para que o critério de consistência normativa fosse atendido, os concretos produzidos demandaram ajustes nos teores de argamassa. Aspectos como coesão e trabalhabilidade foram monitorados durante os testes de consistência até que os parâmetros de controle fossem devidamente alcançados. Os valores finais da dosagem e o consumo de materiais estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 3 - Traço (em massa), teor de argamassa, relação a/c, consistência.

ID	TRAÇO UNITÁRIO (CIMENTO: AGREGADOS)	TEOR DE ARGAM ASSA (%)	RELAÇÃO A/C	AGREGADO MIÚDO (%)		ABATIME NTO (MM)
				NATURAL	RECICLADO	
Grupo 1	1:5	0,57	0,53	100	0	≈ 24
Grupo 2	1:5	0,53	0,53	75	25	
Grupo 3	1:5	0,46	0,53	50	50	
Grupo 4	1:5	0,38	0,53	25	75	
Grupo 5	1:5	0,27	0,53	0	100	

Fonte: Autores (2026).

3.2.1.3.2 CONCRETAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A concretagem foi realizada no laboratório da Totalmix - Controle Tecnológico em Concreto e Argamassa, localizada na R. Raul Soares, 51, no bairro da Marambaia, Belém do Pará e foi disponibilizado todo o suporte técnico para essa etapa.

Primeiramente, os materiais foram separados e pesados, cada traço por vez, e em seguida adicionados na betoneira. Na betoneira, foi adicionado, primeiramente, o material seco, por último, a água, que rapidamente reagiu com o aditivo. O material foi misturado por 5 minutos e interrompido para a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test),

conforme a ABNT NBR NM 67:1998. Após o ensaio, o material foi alocado para a betoneira novamente e iniciou-se o processo de mistura por 2 minutos.

Após a concretagem, foi iniciado o processo de moldagem dos corpos de prova conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), foi adotado o mesmo procedimento para os diferentes grupos. Foram usados moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura que foram untados interiormente com óleo desmoldante. O concreto foi lançado em duas camadas de igual espessura, sendo cada uma adensada manualmente com 12 golpes uniformemente distribuídos, conforme prescrito pela norma. Após o adensamento da segunda camada, procedeu-se ao acabamento superficial dos corpos de prova.

Em seguida betoneira foi lavada e repetiu-se o processo para todos os grupos. Ao final de todas as betonadas, os corpos de prova ficaram alocados no chão plano por 24h, conforme a figura 4. Após esse período, os corpos de prova foram para o tanque de cura para aguardar o momento do rompimento.

Figura 4 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autores (2026).

3.2.1.3.3 TRABALHABILIDADE

Para o ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Test) seguiu a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998) que especifica a metodologia para a determinação do concreto fresco por meio da medida de seu assentamento.

Após a mistura do concreto, com todo o equipamento do ensaio umedecido, o concreto foi despejado no seu interior, em 3 camadas, e para cada uma das camadas foram efetuados 25

golpes. Com a última camada golpeada, a superfície do concreto foi rasada e imediatamente retirou-se o molde verticalmente, colocando-o ao lado do concreto abatido, conforme a figura 5. Em seguida foi medida a diferença entre a altura do molde e altura do eixo do corpo de prova.

Figura 5 - Slump test



Fonte: Autores (2026)

3.2.1.3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL E ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.

O ensaio de resistência a compressão foi feito em 2 CP's de cada grupo em 24h, 72h, 7 dias e 28 dias e realizado no laboratório da Totalmix - Controle Tecnológico em Concreto e Argamassa, assim como a concretagem. O ensaio foi feito conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012) que descreve como devem ser ensaiados os corpos de prova cilíndricos de concreto.

Previamente ao ensaio os CP's tiveram sua superfície retificada e foram alocados na máquina de compressão. O carregamento imposto foi constante até o rompimento, onde aferiu-se o valor da força máxima suportada pelo corpo de prova. A resistência à compressão tem-se pela Equação 1.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Onde:

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

O ensaio de absorção de água por capilaridade serve para medir a capacidade de um material poroso (concreto ou argamassa) de sugar água através de seus poros capilares. Segundo a NBR 9779, esse índice é um dos principais indicadores da durabilidade das estruturas, pois poros muito conectados facilitam a entrada de agentes agressivos (cloretos, sulfatos).

Para essa análise, as amostras foram secas em estufa até a massa constante e colocadas em um recipiente com uma lâmina de água constante de 5 ± 1 mm. As pesagens foram realizadas em intervalos de tempo específicos (ex: 3h, 6h, 24h, 48h, 72h). A absorção de água por capilaridade em porcentagem tem-se pela equação 2:

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

C = é a absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm²);

M_{sat} = é a massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período especificado, expressa em gramas (g);

M_s = é a massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2) °C, expressa em gramas (g); S é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm²).

4. RESULTADOS

4.1 ESTADO FRESCO

A Figura 6 exemplifica os aspectos visuais apresentados pelos concretos durante a etapa de concretagem e testes de consistência por abatimento do tronco de cone.

Figura 6 - Aspectos visuais apresentados pelos concretos com diferentes teores de agregado reciclado no estado fresco.



Fonte: Autores (2026)

O concreto com 25% de segregado da brita ecológica apresentou um comportamento bastante plástico e coeso, visual superior às demais misturas modificadas. À medida que o teor de agregado plástico aumenta, a textura do concreto sofre alterações devido à forma irregular e à natureza impermeável do polímero. Para todos os grupos analisados, os valores de abatimento apresentaram média aproximada de 25 cm, indicando comportamento consistente e trabalhabilidade semelhante entre os traços avaliados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 AREIA

A areia, obteve massa específica igual a $2,62 \text{ g/cm}^3$, compatível com os valores de materiais de origem quartzosa, conforme aos parâmetros de referência da NBR 16972 (ABNT, 2021). Em relação à granulometria, revelou que o material utilizado possui um módulo de finura de 1,83 e um diâmetro máximo de 2,36 mm, conforme a tabela 2, caracterizando a areia como relativamente fina, conforme a ABNT NBR 17054/ 2022.

Tabela 2 – Granulometria da areia. (Continua)

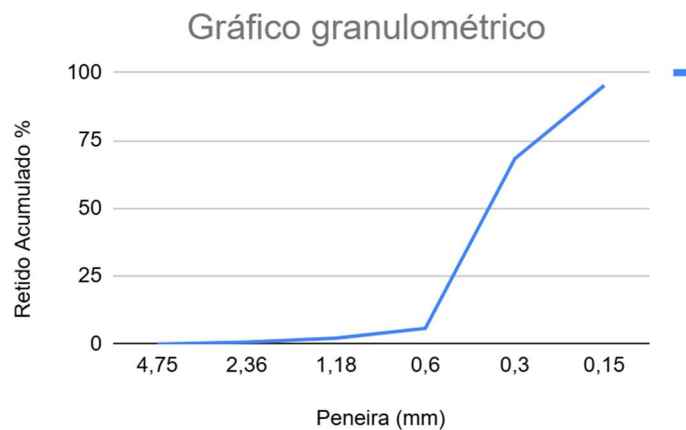
Amostra:	500,01	g	
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Retido %	Retido Acumulado %
4,75	0	0,00	0,00
2,36	3,74	0,75	0,75

1,18	23,68	4,74	5,48
0,6	48,29	9,66	15,14
0,3	257,32	51,46	66,60
0,15	140,87	28,17	94,78
Fundo	30,07	6,01	100,79
Total	503,97		
		Diâmetro máximo	2,36 mm
		Módulo finura	1,82

Fonte: Autores, 2026.

A curva granulométrica apresentou variação acentuada nas primeiras peneiras e posterior estabilização, indicando concentração de partículas na peneira 0.6 mm, conforme a figura 7 e baixa presença de frações intermediárias. Esse comportamento caracteriza o material como de graduação descontínua, o que pode influenciar a trabalhabilidade e a compacidade do concreto, aumentando o índice de vazios e a demanda de pasta cimentícia.

Figura 7 – Curva granulométrica.



Fonte: Autores, 2026.

4.2.1 SEGREGADO DA BRITA ECOLÓGICA

O segregado da brita ecológica apresentou massa específica de $0,98 \text{ g/cm}^3$ e foi feito conforme a ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021). A análise granulométrica indicou módulo de finura igual a 4,55 e diâmetro máximo de 2,36 mm (Tabela 2), classificando o material como agregado miúdo reciclado, de acordo com a ABNT NBR 17054:2022.

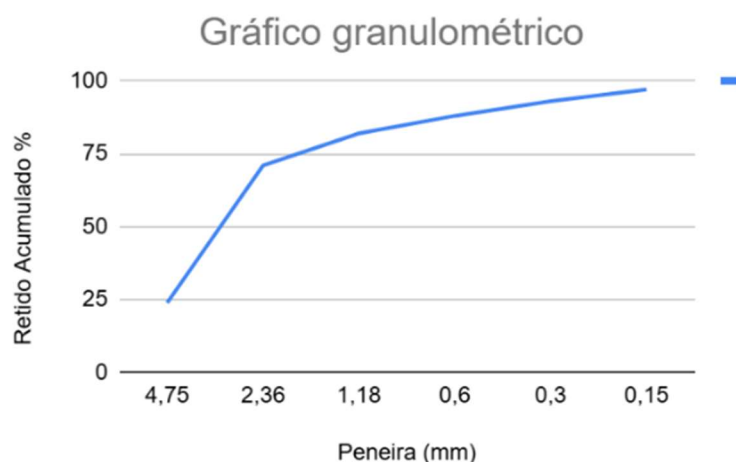
Tabela 3 – Granulometria segregado de brita ecológica

Amostra:	500	g	
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Retido %	Retido Acumulado %
4,75	120	24,00	24,00
2,36	235	47,00	71,00
1,18	55	11,00	82,00
0,6	30	6,00	88,00
0,3	25	5,00	93,00
0,15	20	4,00	97,00
Fundo	15	3,00	100,00
Total	500		
		Diâmetro máximo	2,36 mm
		Módulo finura	4,55

Fonte: Autores, 2026.

Na figura 8, observa-se uma concentração significativa de partículas nas peneiras de 4,75 mm e 2,36 mm, que juntas representam a maior fração retida do material. A curva evidencia distribuição predominantemente grossa, com baixa porcentagem de material passante nas peneiras inferiores, confirmando o reduzido teor de finos. O módulo de finura igual a 4,55 reforça essa característica granulométrica, indicando material consideravelmente mais grosso quando comparado aos agregados miúdos convencionais. Tal comportamento pode influenciar diretamente a trabalhabilidade e o índice de vazios das misturas, podendo demandar ajustes no traço para garantir adequada coesão e desempenho mecânico. De acordo com a ABNT NBR 17054:2022, o material é classificado como agregado miúdo reciclado, sendo sua aplicação recomendada mediante avaliação do desempenho no concreto.

Figura 8 – Curva granulométrica.



Fonte: Autores, 2026.

A massa unitária do segregado da brita ecológica foi de $0,734 \text{ g/cm}^3$, conforme determinação pela ABNT NBR 16972:2021. O valor obtido caracteriza o material como agregado leve, apresentando densidade significativamente inferior aos agregados naturais convencionais. Tal comportamento indica maior presença de vazios e potencial influência na massa específica, trabalhabilidade e desempenho mecânico do concreto produzido.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Conforme os resultados da caracterização mecânica dos concretos, primeiramente tratando-se da resistência à compressão axial, observa-se que apenas o concreto de Referência (Ref) atende ao critério normativo da ABNT NBR 6118 (2014) para a idade de 28 dias ($\geq 20 \text{ MPa}$), com valor médio de $29,86 \text{ MPa}$, figura (8), podendo assim ser classificado como estrutural.

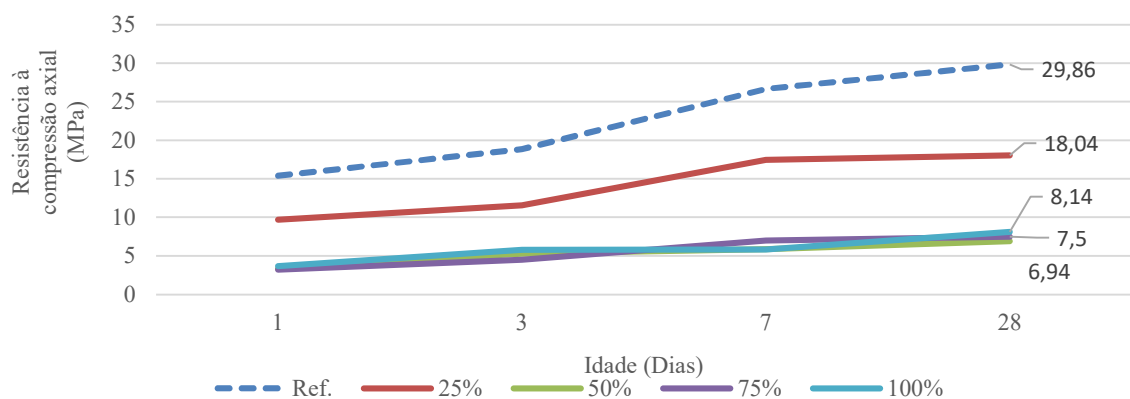
Dentre os concretos modificados, a amostra com 25% de segregado da brita ecológica obteve a maior resistência à compressão axial entre as misturas com material alternativo, atingindo $18,04 \text{ MPa}$ aos 28 dias. Apesar de apresentar um desempenho superior aos demais teores de substituição, este valor situa-se abaixo do limite mínimo para fins estruturais.

O desenvolvimento inicial da resistência (1, 3 e 7 dias) para as famílias de 50%, 75% e 100% deu-se de maneira muito semelhante, mantendo patamares reduzidos desde as primeiras 24 horas. Contudo, enquanto o Ref apresentou um ganho de resistência acentuado ao longo das idades, os concretos com teores de segregado da brita ecológica acima de 50% assumiram

valores finais muito próximos entre si ao final dos 28 dias, variando entre 6,94 MPa e 8,14 MPa.

Esses valores, embora significativamente menores que os da amostra de referência, findaram a idade de ensaio com resultados superiores aos mínimos exigidos para blocos de concreto sem função estrutural (NBR 6116:2016), validando o uso desses teores para outras finalidades construtivas.

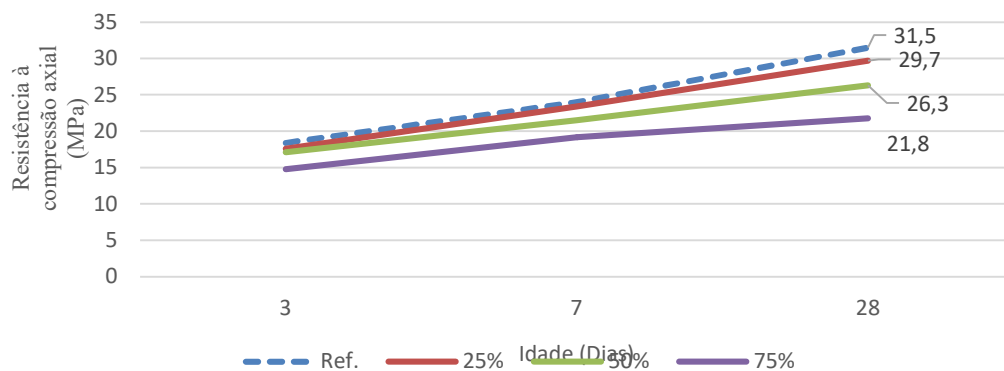
Figura 8 - Desenvolvimento da resistência média à compressão ao longo do tempo



Fonte: Autores, 2026.

Siddique et al. (2008) investiga o impacto de diferentes polímeros reciclados nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A comparação com essa revisão fundamentou-se na proximidade das dosagens, especificamente na relação água/cimento de 0,53 adotada nesta pesquisa. Esse parâmetro alinha-se às misturas de referência da literatura internacional para concretos com agregados plásticos e leves.

Figura 9 - Resistência à compressão axial, fator a/c 0,53



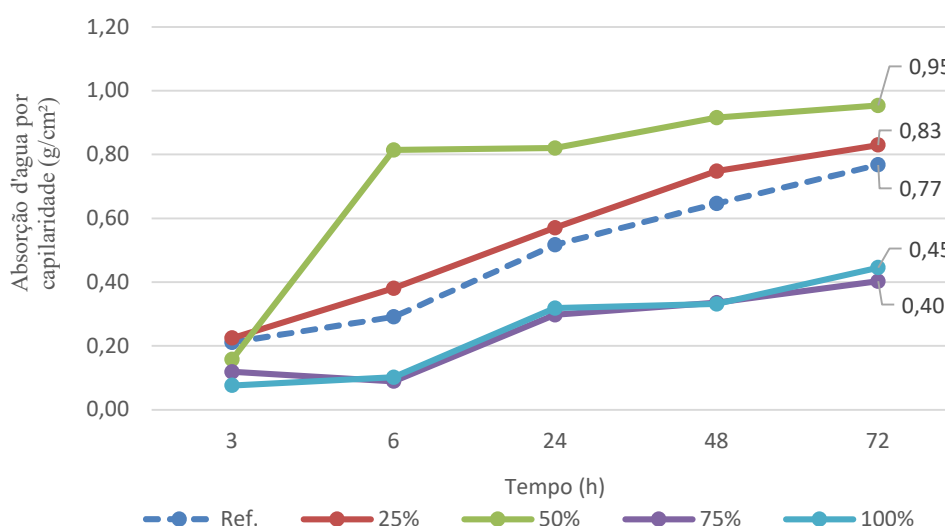
Fonte: Siddique et al. (2008).

Ao comparar os resultados, figura (9), observa-se uma queda da resistência mecânica, porém com intensidades distintas dependendo do tipo de polímero. Siddique et al. (2008) atribuem essa perda de resistência à baixa adesão entre a pasta de cimento e a superfície lisa dos plásticos, além da baixa resistência do próprio agregado polimérico. No caso do segregado da brita ecológica, a presença de óxidos minerais e plásticos termofixos parece acentuar esse comportamento, conforme evidenciado pela queda mais brusca nos seus teores iniciais. Apesar da queda mecânica mais acentuada que a média da literatura, todos os teores permanecem viáveis para alvenaria não estrutural e vedação.

4.4 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (POROSIDADE)

Os concretos foram submetidos a análises de absorção por capilaridade para avaliação indireta da sua porosidade, fator este de extrema importância ao se tratar da durabilidade. A absorção de água por capilaridade foi analisada correlacionando a massa absorvida por unidade de área (g/cm^2) e o tempo (h) conforme apresentado na Figura (10).

Figura 10 - Estimativa da absorção média de água por capilaridade dos concretos, ao longo do tempo.



Fonte: Autores, 2026.

Todas as amostras apresentam um ganho de massa imediato no primeiro contato com a água, indicativo do preenchimento dos poros superficiais. O traço de 50% segregado da brita

ecológica, após um início mais rápido, apresentou o maior índice de absorção acumulada ao final das 72 horas ($0,95\text{g/cm}^2$), sugerindo que nesta proporção a rede de capilares torna-se mais conectada. A substituição de 25% do agregado natural pelo plástico resultou em uma curva de absorção ligeiramente superior à de Referência ($0,77\text{g/cm}^2$), finalizando o ensaio com $0,83\text{g/cm}^2$. Este incremento é condizente com a literatura sobre agregados reciclados, que tendem a aumentar a porosidade da zona de transição. Os resultados mais expressivos foram observados nos teores mais elevados de substituição. As famílias com 75% e 100% de segregado da brita ecológica apresentaram uma redução drástica na absorção final, atingindo $0,40\text{g/cm}^2$ e $0,45\text{g/cm}^2$, respectivamente. Estes valores representam uma redução de aproximadamente 45% na absorção em comparação ao concreto convencional.

A drástica queda na absorção nos teores de 75% e 100% está associada ao efeito hidrofóbico e à natureza não absorvente do plástico extrusado. Em altas concentrações, as partículas de polímero não apenas substituem o agregado mineral, mas atuam como barreiras impermeáveis que interrompem a continuidade dos canais capilares na matriz cimentícia, dificultando o transporte de água por sucção (SIDDIQUE; KHATIB; KAUR, 2008).

5. CONCLUSÃO

Mediante as análises dos resultados de resistência mecânica e durabilidade, pode-se concluir que a incorporação do segregado da brita ecológica como agregado miúdo alternativo apresenta viabilidade técnica para a produção de componentes de construção civil de fins não estruturais e de alvenaria estrutural. Além disso, conclui-se que:

5.1. AGREGADO MIÚDO DE SEGREGADO DA BRITA ECOLÓGICA

As características intrínsecas do resíduo polimérico exerceram influência direta nas propriedades do concreto no estado endurecido, atuando como um modificador da cinética de absorção de água;

O uso do segregado da brita ecológica em substituição ao agregado natural promove uma redução na densidade da mistura, o que, embora impacte a resistência à compressão, contribui para a leveza dos componentes finais.

5.2. CONCRETOS

A resistência mecânica à compressão axial dos traços com segregado da brita ecológica situou-se abaixo do limite mínimo de 20 MPa estabelecido pela NBR 6118 (2014) para fins estruturais em concreto armado. Entretanto, os resultados obtidos validam o material para as classes de resistência da NBR 6136 (2016). As amostras com 75% e 100% de segregado da brita ecológica destacaram-se por atender aos critérios da Classe A ($f_{bk} \geq 8,0$ MPa) e Classe B ($f_{bk} \geq 4,0$ MPa) da NBR 6136, classificando-os como aptos para a fabricação de blocos vazados com função estrutural;

Quanto à durabilidade avaliada por absorção capilar, o concreto com 100% de segregado da brita ecológica apresentou desempenho superior ao concreto de referência e aos traços intermediários. A redução drástica na absorção de água (cerca de 45% inferior ao concreto convencional) comprova o efeito de barreira hidrofóbica proporcionado pelo polímero, o que configura um indicativo excepcional de durabilidade frente à umidade e ao ataque de agentes agressivos por via úmida;

O comportamento reológico exigiu atenção especial, uma vez que a textura e a forma das partículas de plástico extrusado influenciam a trabalhabilidade, demandando um controle rigoroso na relação água/cimento e no teor de argamassa para garantir a coesão necessária à moldagem dos componentes. Em resumo, o compósito plástico-mineral, embora apresente limitações para o uso em estruturas de concreto armado convencional, demonstra ser uma proposta de alto valor para a indústria de pré-moldados e alvenaria de blocos não estruturais, unindo a destinação sustentável de resíduos poliméricos a um produto de baixa absorção e resistência normativa satisfatória.

É importante destacar que as conclusões expostas se referem aos parâmetros específicos e às proporções de substituição utilizadas neste programa experimental. Dessa forma, os resultados não devem ser considerados absolutos, havendo a necessidade de mais pesquisas para maior representatividade estatística.

5.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Durante o estudo realizado, foram identificados aspectos relevantes para a continuidade da linha de pesquisa, visando o aprofundamento do tema abordado. Sugere-se:

a) Realização de ensaios de condutividade térmica e desempenho acústico, visto que a presença de polímeros tende a melhorar o isolamento termoacústico de componentes de vedação;

b) Aplicações em pavimentos e drenagem: efetuar a análise da viabilidade de utilização do concreto com altos teores de segregado da brita ecológica para a confecção de placas de pavimentação permeáveis ou pavers de intertravamento para tráfego leve, aproveitando a boa relação entre estanqueidade superficial e resistência normativa para alvenaria.

c) Estudo da aderência entre a matriz cimentícia e o agregado de segregado da brita ecológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), buscando entender a formação da zona de transição interfacial;

d) Argamassas de contrapiso e regularização, investigação do uso de segregado da brita ecológica em argamassas de contrapiso, aproveitando a baixa densidade do polímero para reduzir a carga permanente nas lajes. A elevada estanqueidade observada nos teores de 75% e 100% de segregado da brita ecológica sugere um material com excelente desempenho contra a umidade ascendente em pisos térreos.

e) Análise de viabilidade econômica comparando o custo de produção do agregado reciclado em relação ao agregado natural, considerando os benefícios ambientais do crédito de logística reversa.

6. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015. Concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136:2016. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2009. Agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972:2021. Agregados — determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054:2022. Agregados — determinação da composição granulométrica — método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:2009. Agregado miúdo — determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67:1998. Concreto — determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

AL-LUHYBI, Ashtar S. et al. Mechanical properties of concrete with recycled plastic waste. *Civil and Environmental Engineering*, v. 17, n. 2, p. 629–643, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0063>.

BANAZADEH, M. et al. Effects of aggregate surface characteristics on interfacial transition zone (ITZ) and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 235, p. 117458, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117458>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Poluição por plástico. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/doceano/vetores-de-degradacao-costeira-e-marinha/poluicao-por-plastico>. Acesso em: 4 jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Ministério das Cidades. *Sustentabilidade urbana: impactos do desenvolvimento econômico e suas consequências sobre o processo de urbanização em países emergentes*. Brasília: MMA; Ministério das Cidades, 2015.

CONCEIÇÃO, Márcio Magera et al. O plástico como vilão do meio ambiente. *Revista Geociências – UNG-Ser*, Guarulhos, v. 18, n. 1, p. 50–53, 2019. DOI: <https://doi.org/10.33947/1981-7428-v18n1-4024>.

DEY, Subhashish; SREENIVASULU, Anduri. *Degradação dos resíduos plásticos e seus efeitos sobre os aspectos ambientais: uma análise científica e revisão exhaustiva*. Saarbrücken: Edições Nosso Conhecimento, 2022.

FELIPPE, J. N. de Oliveira. Do lixo ao LAB – polímeros biodegradáveis e compósitos: avanços e perspectivas. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 23, n. 12, e12550, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n12-047>.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1993.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. *Concreto de cimento Portland*. São Paulo: PINI, 2011.

HOPEWELL, Jefferson; DVORAK, Robert; KOSIOR, Edward. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009.

KRAUSE, Cleandro; BALBIM, Renato; NETO, Vicente Correia Lima. *Minha Casa Minha Vida, nosso crescimento: onde fica a política habitacional?* Texto para Discussão, n. 1853. Rio de Janeiro; Brasília: IPEA, 2013.

MANRICH, Silvio. *Processamento de termoplásticos*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. *Concrete technology*. 2. ed. Harlow: Longman Group, 2010.

PIMENTA, Regina; POGGI, Francesca; FIRMINO, Ana. A economia circular como contributo para a implementação de medidas de eficiência energética ao nível dos municípios/associações de municípios. In: APDR CONGRESSO, 25., 2018, Lisboa. *Anais [...] Lisboa: Associação Portuguesa para o Desenvolvimento Regional*, 2018. p. 527–536.

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. *Single-use plastics: a roadmap for sustainability*. Nairobi: UNEP, 2018.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*, v. 28, n. 10, p. 1835–1852, 2008.

SILVA, A. L. C.; BENINI, S. M.; GODOY, J. A. R. de. Cidades inteligentes e cidades sustentáveis: contradições e sinergia para a construção de um modelo integrado. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, Boa Vista, v. 20, n. 58, p. 350–382, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14533176>.

SILVA, M. C.; SILVA, L. R. da; ABDALLA, A. M. W. Explorando o potencial de resíduos plásticos no concreto: uma revisão sistemática. *Revista Tecnológica da FATEC*, v. 15, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.62790/rtfv15n1-011>.

SOUSA, Marcos Antonio C. de. *Relatório técnico do projeto “Seixo de Ferro”*. Belém: Parque de Ciência e Tecnologia Guamá, 2019. Relatório técnico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Instituto de Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. *Controle tecnológico do concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Laudo técnico n. 04/2019. Belém, 2019.

VERMA, Sapna; VARMA, Hridayesh; VERMA, Sanjeev Kumar. Recycled plastic waste in structural concrete: performance assessment and pathways for sustainable construction. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, v. 12, n. 23s, p. 3752–?, 2024.