

Avaliação físico-mecânica de concretos leves Produzidos com Poliestireno Expandido (EPS): perspectivas para seu potencial uso estrutural

Physical-mechanical evaluation of lightweight concrete Produced with Expanded Polystyrene (EPS): prospects for its potential structural use

Evaluación físico-mecánica de hormigones ligeros Fabricados Con Poliestireno Expandido (EPS): perspectivas para su posible uso estructural

Vagner Moreira da Silva

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Endereço: Governador Valadares - Minas Gerais, Brasil

E-mail: vaguinho_ms@hotmail.com

Samuel Lucas da Silva Oliveira

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Endereço: Governador Valadares - Minas Gerais, Brasil

E-mail: samuellucas_gv@hotmail.com

Carolyne Amélia Assis Ávila

Mestra em Educação

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Diamantina - Minas Gerais, Brasil

E-mail: carolyne.avila@ifmg.edu.br

Daniel Miranda Santos

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Endereço: Governador Valadares - Minas Gerais, Brasil

E-mail: mirandaniel1666@gmail.com

RESUMO

Este estudo avaliou o comportamento físico-mecânico de concretos leves produzidos com incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS), com foco na redução da massa específica e na análise de seu potencial de aplicação estrutural. Foram produzidos quatro traços: um concreto de referência, sem EPS, e três misturas com substituição parcial dos agregados convencionais por EPS, visando massas específicas reduzidas. Os concretos foram avaliados no estado fresco por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone e, no estado endurecido, quanto à massa específica seca, absorção de água e resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias. Os resultados demonstraram que a incorporação de EPS reduziu significativamente o peso específico seco dos concretos, de 24,09 kN/m³ no traço de referência para 18,36 kN/m³, 18,05 kN/m³ e 15,66 kN/m³ nos traços modificados. Entretanto, essa redução foi acompanhada por diminuição da resistência à compressão, que aos 28 dias passou de 64,35 MPa no traço de referência para

20,52 MPa, 14,87 MPa e 10,07 MPa nos concretos com EPS. Observou-se ainda aumento da absorção de água e dificuldade de homogeneização das pérolas de EPS, com tendência de concentração em determinadas regiões dos corpos de prova. Conclui-se que o EPS apresenta potencial como material redutor de massa específica em concretos leves, porém sua aplicação estrutural exige maior controle tecnológico, principalmente quanto à mistura, segregação, adensamento e uniformidade da distribuição do agregado leve.

Palavras-chave: concreto leve, poliestireno expandido, EPS, resistência à compressão, massa específica, sustentabilidade.

ABSTRACT

This study evaluated the physical and mechanical behavior of lightweight concretes produced with expanded polystyrene beads (EPS), focusing on density reduction and on the assessment of their potential structural application. Four mixtures were produced: one reference concrete without EPS and three mixtures with partial replacement of conventional aggregates by EPS, aiming at reduced specific weights. The concretes were evaluated in the fresh state through the slump test and, in the hardened state, in terms of dry specific weight, water absorption, and axial compressive strength at 7 and 28 days. The results showed that the incorporation of EPS significantly reduced the dry specific weight of the concretes, from 24.09 kN/m³ in the reference mixture to 18.36 kN/m³, 18.05 kN/m³, and 15.66 kN/m³ in the modified mixtures. However, this reduction was accompanied by a decrease in compressive strength, which at 28 days decreased from 64.35 MPa in the reference concrete to 20.52 MPa, 14.87 MPa, and 10.07 MPa in the EPS concretes. An increase in water absorption and difficulties in homogenizing the EPS beads were also observed, with a tendency for concentration in specific regions of the specimens. It is concluded that EPS has potential as a density-reducing material in lightweight concretes, however, its structural application requires greater technological control, especially regarding mixing procedures, segregation, compaction, and uniform distribution of the lightweight aggregate.

Keywords: lightweight concrete, expanded polystyrene, EPS, compressive strength, specific weight, sustainability.

RESUMEN

Este estudio evaluó el comportamiento físico-mecánico de hormigones ligeros fabricados con la incorporación de perlas de poliestireno expandido (EPS), centrándose en la reducción de la masa específica y en el análisis de su potencial de aplicación estructural. Se prepararon cuatro mezclas: un hormigón de referencia, sin EPS, y tres mezclas con sustitución parcial de los áridos convencionales por EPS, con el objetivo de reducir la masa específica. Los hormigones se evaluaron en estado fresco mediante el ensayo de asentamiento del tronco de cono y, en estado endurecido, en cuanto a la masa específica seca, la absorción de agua y la resistencia a la compresión axial a los 7 y 28 días. Los resultados demostraron que la incorporación de EPS redujo significativamente la masa específica seca de los hormigones, pasando de 24,09 kN/m³ en la mezcla de referencia a 18,36 kN/m³, 18,05 kN/m³ y 15,66 kN/m³ en las mezclas modificadas. Sin embargo, esta reducción vino acompañada de una disminución de la resistencia a la compresión, que a los 28 días pasó de 64,35 MPa en la mezcla de referencia a 20,52 MPa, 14,87 MPa y 10,07 MPa en los hormigones con EPS. También se observó un aumento de la absorción de agua y dificultades para homogeneizar las perlas de EPS, con tendencia a concentrarse en

determinadas zonas de los cuerpos de ensayo. Se concluye que el EPS presenta potencial como material reductor de la masa específica en hormigones ligeros; sin embargo, su aplicación estructural exige un mayor control tecnológico, sobre todo en lo que respecta a la mezcla, la segregación, el apisonamiento y la uniformidad de la distribución del árido ligero.

Palabras clave: hormigón ligero, poliestireno expandido, EPS, resistencia a la compresión, masa específica, sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil contemporânea, no âmbito das estruturas, em sua contínua evolução, dedica-se a encontrar soluções que harmonizem o desempenho estrutural, a eficiência construtiva e a sustentabilidade ambiental (Ozório, 2016). Nesse cenário, o concreto se destaca como o principal material de construção utilizado mundialmente, resultado de sua versatilidade, elevada resistência e durabilidade em diferentes condições de serviço. Sua importância decorre da capacidade de ser moldado *in loco*, atender a múltiplas exigências estruturais e oferecer soluções econômicas e seguras para obras de infraestrutura, edificações e pavimentação (Neville, 2016). O avanço tecnológico também tem ampliado seu potencial de aplicação, especialmente com o desenvolvimento de concretos de alto desempenho e concretos autoadensáveis, que possibilitam estruturas mais eficientes e duráveis (Mehta, Monteiro, 2014).

Dentro desse panorama de inovação e busca por eficiência, os concretos leves assumem uma relevância ímpar e se destacam pela capacidade de reduzir significativamente o peso próprio das estruturas. Estima-se que, em estruturas de concreto armado, aproximadamente 50% do esforço estrutural seja destinado a suportar apenas o peso próprio dos elementos (Mehta, Monteiro, 2014, DALY, 2000). Tal observação sublinha a necessidade premente de desenvolver materiais capazes de reduzir o peso próprio das estruturas, sem, contudo, comprometer suas propriedades mecânicas e durabilidade. Assim, pesquisas recentes têm direcionado seus esforços para a produção de concretos com incorporação de aditivos e agregados não convencionais, buscando alternativas que permitam reduzir a massa específica das estruturas, melhorar o desempenho térmico e acústico e, simultaneamente, considerar o ciclo de vida dos materiais utilizados (Ozório, 2016, Catoia, 2012).

Entre essas alternativas, o concreto leve com poliestireno expandido (EPS) tem se mostrado particularmente promissor. Estudos nacionais e internacionais vêm analisando suas

propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas, bem como seu potencial para aplicações estruturais e não estruturais (Catoia, 2012, Zumaeta Moncayo, 2017). Entretanto, um desafio persistente, e que permeia a viabilidade de sua aplicação em larga escala, reside na ausência de normas técnicas específicas que regulamentem o uso do concreto com EPS para fins estruturais no Brasil (Catoia, 2012, Ozório, 2016). Diante dessa lacuna, profissionais e pesquisadores recorrem a normas gerais de concreto leve, como a NM 35 (ABNT, 1995), ao guia ACI 213R-03 (2003) e ao Eurocode 2 (CEN, 2007), que estabelecem diretrizes para massa específica e resistência à compressão. Contudo, tais documentos não contemplam particularidades do EPS como agregado leve, limitando sua aplicabilidade direta (Ozório, 2016).

Os concretos leves apresentam benefícios relevantes, sobretudo ao reduzir a carga própria das estruturas, permitindo a otimização das dimensões dos elementos, menor consumo de materiais, fundações mais simples e diminuição dos custos totais da obra, além de mitigarem o impacto ambiental associado ao uso intensivo de recursos naturais (Agelin, 2014, Ozório, 2016). Nesse sentido, o uso do EPS se torna especialmente atrativo, não apenas por suas características físicas, mas também por questões ambientais. A reciclagem pós-consumo desse material enfrenta desafios logísticos e econômicos devido à sua baixa densidade e elevado volume, o que muitas vezes inviabiliza sua destinação adequada. A incorporação do EPS no concreto surge como alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica, conferindo ao resíduo uma nova função e contribuindo para a valorização de materiais dentro dos princípios da economia circular e da engenharia sustentável (Zumaeta Moncayo, 2017, Catoia, 2012). Assim, o concreto leve com EPS apresenta potencial para unir desempenho, eficiência e sustentabilidade, representando uma solução inovadora para a Engenharia Civil contemporânea.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é avaliar o comportamento físico-mecânico de concretos leves produzidos com pérolas de EPS, mediante o desenvolvimento e análise de diferentes dosagens com substituição de agregados graúdos, visando determinar seu potencial de

aplicação estrutural em um contexto de ausência de normatização brasileira específica, utilizando normas e diretrizes internacionais correlatas como parâmetros.

1.1.2 Objetivos específicos

- caracterizar os materiais constituintes do concreto leve com EPS, determinando suas propriedades físicas;
- desenvolver dosagens experimentais de concreto leve, explorando a substituição gradativa do agregado graúdo por pérolas de EPS, com o propósito de otimizar a relação entre desempenho mecânico e menor massa específica, em conformidade com as diretrizes da NM 35:1995 para concretos leves;
- determinar a trabalhabilidade das dosagens de concreto no estado fresco por meio do ensaio de *Slump Test*;
- avaliar as propriedades físicas do concreto no estado endurecido, incluindo massa específica e absorção de água;
- medir as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido, abrangendo resistência à compressão;
- analisar e correlacionar os resultados obtidos com a literatura científica existente, investigando a influência de cada variável de dosagem nas propriedades físico-mecânicas do material;
- discutir a viabilidade técnica e o potencial de aplicação do concreto leve com EPS em elementos estruturais, propondo diretrizes e identificando necessidades para estudos futuros, em face da ausência de normatização nacional e considerando as referências internacionais analisadas.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O crescente interesse por concretos leves se deve à busca por soluções construtivas mais eficientes, sustentáveis e com menor peso próprio. Em estruturas nas quais grande parte das solicitações provém do peso da própria construção, a utilização de concreto leve torna-se tecnicamente vantajosa e economicamente viável. Embora o custo do material possa ser superior

ao do concreto convencional, sua aplicação tende a reduzir significativamente o custo total do empreendimento, uma vez que a diminuição do peso próprio da estrutura alivia as cargas e simplifica o dimensionamento e o custo das fundações (Mehta, Monteiro, 2014).

Nesse contexto, o uso de resíduos poliméricos, como o poliestireno expandido (EPS), tem se mostrado uma alternativa promissora, contribuindo tanto para a redução de impactos ambientais quanto para a economia de recursos naturais. Amplamente utilizado pela indústria e pelo setor de embalagens, o EPS é classificado como resíduo sólido urbano não perigoso. Entretanto, devido à sua baixa densidade, elevado volume e difícil compactação, seu descarte em aterros sanitários representa um desafio ambiental significativo, agravado pelos baixos índices de reciclagem decorrentes dos altos custos logísticos (Zumaeta Moncayo, 2017). Assim, sua reutilização em concretos leves alinha-se aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabelece como prioridade a não geração, redução, reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos, incentivando o desenvolvimento de tecnologias que promovam o reaproveitamento desses materiais (Brasil, 2010).

Diante desse cenário e da crescente demanda por soluções construtivas sustentáveis e eficientes, esta pesquisa se justifica pela necessidade de aprofundar a caracterização das propriedades físico-mecânicas do concreto leve com pérolas de EPS, explorando o efeito da substituição gradual da brita por esse material. Ao investigar diferentes dosagens e avaliar parâmetros como resistência à compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica, absorção de água e trabalhabilidade, este estudo busca fornecer subsídios técnicos e científicos que apoiem o desenvolvimento de futuras diretrizes normativas e a avaliação da viabilidade estrutural desse material no contexto brasileiro. Assim, o trabalho contribuirá para a expansão do conhecimento sobre concretos leves sustentáveis, promovendo o uso mais racional de recursos naturais e a redução do impacto ambiental relacionado ao descarte do EPS, ao mesmo tempo em que favorece o desempenho estrutural por meio da diminuição do peso próprio das construções.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO CONVENCIONAL

Reconhecido como o material mais utilizado e importante da construção civil, o concreto destaca-se por sua ampla utilização e relevância. Em sua forma mais simples, o concreto é composto por quatro componentes fundamentais: cimento Portland, areia, brita e água. Essa combinação confere ao material a capacidade de ser trabalhado inicialmente, para então endurecer e, ao longo do tempo, desenvolver resistências significativas. Cada um desses materiais desempenha uma função crucial na mistura.

O cimento Portland atua como aglomerante, reagindo quimicamente com a água em um processo de hidratação que promove a união dos demais constituintes. A areia e a brita, por sua vez, são classificadas como agregados – materiais inertes que fornecem volume, contribuem para a resistência e asseguram a estabilidade do concreto. Especificamente, a areia é designada como agregado miúdo, enquanto a brita é o agregado graúdo. Já a água exerce um papel dual, sendo essencial tanto para a reação de hidratação do cimento quanto para conferir a trabalhabilidade necessária à mistura (Lucena, 2019).

O concreto está presente em diversas obras de infraestruturas, como rodovias, pontes, viadutos e edificações em geral. A combinação de fatores técnicos e econômicos dos materiais constituintes é responsável por atribuir ao concreto propriedades diversas como capacidade de ser moldado *in loco* e em diversas formas, facilidade de manipulação, transporte e aplicação, além de significativa resistência mecânica ao longo do tempo, o que contribui para sua utilização em projetos de diferentes portes. (Costa *et al.*, 2020).

2.1.1 Uso de aditivos químicos e adições minerais no concreto

Os aditivos químicos representam um componente essencial na tecnologia moderna do concreto convencional, sendo substâncias adicionadas em pequenas proporções (não excedendo 5% da massa de material cimentício) com o objetivo de modificar ou otimizar suas propriedades no estado fresco e/ou endurecido. Sua introdução permite aprimorar a trabalhabilidade, controlar os tempos de pega, influenciar a segregação e exsudação, além de potencializar a resistência

mecânica e a durabilidade, adequando o concreto a diversas condições de aplicação e requisitos de projeto, sendo os principais aditivos os redutores de água, incorporadores de ar e modificadores de pega (Martin, 2005 *apud* Lucena, 2019).

Os aditivos redutores de água, incluindo plastificantes e superplastificantes, são compostos por substâncias tensoativas aniônicas (surfactantes), como sais derivados de ácidos lignossulfônicos, ácidos carboxílicos hidroxilados e polissacarídeos. No caso dos superplastificantes, são utilizados sais sulfonados de melamina ou condensados de naftaleno formaldeído. Sua característica principal é a capacidade de reduzir a quantidade de água necessária para uma dada consistência, ou de aumentar a trabalhabilidade (abatimento e fluidez) sem alterar o teor de água. Isso ocorre pela adsorção dos surfactantes nas partículas de cimento, promovendo sua dispersão e defloculação, o que resulta em ganhos de resistência, redução do calor de hidratação e otimização do consumo de cimento (Metha, Monteiro, 2008, Neville, Brooks, 2013).

Os incorporadores de ar são também substâncias tensoativas (surfactantes), como sais de resinas de madeira ou ácidos de petróleo, projetadas para introduzir e estabilizar bolhas de ar microscópicas e distribuídas uniformemente na massa do concreto, geralmente com dimensões inferiores a 75 µm. Sua característica principal é a melhoria da trabalhabilidade, a redução da segregação e da exsudação. Além disso, as bolhas de ar incorporadas fornecem alívio para tensões internas causadas pela expansão da água durante ciclos de congelamento e degelo, aumentando a durabilidade do concreto em ambientes sujeitos a essas condições (Martin, 2005 *apud* Lucena, 2019).

Os aditivos modificadores de pega são empregados para controlar o tempo de transição do concreto do estado plástico para o endurecido. Os aceleradores de pega são tipicamente compostos orgânicos (como trietanolamina) ou inorgânicos (como hidróxidos ou sais de cloreto, sendo o cloreto de cálcio comum). Eles agem acelerando as reações de hidratação do cimento, sendo úteis em concretagens a baixas temperaturas ou quando se necessita de desforma rápida. Já os retardadores de pega, frequentemente à base de ácidos orgânicos multivalentes (cítrico, tartárico, glicônico) ou sais solúveis, aumentam o tempo de pega, o que é vantajoso em climas quentes, em transportes de longa distância ou para evitar juntas frias e fissuras em grandes lançamentos (Martin, 2005, Metha, Monteiro, 2008).

Assim como os aditivos químicos, as adições minerais também buscam modificar as características da mistura no estado fresco e endurecido, no entanto, diferentemente dos aditivos, que são predominantemente químicos, as adições minerais são de origem mineral e atuam por reações pozolânicas, cimentantes ou como preenchedores (*fillers*), contribuindo para a sustentabilidade e a economia da construção (ABNT, 1990, Lucena, 2019). Entre as principais adições minerais tem-se a sílica ativa, cinzas volantes e escória granulada de alto-forno.

A sílica ativa é uma adição pozolânica de origem artificial. Resulta da fabricação de ferrosilício e silício-metálico, sendo um subproduto formado por partículas extremamente finas, amorfas e esféricas (Mehta, Monteiro, 2014). Sua característica principal é a elevada atividade pozolânica, que reage com o hidróxido de cálcio do cimento para formar compostos hidratados adicionais (C-S-H), o que refina a microestrutura, aumenta a resistência mecânica, a durabilidade e a resistência a ataques químicos, como sulfatos e cloretos. Contudo, seu uso pode demandar um maior volume de água na mistura (LUCENA, 2019).

As cinzas volantes são outra adição pozolânica artificial, originária da queima pulverizada de carvão mineral em usinas termoeletricas (Mehta, Monteiro, 2014). Caracterizam-se por partículas finas, majoritariamente esféricas e com textura lisa, possuindo alto teor de sílica amorfa. Sua adição ao concreto proporciona uma redução do calor de hidratação, melhora a resistência a ataques ácidos e a durabilidade, além de refinar a microestrutura do material, reduzindo a permeabilidade e tornando-o mais resistente à penetração de agentes agressivos (Santos, 2006).

Por fim, a escória granulada de alto-forno é classificada como um material cimentante e provém da indústria siderúrgica, sendo um subproduto da produção de ferro-gusa em altos-fornos. É obtida pelo resfriamento brusco da escória fundida, o que a torna vítrea e granulada (Dal Molin, 2005). Sua composição é rica em silicatos e aluminosilicatos de cálcio. Apresenta hidratação lenta, mas é acelerada pela presença de hidróxido de cálcio e gipsita no concreto, conferindo propriedades cimentantes. Contribui para a redução do calor de hidratação e para o aumento da resistência a sulfatos, sendo indicada para grandes obras e ambientes agressivos (Lucena, 2019).

2.1.2 Limitações do concreto convencional

Uma desvantagem intrínseca do concreto é a fragilidade quanto ao esforço de tração. Em contraste marcante com sua notável resistência à compressão, a capacidade do concreto de resistir a forças de alongamento é limitada. Diante dessa característica, torna-se imprescindível incorporar armaduras metálicas às estruturas de concretos que sofrerão com esforços de tração. Essa prática resulta na formação do concreto armado, um material compósito que consegue suportar de forma eficaz e satisfatória tanto as tensões de compressão quanto as de tração, garantindo a integridade e o desempenho estrutural necessários (Jacintho, Giongo, 2005, Lucena, 2019).

Devido a sua massa específica, o concreto apresenta uma limitação considerável quanto ao seu elevado peso próprio. Essa característica impõe desafios significativos tanto no projeto quanto na execução de estruturas, dado que uma parcela substancial da capacidade resistente do concreto convencional é dedicada apenas a suportar sua própria massa. Em alguns estudos, estima-se que as cargas resultantes do peso próprio podem corresponder, aproximadamente, a 50% até 70% do total das solicitações atuantes sobre a estrutura. Como consequência, o dimensionamento desses elementos estruturais resulta frequentemente em seções mais robustas, em maior consumo de materiais e, conseqüentemente, no aumento das cargas transmitidas às fundações e nos custos totais da obra (Angelin, 2014, DALY, 2000, Rossignolo, Agnesini, 2005).

A ampla produção de concreto à base de cimento Portland apresenta significativas implicações para a sustentabilidade ambiental, particularmente quando se considera todo o ciclo que envolve a extração e o transporte de suas matérias-primas. Essa situação decorre, em grande parte, do elevado consumo de recursos naturais não renováveis, como a areia e a brita, que são componentes fundamentais dos agregados, somado ao impacto do processo fabril do cimento Portland no equilíbrio dos gases de efeito estufa, visto sua emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (JOHN, 2011). Diante desse cenário, a engenharia civil moderna é incentivada a buscar inovações que visem reduzir esses impactos, priorizando, assim, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais alternativos e sustentáveis, que não apenas preservem o desempenho estrutural, mas que também promovam a economia de recursos, reduzam as emissões e a valorização de resíduos.

Atualmente, diversos materiais alternativos que contribuem para confecção de concretos mais ecológicos e eficientes já estão sendo empregados na indústria da construção. Entre as soluções já consolidadas, tem-se a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, como a sílica ativa, cinzas volantes e escória granulada de alto-forno. Essa substituição, além de melhorar algumas propriedades do concreto, visa contribuir para a redução das emissões de CO₂ na atmosfera, resultando em menor consumo de cimento e, conseqüentemente, em menor produção do seu principal constituinte, o clínquer (Ozorio, 2016). Similarmente, em substituição aos agregados normais tem-se a utilização de agregados reciclados, provenientes de resíduos da construção, e agregados leves naturais ou artificiais, como a argila expandida, que tem sido amplamente investigada e aplicada nas misturas cimentícias promovendo redução do peso próprio das estruturas e valorização de fluxos de resíduos industriais (Lucena, 2019).

2.2 CONCRETO LEVE

O concreto leve representa uma evolução na engenharia de materiais, buscando otimizar o peso próprio das estruturas sem comprometer o desempenho necessário. Essa redução de massa é alcançada por meio de duas abordagens principais que resultam em tipologias distintas de concreto leve: a utilização de agregados especiais de baixa densidade ou a incorporação intencional de ar na matriz cimentícia. Ambas as estratégias visam aprimorar a funcionalidade do material, seja pela otimização estrutural ou pela melhoria de propriedades de isolamento (Catoia, 2012, Lucena, 2019).

No Brasil, o concreto leve é caracterizado pela sua massa específica reduzida, definido como um material que emprega cimento Portland como aglomerante principal, produzido com agregados leves com massa específica inferior a 2000 kg/m³, e o concreto possui massa específica inferior a 2000 kg/m³ (ABNT, 2015a). A regulamentação brasileira que orienta o uso de agregados leves para concreto estrutural leve é estabelecida pela NM 35:1995. Essa norma define as condições que esses agregados devem atender para serem empregados em concretos leves e, estendendo seus requisitos, especifica que o concreto produzido com tais agregados deve apresentar uma resistência mínima à compressão correlacionada a limites de massa específica aparente máxima. Essa relação é detalhada na Tabela 1, onde a resistência à compressão aos 28 dias é associada aos valores máximos de massa específica.

Tabela 1 - Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica aparente

Resistência à compressão (Mpa) aos 28 dias (valores mínimos)	Massa específica aparente (kg/m ³) (valores máximos)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: Elaborada pelos autores com base na NBR NM 35:1995, 2025.

Enquanto a NBR 8953:2015 classifica os concretos para fins estruturais com base em sua massa específica (entre 2000 e 2800 kg/m³ para concretos convencionais) e nos grupos de resistência mecânica, cujo limite inferior é o $f_{ck} \geq 20$ MPa para a classe C20 (ABNT, 2015c, ABNT 2023), a NM 35:1995 adota uma relação proporcional entre densidade e resistência, permitindo f_{ck} mínimos menores para concretos de baixa massa específica, desde que compatíveis com a classificação estrutural.

Diferente da normatização brasileira, o American Concrete Institute (ACI), por meio da ACI 213R-87, define o concreto leve estrutural como aquele que possui resistência à compressão superior a 17 MPa e massa específica máxima de 1850 kg/m³ (AMERICAN Concrete Institute, 1987). Complementarmente, a ASTM C330 estabelece requisitos específicos para os agregados, além de apresentar pares de valores entre resistência e massa específica, semelhante a NM 35:1995, porém com valores divergentes, para um f_{ck} mínimo de 28 MPa, tem-se uma massa específica máxima de 1760 kg/m³ (Astm International, 2004).

Realizar análises comparativas entre as normativas nacionais e internacionais oferece um referencial técnico importante para a presente pesquisa, pois permite avaliar se o concreto leve com EPS poderá alcançar desempenho compatível com os requisitos estruturais definidos pelas normativas. Embora as normas nacionais se comuniquem, não existe um elo sólido, sendo necessário pensar em uma nova normativa nacional, que trate do concreto leve para fins estruturais.

2.2.1 Concreto leve com agregados especiais

Nesta tipologia, a leveza do concreto é obtida pela substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados leves. Estes materiais granulares são caracterizados por sua baixa densidade e, frequentemente, por alta porosidade. Podem ser de origem natural, como a pedra-pomes e as escórias vulcânicas, ou de origem artificial, resultantes de processos

industriais de expansão, calcinação ou sinterização de matérias-primas. Exemplos notáveis incluem a argila expandida, a vermiculita expandida, os folhelhos expandidos, as cinzas volantes e as escórias de alto-forno (Lucena, 2019).

A argila expandida é um agregado leve artificial, fabricado a partir da queima de argilas argilominerais em fornos rotativos a altas temperaturas, resultando na expansão dos grãos devido à formação de gases em seu interior. Sua forma tende a ser arredondada ou oval, com uma textura superficial ligeiramente rugosa. Internamente, apresenta uma estrutura celular porosa, predominantemente com poros fechados, o que lhe confere baixa absorção de água e contribui para a durabilidade do concreto leve (ABNT, 1995, Lucena, 2019).

A pedra-pomes, por sua vez, é um agregado leve de origem natural, proveniente de rochas vulcânicas expelidas durante erupções e rapidamente resfriadas. Sua forma é geralmente irregular e angular, com uma textura superficial áspera e porosa. A estrutura interna da pedra-pomes é altamente vesicular, caracterizada por poros interconectados e abertos que resultam em uma porosidade comunicante. Esta característica implica uma absorção de água relativamente elevada, o que demanda atenção na dosagem de concretos para evitar variações excessivas na relação água/cimento (ABNT, 1995, Lucena, 2019).

Outro agregado leve artificial de relevância é a escória granulada de alto-forno, um subproduto da indústria siderúrgica obtido pelo resfriamento brusco da escória fundida, o que a torna vítrea e granulada. Sua forma pode variar de irregular a angular, com textura vítrea ou ligeiramente rugosa. A estrutura interna é densa, mas pode apresentar certa porosidade, e, como agregado artificial, sua porosidade tende a ser predominantemente fechada, resultando em menor absorção de água e contribuindo para a resistência a sulfatos em concretos (ABNT, 2018a, Lucena, 2019).

As cinzas volantes também são agregados leves artificiais, resultantes da combustão pulverizada de carvão mineral em usinas termoeletricas. São caracterizadas por partículas finas, majoritariamente esféricas e de textura lisa. Internamente, podem ser constituídas por esferas sólidas ou ocas (microesferas), o que contribui para sua baixa densidade e porosidade geralmente fechada. Essa estrutura minimiza a absorção de água, sendo também um material pozzolânico que melhora as propriedades da pasta de cimento, conferindo maior durabilidade e resistência ao concreto no estado endurecido (Lucena, 2019).

O emprego desses agregados em concretos confere uma redução substancial do peso estrutural. Além da diminuição de carga sobre fundações e estruturas, o concreto leve com agregados especiais também contribui para o melhoramento do isolamento térmico e acústico, e a utilização de alguns desses materiais, que são subprodutos industriais, alinha-se a práticas de sustentabilidade ao valorizar resíduos (Lucena, 2019).

2.2.2 Concreto leve celular (aerado)

O concreto leve celular (ou aerado) difere do concreto leve com agregados pela sua composição e processo de produção, onde a leveza é conferida primariamente pela incorporação de bolhas de ar na pasta de cimento, dispensando ou minimizando o uso de agregados graúdos. A produção desse material envolve a formação controlada dessas células de ar por meio de dois processos principais. O primeiro método utiliza agentes espumígenos que, ao serem adicionados à mistura, geram uma espuma pré-formada que é homogeneamente incorporada à pasta de cimento. O segundo processo envolve reações químicas diretas na mistura, como a adição de pó de alumínio, que reage com o hidróxido de cálcio do cimento, liberando gás hidrogênio que forma bolhas durante a fase plástica do concreto (Lara, 2013, LUCENA, 2019).

O concreto celular resultante, frequentemente utilizando apenas agregado miúdo finíssimo (pó de alumínio), apresenta como propriedades distintivas alta capacidade de isolamento térmico e acústico, tornando-o ideal para aplicações não estruturais como blocos de vedação, painéis divisórios, preenchimentos e camadas isolantes, devido aos desempenhos mecânico e módulo de elasticidade geralmente inferiores e menor aderência às armaduras, em comparação com o concreto leve com agregados ou com o concreto convencional (Lara, 2013, Lucena, 2019).

2.3 DOSAGEM DO CONCRETO

A dosagem do concreto é um processo fundamental na engenharia civil, visando determinar as proporções ideais dos materiais constituintes (cimento, agregados e água, com ou sem aditivos e adições) para que o concreto atinja as propriedades desejadas tanto no estado fresco quanto no endurecido. A escolha do método de dosagem e a otimização dos critérios são

cruciais para garantir a segurança, a durabilidade e a economicidade da estrutura. Existem dois métodos de dosagem: a empírica e a racional e experimental.

A dosagem empírica é caracterizada por basear-se em experiências prévias e conhecimentos generalizados, sendo aplicada em obras de menor porte ou quando não há acesso a laboratórios para ensaios. Conforme a NBR 12655:2006, sua aplicação é restrita a concretos de classes de resistência mais baixas, como C10 a C15, exigindo um consumo mínimo de cimento superior a 300 kg/m³ (ABNT, 2006). Os critérios de otimização nesse método são menos precisos, dependendo da experiência do construtor com ajustes frequentes da trabalhabilidade durante a mistura (Lara, 2013).

Já a dosagem racional e experimental é um método mais rigoroso, desenvolvido em laboratório e calibrado para as condições específicas da obra e dos materiais a serem empregados. É o método recomendado pela NBR 12655:2015 para concretos com resistências iguais ou superiores a C20, sendo essencial para concretos estruturais (ABNT, 2015a). Os principais critérios e otimizações de dosagem incluem a resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade do concreto.

A resistência mecânica é um critério primordial, cujo objetivo de dosagem é alcançar a resistência característica à compressão (f_{ck}) especificada em projeto. Para isso, este método estabelece uma resistência média (f_{cmj}) superior ao f_{ck} , incorporando um fator de segurança para compensar a dispersão estatística inerente à heterogeneidade do material (ABNT, 2015a). A otimização ocorre principalmente através da relação água-cimento (a/c), utilizando a "Lei de Abrams" que estabelece uma relação inversamente proporcional entre a/c e a resistência, de modo que se obtenha a menor relação a/c possível para a trabalhabilidade adequada (Rodrigues, 1984 *apud* Lucena, 2019).

A durabilidade constitui outro pilar da dosagem racional, garantindo que o concreto resista a agentes agressivos ao longo de sua vida útil. A NBR 12655:2015 impõe limites máximos para a relação a/c e mínimos para o consumo de cimento, conforme a classe de agressividade ambiental (I, II, III ou IV) a que a estrutura será exposta, prevenindo ataques por sulfatos, cloretos e carbonatação (ABNT, 2015a). A otimização aqui consiste em equilibrar esses requisitos com os de resistência mecânica, adotando-se os parâmetros mais conservadores.

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco também é um critério de otimização crucial, pois assegura que o material possa ser transportado, lançado, adensado e acabado de

forma homogênea. É avaliada por ensaios como o abatimento do tronco de cone (*slump test*) (ABNT, 2020). A otimização da trabalhabilidade envolve a cuidadosa seleção da granulometria e forma dos agregados, o consumo de cimento e a utilização estratégica de aditivos redutores de água e incorporadores de ar, que permitem alcançar a fluidez desejada sem comprometer a relação a/c (Guimarães, 2005).

Por sua vez, o consumo de materiais é otimizado para equilibrar desempenho e custo. A dosagem racional busca determinar a quantidade exata de cimento, agregados (miúdos e graúdos) e água necessária. Métodos como o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) exemplificam essa otimização ao detalhar etapas como a caracterização dos materiais, a determinação da relação a/c e o cálculo dos consumos, inclusive com tabelas para consumo de água e volumes compactados de agregados (Rodrigues, 1998 *apud* Lucena, 2019).

Em suma, a dosagem racional e experimental é um processo multifacetado que integra conhecimentos sobre as propriedades dos materiais, critérios de desempenho e normas técnicas para produzir um concreto que atenda com segurança e eficiência às demandas da engenharia civil.

2.4 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

O poliestireno expandido (EPS) é um material plástico celular rígido obtido a partir da polimerização do monômero estireno, seguida de expansão das partículas por meio de um agente físico, geralmente o pentano. Durante o processo industrial, as pérolas pré-polimerizadas são expandidas por aquecimento com vapor, estabilizadas e posteriormente sinterizadas em moldes, formando um produto composto por milhões de células fechadas preenchidas predominantemente por ar. Essa é responsável pela baixa massa específica e pelas propriedades de isolamento térmico, amplamente documentadas na literatura técnica (Abrapex, 2016, Abiquim, 2017). Além de ser um ótimo isolante térmico, destacam-se outras propriedades importantes para seu uso na construção civil:

- **baixa massa específica**, possibilitando significativa redução de peso próprio quando incorporado ao concreto,
- **baixa absorção de água**, favorecida pela presença de células fechadas,

- **inércia química, atoxicidade e reciclabilidade**, atributos que contribuem para seu uso sustentável (INEPS, 2015).
- **isolamento acústico**, especialmente para ruídos de impacto, em função da sua estrutura celular fechada, que favorece a dissipação vibratória (Abrapex, 2016, ABNT, 2007).

Essas propriedades explicam o amplo emprego do EPS em isolamento térmico, embalagens, componentes da construção civil e elementos de proteção mecânica e justificam seu interesse como agregado leve em concretos, especialmente quando se busca redução de massa específica e melhoria do desempenho térmico.

De acordo com Osório (2016) e Catóia (2012), quando empregado em dosagens adequadas, o uso de EPS reciclado em concretos representa uma solução ambientalmente eficaz, conciliando desempenho mecânico mínimo exigido e benefícios ambientais diretos. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, que estabelece como diretrizes prioritárias a redução, reutilização, reciclagem e valorização de resíduos, a incorporação de EPS reciclado em concretos leves se alinha diretamente aos princípios da PNRS, contribuindo para:

- redução do volume de resíduos enviados a aterros,
- diminuição da extração de agregados naturais,
- incremento da sustentabilidade de materiais cimentícios,
- aproveitamento de resíduos poliméricos de difícil degradação.

No contexto normativo brasileiro, a utilização do EPS em aplicações na construção civil é regida pela NBR 11752:2016 – Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial, que estabelece requisitos para densidade, resistência à compressão, absorção de água, condutividade térmica e demais parâmetros técnicos aplicáveis ao material. Pesquisas acadêmicas indicam que o EPS empregado na construção civil apresenta massas específicas aparentes tipicamente entre 13 e 25 kg/m³, com baixa absorção de água e elevada capacidade de isolamento térmico, conforme as faixas definidas na NBR 11752:2007 e sistematizadas por Oliveira *et al.* (2018) e pela Comissão Setorial do EPS da Abiquim (2017).

2.4.1 EPS como agregado leve

O Poliestireno Expandido (EPS) está sendo abordado em algumas literaturas em uma dualidade funcional: tanto como um agregado leve quanto como um agente incorporador de vazios. Inicialmente, em estudos sobre concreto leve com EPS, a substância é comumente referenciada como um tipo de agregado leve que substitui total ou parcialmente os agregados graúdos e, por vezes, parte dos miúdos, contribuindo diretamente para a significativa redução da massa específica do concreto (Catoia, 2012, Zumaeta Moncayo, 2017). Essa perspectiva destaca o EPS por sua forma granular, tipicamente em pérolas ou esferas, que se integram à mistura cimentícia como componentes volumétricos (Ozório, 2016).

Contudo, a discussão evolui para uma compreensão mais abrangente de sua função. Autores como Catoia (2012) e Zumaeta Moncayo (2017) ressaltam que, em uma análise mais aprofundada, e especialmente por não atuar como um material resistente que contribua significativamente para a capacidade mecânica do concreto de forma análoga a um agregado convencional, o EPS passou a ser crescentemente compreendido e classificado como um agente incorporador de vazios (Catoia, 2012, Zumaeta Moncayo, 2017). Essa designação, também utilizada por Ozório (2016), enfatiza que o principal papel do EPS é introduzir volume de ar encapsulado dentro da matriz cimentícia, através de suas pérolas de célula fechada que contêm até 98% de ar (Ozório, 2016). O termo “elementos de enchimento” (Zumaeta Moncayo, 2017, p. 42) também corrobora essa interpretação, indicando um preenchimento volumétrico para aliviar o peso, em vez de um suporte estrutural.

Dessa forma, os trabalhos analisados convergem para a ideia de que, independentemente da terminologia exata, seja agregado leve ou agente incorporador de vazios, a presença do EPS no concreto visa primordialmente a redução da massa específica do material. A distinção, embora sutil, reside na percepção de sua contribuição para a resistência: enquanto os agregados leves tradicionais podem ter alguma participação estrutural, o EPS é reconhecido por nenhuma contribuição mecânica, agindo mais como um meio de introduzir leveza através de vazios controlados. Assim, a incorporação do EPS no concreto é um mecanismo eficaz para otimizar o peso próprio das estruturas, deslocando agregados mais densos e, fundamentalmente, preenchendo o volume com um material ultraleve. Dessa forma, ao tratá-lo como agregado,

entende-se que ele atua no preenchimento volumétrico e não em alguma contribuição mecânica para o concreto.

2.4.2 Aplicações do EPS em concretos leves

A literatura nacional e internacional registra o emprego do EPS em concretos de baixa densidade fundamentalmente no âmbito de pesquisas experimentais, principalmente pela substituição parcial do agregado graúdo, objetivando reduzir a massa específica e melhorar o desempenho térmico e acústico do material. Diversos autores (Catóia, 2012, Ozório, 2016, Zumaeta Moncayo, 2017) apontam aplicações como:

- **lajes nervuradas com blocos de EPS** para redução de peso próprio,
- **painéis pré-moldados leves**, empregados em vedações,
- **elementos de cobertura com função térmica**,
- **regularização e enchimento de pisos**, quando predominam requisitos de leveza e isolamento.

No Brasil, a NBR 8953:2015 estabelece que o concreto leve estrutural deve empregar agregados leves reconhecidos como estruturais, tais como argila expandida, escória expandida e pedra-pomes (ABNT, 2015). Dessa forma, o EPS não é enquadrado pela ABNT como agregado estrutural, devendo seu uso restringir-se, normativamente, a aplicações não estruturais.

Entretanto, normas internacionais, como a NM 35:1995 — Agregados leves para concreto estrutural, adotam uma lógica classificatória baseada no desempenho do concreto, especialmente quanto à massa específica e à resistência característica, independentemente da origem específica do agregado leve utilizado. Isso abre espaço para investigações experimentais, desde que devidamente justificadas no campo acadêmico, permitindo explorar materiais alternativos que potencialmente se enquadrem nas faixas de desempenho definidas para concretos leves estruturais.

Assim, o uso do EPS no presente estudo possui caráter experimental, buscando avaliar se, em determinadas proporções e com controle tecnológico adequado, o concreto obtido pode alcançar níveis mínimos de desempenho compatíveis com classificações de concretos leves. Tal investigação contribui para o avanço científico e pode futuramente subsidiar discussões técnicas

sobre potenciais revisões normativas, especialmente diante da relevância ambiental associada ao reaproveitamento de resíduos poliméricos.

2.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O concreto no estado fresco corresponde à fase imediatamente posterior à mistura dos seus constituintes na qual o material apresenta consistência plástica e capacidade de ser moldado. Suas propriedades nessa etapa são determinantes para o desempenho final, influenciando diretamente a compactação, a homogeneidade interna, a formação da zona de transição e, por consequência, o desenvolvimento das resistências mecânicas (Mehta, Monteiro, 2014). A adequada caracterização do concreto fresco também é essencial para evitar defeitos como segregação, exsudação e adensamento insuficiente, os quais podem comprometer a durabilidade e o módulo de elasticidade da mistura (Neville, Brooks, 2013).

Dentre os parâmetros mais relevantes nessa fase estão:

- **Trabalhabilidade**, verificada por ensaios padronizados como o abatimento do tronco de cone,
- **Massa específica do concreto fresco**, associada à qualidade do adensamento e à proporção entre pasta, agregado e ar aprisionado.

A trabalhabilidade do concreto fresco corresponde à facilidade com que a mistura pode ser moldada, adensada e acabada sem perda significativa de homogeneidade. Essa propriedade está diretamente associada à consistência, à coesão interna e à mobilidade da mistura, sendo fortemente influenciada pela relação água/cimento, pela granulometria dos agregados e pela presença de materiais de baixa densidade, como o poliestireno expandido (EPS) (Neville, Brooks, 2013).

A avaliação da trabalhabilidade do concreto é realizada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), procedimento adotado no Brasil para concretos convencionais e padronizado pela NBR 16889:2020 – Concreto fresco — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Essa norma estabelece o equipamento, as condições de moldagem, a execução do ensaio e a forma correta de leitura do abatimento, permitindo quantificar a consistência da mistura e verificar sua adequação à aplicação proposta (ABNT, 2020). A utilização da NBR 16889:2020 é particularmente relevante para concretos modificados com EPS,

uma vez que a presença do agregado leve tende a alterar a coesão e a fluidez da mistura. Assim, o ensaio de abatimento viabiliza a comparação entre os teores de substituição do agregado gráúdo por EPS, indicando possíveis efeitos sobre a mobilidade, segregação e estabilidade do concreto fresco.

Por sua vez, a massa específica do concreto fresco é uma propriedade fundamental para a caracterização inicial da mistura, permitindo avaliar sua uniformidade, o teor de ar incorporado e possíveis variações decorrentes da utilização de agregados leves, como o poliestireno expandido (EPS). Essa grandeza está diretamente relacionada à composição dos materiais, à proporção entre os constituintes e ao grau de adensamento alcançado durante o processo de mistura (Neville, Brooks, 2013).

A massa específica do concreto no estado fresco é determinada pelo método gravimétrico, conforme NBR 9833:2009 — Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar. O ensaio é realizado, utilizando recipiente calibrado (volume conhecido), balança com resolução adequada e utensílios de adensamento (ABNT, 2009). A determinação da massa específica do concreto fresco, conforme previsto nas normas técnicas, constitui parâmetro fundamental para a avaliação da densidade inicial da mistura e para a identificação de possíveis efeitos da presença de agregados leves, como o EPS. Em estudos que investigam concretos de baixa densidade, esse valor costuma ser empregado como referência para análises comparativas com a massa específica do concreto endurecido, geralmente obtida segundo a NBR 9778:2009, além de servir como indicador preliminar do possível enquadramento da mistura nas faixas definidas pela NBR 8953:2015 para concretos leves.

2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O concreto no estado endurecido apresenta propriedades fundamentais que determinam seu desempenho estrutural e funcional ao longo da vida útil da construção. Entre essas propriedades, destacam-se a massa específica, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a absorção de água e a durabilidade. Tais características são influenciadas pela composição da mistura, pelas condições de cura e pelo tipo de agregado utilizado (Neville, Brooks, 2013). Em relação ao concreto convencional, essas propriedades refletem a consolidação da matriz cimentícia, o grau de hidratação e a interação entre pastas e agregados.

O comportamento do concreto endurecido está diretamente relacionado à microestrutura formada após a hidratação, à qualidade da zona de transição (ZTA) e à distribuição granulométrica dos agregados, aspectos descritos em profundidade em obras clássicas como as de Neville (2016). Quando agregados leves são incorporados, como no caso do poliestireno expandido (EPS), ocorrem alterações sensíveis nessas propriedades. A redução da massa específica do compósito tende a ser acompanhada por diminuição da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, devido às características intrinsecamente frágeis e porosas desses materiais (Ozório, 2016, Zumaeta Moncayo, 2017).

Embora a NM 35:1995 não trate especificamente do EPS como agregado, os parâmetros nela previstos servem como referência de desempenho para concretos leves de caráter estrutural. Assim, pesquisas que analisam a substituição parcial do agregado gráúdo por EPS podem utilizar esses valores como metas comparativas, avaliando experimentalmente se a mistura obtida apresenta comportamento compatível com o enquadramento de concretos leves segundo as normas brasileiras.

A caracterização do concreto no estado endurecido envolve ensaios normativos que permitem avaliar seu comportamento mecânico e físico após o processo de cura. A resistência à compressão axial, determinada segundo a NBR 5739:2018, permanece como o parâmetro mais utilizado para estimar o desempenho estrutural. Já o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, avaliados conforme a NBR 8522-1:2021 e NBR 8522-2:2021, respectivamente, complementam essa análise ao descrever a rigidez do material e sua resposta deformacional sob carregamento.

Do ponto de vista físico, a massa específica e a absorção de água, determinadas segundo a NBR 9778:2020, fornecem informações sobre porosidade, densidade e durabilidade, aspectos essenciais em concretos contendo agregados leves como o EPS. A integração desses resultados permite comparar concretos convencionais e leves, além de verificar o enquadramento nas classes estabelecidas pela NBR 8953:2015.

2.7 NORMATIZAÇÃO APLICÁVEL E LACUNAS TÉCNICAS

A normatização brasileira referente ao concreto leve ainda apresenta restrições importantes quando se pretende empregar agregados não convencionais, como materiais

produzidos com agregados poliméricos, como o caso do EPS. A principal referência no Brasil para classificação do concreto segundo sua massa específica e resistência compatível com as classes usuais de projeto é a NBR 8953:2015. Embora forneça limites e parâmetros gerais, a norma não estabelece critérios específicos para concretos produzidos com agregados não convencionais, restringindo-se a requisitos globais de desempenho. Complementarmente, a NBR 6118:2023, norma geral de projeto estrutural, reforça que o concreto utilizado em elementos estruturais deve possuir resistência característica compatível com as solicitações e comportamento mecânico adequadamente conhecido. A norma não cita concretos leves de EPS, mas admite, em caráter geral, o uso de concretos não convencionais desde que exista comprovação experimental e normativa de desempenho, o que reforça a necessidade de pesquisas como a presente.

No âmbito do Mercosul, a NM 35:1995 é a principal referência para classificação de concretos produzidos com agregados leves. A norma estabelece valores mínimos de resistência por faixas de massa específica e descreve critérios de caracterização, porém não vincula o enquadramento estrutural ao tipo de agregado empregado, tampouco menciona materiais poliméricos. Em seu escopo, a classificação depende unicamente dos resultados de desempenho, o que abre espaço conceitual para investigar concretos com EPS como potenciais candidatos à categoria estrutural, desde que atendam aos limites estabelecidos para f_{ck} e massa específica.

Além do arcabouço normativo brasileiro e mercosulino, existem referências internacionais amplamente utilizadas para enquadramento e caracterização de concretos leves. Documentos como a ACI 213R-03, a ASTM C330/C330M e o Eurocode 2 estabelecem critérios bem definidos para concretos de baixa densidade e desempenhos mecânicos mínimos. Contudo, é importante destacar que essas normas, embora mais antigas e frequentemente aplicadas em contextos industriais, concentram-se exclusivamente em agregados minerais expandidos ou naturais, tais como argila expandida, escória expandida, pumicita ou perlita, não contemplando em nenhum momento o EPS como possível agregado leve.

Assim, a diferença entre os cenários não representa propriamente um contraste, mas sim abordagens normativas com escopos distintos. Enquanto as normas internacionais apresentam histórico mais extenso sobre concretos leves convencionais, o sistema Mercosul, por meio da NM 35:1995, estabelece critérios de classificação que dependem essencialmente do desempenho final (massa específica e resistência), sem restringir o tipo de agregado utilizado, embora também

não faça menção específica ao EPS. Já o Brasil, por meio da NBR 8953:2015, define parâmetros para enquadramento dos concretos leves estruturais, mas igualmente não prevê qualquer diretriz relativa ao uso de agregados poliméricos.

Esse panorama revela que, em todos esses sistemas normativos, a ausência não está na definição do concreto leve estrutural, que é bem estabelecida, mas sim na inexistência de diretrizes específicas para concretos com EPS, resultando em uma lacuna comum entre Brasil, Mercosul, Estados Unidos e Europa. Trata-se, portanto, de um vazio normativo compartilhado, e não de algo exclusivo do contexto brasileiro.

Adicionalmente, existe uma discussão importante sobre a própria classificação do EPS. Embora seja um material extremamente leve, de baixa absorção de água e quimicamente inerte, suas propriedades mecânicas diferem substancialmente dos agregados minerais leves previstos nas normas internacionais. A literatura aponta que o EPS possui características típicas de agregados leves — como forma granular, baixa densidade e contribuição volumétrica —, mas também características atípicas, como elevada deformabilidade, o que levanta questionamentos sobre enquadramento técnico apropriado. Essa controvérsia, inclusive, é citada em diferentes trabalhos como Catóia, 2012, Ozório, 2016 e Zumaeta Moncayo, 2017, reforçando que sua classificação depende mais do desempenho final da mistura do que da natureza do material.

Diante desse conjunto de fatores, avanço normativo limitado, ausência de diretrizes específicas para EPS, divergências conceituais sobre sua natureza enquanto agregado e dependência de comprovação experimental, forma-se uma lacuna normativa significativa. É essa lacuna que tem motivado diversas pesquisas brasileiras, que buscam investigar parâmetros físico-mecânicos, identificar condicionantes de desempenho e avaliar a possibilidade de enquadramento do concreto com EPS dentro das classes estruturais previstas pelas normas vigentes.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa experimental, de natureza qualitativa e com finalidade exploratória, conduzida por meio da produção e ensaio de corpos de prova de concreto leve estrutural com diferentes teores de substituição do agregado gráúdo por pérolas de poliestireno expandido (EPS). As etapas de dosagem, moldagem, cura e ensaios seguiram os procedimentos normativos aplicáveis já descritos no referencial teórico deste

trabalho e serão organizadas de forma sistemática para permitir a comparação entre os traços propostos.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram adotadas as seguintes etapas metodológicas:

- I. Estudo bibliográfico por meio da análise de artigos, teses, dissertações e normas técnicas pertinentes ao tema. Essa etapa permitiu identificar metodologias empregadas em estudos anteriores, parâmetros de dosagem, abordagens experimentais e resultados obtidos na investigação de concretos leves e do uso de EPS como agregado alternativo, bem como normas que norteiam a sua produção e seu emprego. O conjunto dessas fontes forneceu o embasamento teórico necessário para orientar a fase experimental deste trabalho.
- II. Fase experimental. Esta etapa foi estruturada a partir da definição dos traços propostos, da moldagem dos corpos de prova e da realização dos ensaios necessários para a caracterização física e mecânica do material. Nesta etapa, serão executados os ensaios de abatimento (slump), massa específica no estado fresco e, após o processo de cura, os ensaios de resistência à compressão axial, massa específica do concreto endurecido e absorção de água, todos conforme as normas técnicas já apresentadas no referencial teórico.
- III. Fase dos resultados, análise e interpretação de dados. Nesta etapa os resultados obtidos nos ensaios serão organizados, tabulados e interpretados, permitindo a comparação entre os diferentes teores de substituição por EPS. Essa análise buscará identificar tendências de comportamento, relacionar propriedades físicas e mecânicas e verificar se os concretos produzidos atendem aos critérios normativos e às expectativas definidas nos objetivos do estudo.
- IV. Conclusão da pesquisa. Esta etapa final consistirá na integração dos achados experimentais e teóricos, permitindo avaliar o desempenho dos concretos com substituição parcial por EPS e verificar seu potencial de classificação como concreto leve estrutural. A conclusão sintetizará os principais resultados, apontará eventuais limitações e indicará possibilidades de continuidade para pesquisas futuras.

3.1 TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para o desenvolvimento dos traços, realizou-se, inicialmente, uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de identificar uma dosagem de referência composta por sílica ativa, cimento Portland CP V-ARI, areia, brita gnaisse como agregado graúdo e aditivo superplastificante, de modo que a mistura apresentasse resistência final à compressão próxima a 50 MPa. Posteriormente, foi calculada a quantidade de EPS a ser incorporada à mistura, em substituição parcial aos agregados miúdos e graúdos, com o objetivo de obter dosagens com massas específicas aproximadas de 19 kN/m³ e 18 kN/m³. Dessa forma, foram obtidos os traços em massa apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2: Representação dos traços em proporção mássica

Traço	Massa específica estimada (kg/m ³)	CP V-ARI	Sílica ativa	Areia	Brita gnaisse	EPS	Água	Superplastificante
T0	2360	1,00	0,10	1,44	2,33	0,000	0,34	0,02
T1	1900	1,00	0,10	1,05	1,70	0,008	0,34	0,02
T2	1900	1,00	0,10	1,14	1,61	0,008	0,34	0,02
T3	1800	1,00	0,10	0,88	1,42	0,011	0,34	0,02

Fonte: Elaborada pelos autores

Dessa forma, o traço T0 corresponde à dosagem de referência, sem a incorporação de EPS. Os traços T1 e T2 foram elaborados com o objetivo de atingir massa específica aproximada de 1900 kg/m³, diferenciando-se entre si pela proporção de substituição dos agregados por EPS. No traço T1, a substituição foi realizada em proporções equivalentes de areia e brita, enquanto no traço T2 adotou-se a retirada de 70% de brita e 30% de areia. Já o traço T3 manteve a proporção de substituição dos agregados utilizada no T1, porém com o objetivo de alcançar massa específica aproximada de 1800 kg/m³.

3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, em conformidade com a ABNT NBR 5738. Para cada traço, foram confeccionados oito corpos de prova, dos quais dois foram destinados ao ensaio de resistência à compressão aos 7 dias e três ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, conforme a ABNT

NBR 5739. Os três corpos de prova restantes foram utilizados para a determinação da massa úmida e massa seca, seguindo os procedimentos da ABNT NBR 9778.

Ao iniciar a confecção dos traços, todos os materiais foram dosados em massa, conforme as proporções apresentadas na Tabela 2. A mistura foi realizada em betoneira com capacidade de 90 L, seguindo a seguinte sequência de incorporação dos materiais: agregado graúdo, água com o aditivo superplastificante previamente diluído, cimento, agregado miúdo, sílica ativa e, por fim, o EPS. A betoneira permaneceu em funcionamento por aproximadamente 5 minutos, até que a mistura apresentasse aspecto homogêneo.

Após a homogeneização da mistura, foi retirada uma amostra para a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67. Posteriormente, foram moldados os corpos de prova. Logo após a moldagem, realizou-se a determinação da massa dos corpos de prova ainda no estado fresco, com o objetivo de verificar preliminarmente se a dosagem havia atingido a massa específica desejada.

Após 24 horas de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados e, em seguida, acondicionados em cura submersa, em água saturada com hidróxido de cálcio e sob temperatura controlada. Decorridos sete dias de cura, foram retirados dois corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão e três corpos de prova destinados à determinação da massa úmida e da massa seca.

O ensaio de determinação da massa seca não foi realizado integralmente conforme o procedimento previsto pela NBR 9779, uma vez que a temperatura de 100 °C poderia ocasionar a degradação do EPS presente na composição do concreto. Dessa forma, a estufa foi ajustada para 60 °C, visando preservar as características do material. Após 24 horas de secagem inicial, iniciou-se o acompanhamento da variação de massa dos corpos de prova, com pesagens realizadas a cada 4 horas. A massa foi considerada estabilizada quando a diferença entre duas pesagens sucessivas foi igual ou inferior a 0,5% da última massa medida.

Após 28 dias foram rompidos o restante das amostras e coletados seus valores.

4 COLETA DE DADOS, TRATAMENTO E DISCUSSÃO

De acordo com os passos dados na metodologia foi possível coletar os dados organizá-los em tabelas, interpretar e discutir os valores obtidos.

4.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DO CONCRETO (SLUMP TEST).

Após a mistura do concreto em betoneira, foi retirada uma porção suficiente da amostra para a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, com o objetivo de avaliar a consistência e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16889. Dessa forma, os valores obtidos para cada traço são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: valores do ensaio de abatimento do concreto

Traço	Valor Obtido (mm)
T0	120
T1	100
T2	95
T3	160

Fonte: Elaborada pelos autores

Vale ressaltar que, no traço T3, observou-se um comportamento atípico durante a realização do ensaio de abatimento. Após a retirada do molde tronco-cônico e realizada a medida da altura do cone, a amostra apresentou desmoronamento, embora demonstrasse certa fluidez aparente compatível com o valor medido. Esse comportamento pode estar associado à maior quantidade de EPS incorporada à mistura, em comparação aos demais traços, uma vez que o aumento do teor desse material tende a interferir na coesão interna, na estabilidade da matriz cimentícia e na distribuição dos agregados no concreto fresco.

4.2 MASSA ÚMIDA E MASSA SECA.

Após a secagem dos corpos de prova em estufa com temperatura controlada, os valores correspondentes às massas úmida e seca foram organizados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de massa fresca, massa úmida, massa seca estabilizada e absorção de água nos corpos de prova

Traço	Massa Fresca (g)	Massa úmida (g)	Massa seca 24H (g)	Massa seca 28H (g)	Massa seca 32H (g)	% de Estabilização	Absorção de água
T0	3890	3890	3870	3866	3864	0,05%	0,67%
	3886	3884	3860	3850	3844	0,16%	1,03%
	3896	3900	3876	3870	3866	0,10%	0,87%

T1	3000	2970	2930	2930	2926	0,14%	1,48%
	2965	2986	2966	2956	2952	0,14%	1,14%
	3012	2978	2948	2944	2940	0,14%	1,28%
T2	2960	2954	2926	2914	2912	0,07%	1,42%
	2930	2936	2890	2880	2876	0,14%	2,04%
	2936	2940	2894	2886	2882	0,14%	1,97%
T3	2600	2630	2574	2570	2564	0,23%	2,51%
	2490	2526	2476	2460	2452	0,33%	2,93%
	2546	2580	2530	2510	2506	0,16%	2,87%

Fonte: Elaborada pelos autores

Após a constatação da estabilização da massa seca, calculou-se a absorção de água individual de cada corpo de prova por meio da relação entre a massa úmida e a massa seca estabilizada. Para cada traço, foram determinados a média aritmética, o desvio padrão amostral e a absorção média de água. Ressalta-se que, devido à presença de EPS na composição do concreto, o procedimento de secagem foi adaptado, utilizando-se temperatura de 60 °C, com o objetivo de evitar possível degradação do polímero. Assim, os valores obtidos representam a massa seca estabilizada pelo procedimento experimental adotado. Dessa forma, a Tabela 5 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 5: resumo estatístico da massa úmida, massa seca e absorção de água por traço

Traço	n	Massa úmida média (g)	DP massa úmida (g)	Massa seca média (g)	DP massa seca (g)	Absorção de água média (%)	DP absorção (%)
T0	3	3891,33	8,08	3858,00	12,17	0,86	0,18
T1	3	2978,00	8,00	2939,33	13,01	1,32	0,18
T2	3	2943,33	9,45	2890,00	19,29	1,85	0,35
T3	3	2546,00	52,01	2507,33	56,01	2,85	0,24

Fonte: Elaborada pelos autores

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5: resumo estatístico da massa úmida, massa seca e absorção de água por traço, observa-se uma redução progressiva das massas médias dos corpos de prova entre os traços T0, T1, T2 e T3. Esse comportamento está diretamente associado à incorporação de EPS na matriz cimentícia, uma vez que esse material possui massa específica significativamente inferior à dos agregados convencionais. Assim, à medida que se aumenta a presença de EPS na composição, ocorre a redução da massa seca e da massa úmida dos corpos de prova.

Em relação à absorção de água, verifica-se um aumento gradual dos valores médios, passando de 0,86% no traço T0 para 2,85% no traço T3. Esse aumento indica que os concretos com maior teor de EPS apresentaram maior quantidade de vazios acessíveis ou maior porosidade

na matriz cimentícia. Entretanto, é importante destacar que esse comportamento não significa que o EPS absorva água de forma significativa. O EPS atua, na prática, como um material leve e com comportamento semelhante a um incorporador de vazios, contribuindo para o aumento do volume de espaços internos no concreto. Porém, por ser um polímero de células fechadas, o EPS apresenta baixa absorção de água.

Dessa forma, o aumento da absorção observado nos traços com EPS está mais relacionado à maior porosidade da matriz cimentícia e às interfaces entre o EPS e a pasta de cimento do que à absorção pelo próprio EPS. Ou seja, embora o concreto com EPS apresente maior índice de vazios, esses vazios não representam necessariamente absorção interna pelas pérolas de EPS, mas sim espaços existentes na matriz e na zona de transição entre os materiais.

Também se observa que o traço T3 apresentou os maiores desvios padrão para massa úmida e massa seca, indicando maior variabilidade entre os corpos de prova. Isso pode estar associado à dificuldade de homogeneização do EPS na mistura, devido à sua baixa densidade e tendência à segregação. Mesmo assim, os valores médios demonstram uma tendência coerente com o objetivo do estudo: reduzir a massa do concreto por meio da substituição parcial dos agregados convencionais por EPS, mantendo o controle da absorção de água em níveis relativamente baixos.

4.3 PESO ESPECÍFICO SECO CALCULADO.

Com base nos valores de massa seca apresentados na Tabela 5, foi possível calcular o peso específico seco dos corpos de prova, considerando suas dimensões geométricas utilizadas no ensaio.

Tabela 6: Peso específico calculado

Traço	n	Massa seca média	DP massa seca	Peso específico seco (kN/m ³)	DP Peso específico seco (kN/m ³)
T0	3	3858,00	12,17	24,09	0,08
T1	3	2939,33	13,01	18,36	0,08
T2	3	2890,00	19,29	18,05	0,12
T3	3	2507,33	56,01	15,66	0,35

Fonte: Elaborada pelos autores

A partir dos valores de massa úmida e massa seca dos corpos de prova, foi calculado o peso específico dos concretos, considerando o volume geométrico dos corpos de prova

cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os resultados indicaram redução progressiva do peso específico com o aumento da incorporação de EPS. O traço de referência T0 apresentou peso específico seco médio de 24,09 kN/m³, enquanto os traços T1, T2 e T3 apresentaram, respectivamente, 18,36 kN/m³, 18,05 kN/m³ e 15,66 kN/m³.

Os coeficientes de variação das massas foram baixos para a maioria dos traços, indicando boa repetibilidade experimental. O traço T3 apresentou maior dispersão, possivelmente devido à maior quantidade de EPS e à consequente dificuldade de homogeneização da mistura.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.

Após 7 dias de cura úmida, foram retirados dois corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão. Aos 28 dias, foram retirados mais três corpos de prova, também destinados ao ensaio de compressão axial, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5739. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 7 e 28 dias

Traço	Resistência a Compressão 7 dias (kN)	Resistência a Compressão 7 dias (Mpa)	Resistência a Compressão 28 dias (kN)	Resistência a Compressão 28 dias (Mpa)
T0	393,83	50,17	505,32	64,34
	442,13	56,32	505,42	64,35
T1	128,53	16,37	157,23	19,38
	116,51	14,84	170,02	21,65
T2	76,06	9,69	107,41	13,68
	79,58	10,14	86,38	14,25
T3	42,4	5,40	86,38	11,00
	49,03	6,25	24,64	9,14

Fonte: Elaborada pelos autores

Com base nos dados apresentados na Tabela 7, foi possível calcular a resistência média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada traço, considerando as idades de cura de 7 e 28 dias conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Tratamento estatístico da resistência à compressão axial

Traço	Idade	Nº de corpos de prova	Resistência média	Desvio padrão	Coeficiente de variação
T0	7 dias	2	53,25 MPa	4,35 MPa	8,17%
T0	28 dias	3	64,35 MPa	0,01 MPa	0,02%
T1	7 dias	2	15,61 MPa	1,08 MPa	6,93%
T1	28 dias	3	20,52 MPa	1,61 MPa	7,83%

T2	7 dias	2	9,92 MPa	0,32 MPa	3,21%
T2	28 dias	3	14,87 MPa	0,40 MPa	2,88%
T3	7 dias	2	5,83 MPa	0,60 MPa	10,32%
T3	28 dias	3	10,07 MPa	1,32 MPa	13,11%

Fonte: Elaborada pelos autores

Os resultados de resistência à compressão axial indicaram redução significativa da capacidade resistente dos concretos com incorporação de EPS em relação ao traço de referência T0. Esse comportamento era esperado, uma vez que as pérolas de EPS apresentam baixa rigidez e baixa resistência mecânica quando comparadas aos agregados minerais convencionais. Assim, à medida que houve aumento do teor de EPS e redução da quantidade de agregados naturais, observou-se diminuição progressiva da resistência à compressão dos traços T1, T2 e T3.

Além da redução da resistência média, também foi observada maior dispersão em alguns resultados, evidenciada pelos coeficientes de variação obtidos. Essa variação pode estar associada não apenas ao número reduzido de corpos de prova, mas também à própria dificuldade de homogeneização do EPS na matriz cimentícia. Durante a análise dos corpos de prova após a ruptura, observou-se que a distribuição das pérolas de EPS não ocorreu de maneira uniforme ao longo da altura dos corpos de prova. De modo geral, verificou-se menor concentração de EPS na região inferior e maior concentração na região superior.

Essa distribuição não homogênea interfere diretamente nos resultados mecânicos, pois as regiões com maior presença de EPS tornam-se mais frágeis e menos resistentes aos esforços aplicados. Dessa forma, durante o ensaio de compressão, é provável que as zonas com maior concentração de EPS tenham iniciado o processo de fissuração e cisalhamento antes das regiões com maior presença de agregado mineral. Esse comportamento contribui para a variabilidade dos resultados e evidencia uma limitação importante no uso do EPS em concretos com finalidade estrutural.

Caso fosse considerada a aplicação do concreto com EPS em elementos estruturais, a tendência de segregação e ascensão das pérolas de EPS representaria um desafio relevante. Em situações reais de execução, como lançamento por bombeamento, adensamento e vibração, o EPS poderia migrar para regiões superiores do elemento, formando zonas com diferentes concentrações de agregado leve. Como consequência, o elemento de concreto poderia apresentar regiões com resistências distintas, comprometendo a uniformidade mecânica e o desempenho estrutural.

Outro comportamento observado durante o ensaio foi a variação atípica da força aplicada. Em alguns corpos de prova, a carga aumentava de forma relativamente constante até determinado ponto, sofria uma queda considerável e, posteriormente, voltava a crescer até atingir um novo pico, superior ao anterior. Esse comportamento difere do observado em concretos convencionais sem EPS, nos quais a ruptura tende a ocorrer de forma mais direta após o pico de carregamento. A presença do EPS pode ter contribuído para esse comportamento devido à formação de zonas frágeis localizadas, redistribuição interna de tensões e progressão não uniforme das fissuras ao longo do corpo de prova.

Portanto, os resultados demonstram que a incorporação de EPS reduziu a resistência à compressão e aumentou a complexidade do comportamento mecânico do concreto. Embora o material apresente potencial para redução da massa específica, sua utilização em concretos com finalidade estrutural exige maior controle tecnológico, especialmente quanto à homogeneização da mistura, estabilidade do EPS durante o lançamento e adensamento, além da avaliação da variabilidade das propriedades mecânicas ao longo do elemento produzido.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento físico-mecânico de concretos produzidos com incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS), buscando analisar seu potencial de aplicação como concreto leve e verificar sua possível compatibilidade com parâmetros de desempenho associados ao uso estrutural. Para isso, foi desenvolvido um traço de referência, denominado T0, sem adição de EPS, e três traços modificados, T1, T2 e T3, nos quais parte dos agregados convencionais foi substituída por EPS, com o propósito de reduzir a massa específica do concreto.

Inicialmente, a caracterização dos concretos no estado fresco, realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, permitiu avaliar a influência da incorporação de EPS na trabalhabilidade das misturas. O traço de referência T0 apresentou abatimento de 120 mm, indicando boa consistência para moldagem dos corpos de prova. Os traços T1 e T2, ambos com incorporação de EPS e massa específica estimada próxima de 19 kN/m³, apresentaram abatimentos de 100 mm e 95 mm, respectivamente, demonstrando redução moderada da trabalhabilidade em relação ao traço de referência. Esse comportamento pode estar associado à

alteração da composição granulométrica da mistura e à presença do EPS, que interfere na coesão interna e na mobilidade do concreto fresco.

O traço T3, por sua vez, apresentou abatimento de 160 mm, valor superior aos demais traços. Entretanto, durante a realização do ensaio, observou-se comportamento atípico, caracterizado pelo desmoronamento da amostra após a leitura do valor do ensaio de abatimento do concreto. Embora o valor medido indicasse maior fluidez aparente, o desmoronamento sugere perda de estabilidade da mistura, possivelmente relacionada ao maior teor de EPS incorporado. Esse comportamento evidencia que, para concretos leves com EPS, o valor de abatimento isoladamente pode não representar de forma completa a qualidade da trabalhabilidade, sendo necessário observar também aspectos como coesão, estabilidade, segregação e homogeneidade da mistura.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a incorporação de EPS foi eficiente para reduzir significativamente o peso específico dos concretos. O traço de referência T0 apresentou peso específico seco médio de 24,09 kN/m³, valor compatível com concretos convencionais. Já os traços com EPS apresentaram reduções expressivas, atingindo 18,36 kN/m³ no T1, 18,05 kN/m³ no T2 e 15,66 kN/m³ no T3. Esses resultados confirmam que a substituição parcial dos agregados minerais por EPS é uma alternativa eficaz para obtenção de concretos de menor densidade, uma vez que o EPS possui massa específica muito inferior à da areia e da brita.

Em relação à absorção de água, observou-se aumento gradual conforme a elevação da incorporação de EPS. O traço T0 apresentou absorção média de 0,86%, enquanto os traços T1, T2 e T3 apresentaram, respectivamente, 1,32%, 1,85% e 2,85%. Esse comportamento indica que os concretos com EPS apresentaram maior volume de vazios ou maior porosidade acessível na matriz cimentícia. No entanto, é importante ressaltar que esse aumento não deve ser atribuído diretamente à absorção de água pelo EPS, uma vez que esse material possui estrutura de células fechadas e baixa absorção. Assim, os maiores valores de absorção estão mais relacionados à formação de vazios na pasta de cimento e à zona de transição entre as pérolas de EPS e a matriz cimentícia.

Quanto ao desempenho mecânico, os resultados indicaram redução acentuada da resistência à compressão axial com o aumento da incorporação de EPS. O traço T0 alcançou resistência média de 64,35 MPa aos 28 dias, demonstrando que o traço de referência atingiu comportamento compatível com concreto de alto desempenho. Por outro lado, os traços com EPS

apresentaram resistências médias de 20,52 MPa para T1, 14,87 MPa para T2 e 10,07 MPa para T3, aos 28 dias. Dessa forma, embora os traços modificados tenham apresentado redução significativa do peso específico, essa redução foi acompanhada por perda expressiva de resistência mecânica.

Entre os traços com EPS, o T1 foi o que apresentou o melhor equilíbrio entre redução de peso específico e resistência à compressão. Com peso específico seco de 18,36 kN/m³ e resistência média de 20,52 MPa aos 28 dias, esse traço aproximou-se dos parâmetros mínimos normalmente associados a concretos leves com potencial estrutural em algumas referências normativas e bibliográficas. Entretanto, apesar desse desempenho comparativamente superior aos demais traços com EPS, ainda é necessário cautela quanto à sua classificação como concreto leve estrutural, uma vez que a resistência obtida representa resultado médio experimental e não resistência característica de projeto. Além disso, o número reduzido de corpos de prova e a dispersão observada em alguns ensaios impedem uma afirmação definitiva sobre sua viabilidade estrutural.

O traço T2, apesar de apresentar peso específico seco semelhante ao T1, com 18,05 kN/m³, obteve resistência média consideravelmente inferior, de 14,87 MPa aos 28 dias. Esse resultado evidencia que a forma como a substituição dos agregados é realizada influencia diretamente o desempenho mecânico do concreto. Mesmo com massa específica próxima, a distribuição dos materiais e a proporção de retirada entre areia e brita podem alterar a compacidade, a continuidade da matriz resistente e a capacidade de transferência de tensões. Já o traço T3, embora tenha apresentado a maior redução de peso específico, atingindo 15,66 kN/m³, apresentou a menor resistência média, de 6,70 MPa, indicando que o aumento do teor de EPS comprometeu significativamente a capacidade resistente da mistura.

Outro aspecto relevante observado durante os ensaios foi a dificuldade de homogeneização do EPS na matriz cimentícia. Após a ruptura dos corpos de prova, verificou-se que as pérolas de EPS não se distribuíram de forma uniforme ao longo da altura dos corpos de prova. De modo geral, a região inferior apresentou menor concentração de EPS, enquanto a região superior concentrou maior quantidade desse material. Esse fenômeno pode ser explicado pela baixa densidade do EPS, que favorece sua tendência de ascensão durante a mistura, o lançamento e o adensamento do concreto.

Essa distribuição não homogênea impactou diretamente os resultados mecânicos, pois as regiões com maior concentração de EPS apresentaram comportamento mais frágil e menor capacidade resistente. Assim, durante o ensaio de compressão axial, as zonas com maior presença de EPS tenderam a fissurar e cisalhar primeiro, contribuindo para a variabilidade dos resultados e para a redução da resistência global dos corpos de prova. Esse comportamento representa uma limitação importante para a aplicação do concreto com EPS em elementos estruturais, especialmente em situações reais de obra, nas quais o concreto pode ser submetido a transporte, bombeamento, lançamento e vibração. Nessas condições, a tendência de segregação do EPS poderia gerar regiões com diferentes concentrações de agregado leve e, consequentemente, zonas com resistências distintas dentro de um mesmo elemento estrutural.

Também foi observado comportamento atípico durante o ensaio de compressão em todos os corpos de prova com EPS. Em determinados casos, a força aplicada aumentava de forma relativamente constante, sofria uma queda considerável e, posteriormente, voltava a crescer até atingir um novo pico de carga superior ao anterior. Esse comportamento difere do concreto convencional, no qual a ruptura costuma ocorrer de forma mais direta após o pico de carregamento. A presença do EPS pode ter favorecido esse comportamento devido à existência de zonas frágeis localizadas, redistribuição interna de tensões e progressão não uniforme das fissuras ao longo do corpo de prova.

Dessa forma, conclui-se que o EPS apresentou desempenho satisfatório como material redutor de massa específica, demonstrando potencial para produção de concretos leves. No entanto, sua incorporação provocou redução significativa da resistência à compressão, aumento da porosidade e maior complexidade no comportamento mecânico do concreto. Assim, os resultados obtidos indicam que o uso do EPS em concretos pode ser viável para aplicações em que a redução de peso seja mais importante que a resistência mecânica elevada, como elementos de enchimento, regularização, isolamento térmico, painéis leves e componentes não estruturais.

Quanto ao potencial de uso estrutural, o estudo indica que ainda existem limitações relevantes. O traço T1 apresentou o resultado mais promissor, por combinar menor peso específico com resistência próxima aos limites mínimos encontrados em algumas referências para concretos leves. Contudo, a heterogeneidade observada na distribuição do EPS, a redução acentuada da resistência em relação ao concreto de referência e a ausência de normatização

específica para concretos com EPS impedem sua indicação direta para fins estruturais sem estudos complementares.

Portanto, o concreto com EPS deve ser compreendido como uma alternativa tecnicamente promissora para redução de peso próprio e aproveitamento de resíduos poliméricos, mas que exige controle tecnológico rigoroso. Para que sua aplicação estrutural possa ser considerada de forma mais segura, são necessários novos estudos envolvendo maior número de corpos de prova, diferentes teores de EPS, ajustes na sequência de mistura, uso de aditivos modificadores de viscosidade, avaliação do efeito do adensamento, estudo da segregação, determinação do módulo de elasticidade, análise da aderência com armaduras e investigação da durabilidade.

Por fim, a pesquisa contribuiu para ampliar a compreensão sobre o comportamento físico-mecânico de concretos leves com EPS, demonstrando que a redução da massa específica é possível, mas que o equilíbrio entre leveza, resistência e homogeneidade ainda representa o principal desafio para o desenvolvimento desse material. Assim, os resultados obtidos fornecem subsídios para futuras pesquisas e reforçam a necessidade de avanço técnico e normativo sobre o uso de agregados poliméricos em concretos leves no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. **Manual Técnico do EPS**. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 11172:1990 – **Aglomerantes de origem mineral – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11752:2007 – **Poliestireno expandido (EPS) — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655:2015 – **Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015a.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739:2018 – **Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 6118:2023 – **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211:2019 – **Agregados para concreto — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522-1:2021 – **Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953:2015 – **Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica**. Rio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 35:1995 – **Agregados leves para concreto estrutural — Especificação**. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

ABRAPEX – Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **Guia técnico do EPS**. São Paulo, 2016.

ACI Committee 213. **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete** (ACI 213R-87). Detroit: American Concrete Institute, 1987.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 213R-87: **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. Detroit: ACI, 1987.

ANGELIN, A. **Concreto leve estrutural: desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia, área de concentração em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C330 – **Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete**. West Conshohocken, PA, 2004.

CATÓIA, T. **Concreto ultraleve estrutural e estudo de sua aplicação em lajes**. 2012. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

COSTA, D. S., VIEIRA, D. R., SIMÕES, A. P. B., ANGELIN, R. **Concreto de Cimento Portland com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição: Uma Revisão**. Reconstruir, v. 1, n. 2, p. 54-65, 2020.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005, p. 345-379.

DALY, A. F. **Use of lightweight aggregate concrete in bridges**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2, 2000, Kristiansand, Norway. **Proceedings**. [S. l.]: [s. n.], 2000.

GUIMARÃES, A. T. C. da. **Propriedades do concreto fresco**. In: ISAIA, G. C. Concreto. Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 1. p. 473- 494.

JOHN, V. M. **Concreto sustentável**. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. v.II. São Paulo: IBRACON, 2011.

JACINTHO, A. E. P. G. A. de, GIONGO, J. S. **Resistência mecânica do concreto**. In: ISAIA, G. C. Concreto. Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

LARA, L. A. M. **Materiais de construção**. Ouro Preto: IFMG, 2013.

LUCENA, L. F. L. **Materiais de Construção – Concreto**. Indaial: UNIASSELVI, 2019.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para concreto**. In: ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon: São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Bookman: Porto Alegre, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, A. M. S. *et al.* **Uso do poliestireno expandido como agregado em concreto leve: conceituação, aplicações e estado da arte**. HOLOS, v. 34, n. 3, p. 289–303, 2018.

OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. 2016. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. **Concreto estrutural leve**. In: ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap.43, v.2, p.1333-1362.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267 p.

ZUMAETA MONCAYO, W. J. **Comportamento residual do concreto leve com pérolas de EPS após situação de incêndio**. 2017. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.