



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



**ESTUDO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR EPS:  
CORRELAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DE  
CARBONO(CO<sub>2</sub>)**

**DIOGO MATHEUS CORRÊA DA CRUZ**

**Belém – PA  
Fevereiro/2026**

**DIOGO MATHEUS CORRÊA DA CRUZ**

**ESTUDO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR EPS:  
CORRELAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DE  
CARBONO(CO<sub>2</sub>)**

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

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**

**Belém - PA  
Fevereiro/2026**

**DIOGO MATHEUS CORRÊA DA CRUZ**

**ESTUDO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR EPS:  
CORRELAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DE  
CARBONO(CO<sub>2</sub>)**

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

**Examinadores:**

---

Professora Dr (a). Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Orientadora

---

Professora Dr (a). Mariana Domingues Von Paumgartten  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Membro da banca

---

Professora Dr (a). Robson da Silva Fernandes  
Doutor em Engenharia  
Membro da banca

**Belém - PA  
Fevereiro/2026**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, por ser meu sustento ao longo desses cinco anos de graduação, sem Ele nada do que eu conquisei até aqui seria possível. Ele sempre cuidou e vai continuar cuidando da minha vida com todo seu amor, somente Ele é digno de toda honra, glória e louvor.

À memória de meu pai, Claudio Cruz, pelo incentivo constante e pelos valores transmitidos. Sua ausência é sentida todos os dias, mas sua memória foi a força motriz que me impulsionou a concluir esta etapa. A ele, minha eterna gratidão e saudade.

À minha digníssima mãe, Telma Corrêa, dedico este trabalho com todo o meu amor e gratidão. Sem o seu apoio incondicional, seus sacrifícios silenciosos e sua crença inabalável no meu potencial, esta conquista não seria possível. Obrigado por ser meu alicerce, por me incentivar nos momentos de incerteza e por me ensinar, através do seu exemplo, o valor da perseverança. Esta vitória é, acima de tudo, nossa.

À minha irmã, Ana Carolina, meu muito obrigado pelo incentivo constante e por acreditar em mim. Sua presença foi fundamental para que eu mantivesse o foco e a motivação necessários para concluir este trabalho.

Às minhas primas, Luana e Luciane, agradeço pela presença constante, pelo incentivo e por sempre acreditarem no meu sucesso. Sou grato por tê-las ao meu lado em mais esta conquista.

Aos meus avós, pelo exemplo de vida, orações e carinho infinito, que são a base de quem eu sou. Aos meus tios e tias, agradeço por cada palavra de incentivo, pelo apoio nos momentos difíceis e por celebrarem comigo cada pequena vitória. Ter uma família tão unida e presente foi o que me deu forças para chegar até aqui.

À minha namorada, Maria Heloísa, por ser meu porto seguro e minha maior incentivadora. Agradeço por estar ao meu lado em cada noite de estudo, por me ouvir nos momentos de cansaço e por nunca me deixar desistir. Sua paciência, amor e crença no meu potencial foram o combustível necessário para que eu chegasse até aqui. Esta conquista é nossa.

Agradeço também ao engenheiro Márcio Ferreira e sua esposa, Ana Ferreira, que não foram apenas meus chefes, mas os mentores, e fizeram parte da minha formação acadêmica e profissional, um exemplo de profissionalismo e ética. A todas as amizades que fiz no escritório, pelos exemplos de dedicação e excelência que me inspiraram na trajetória.

Aos meus amigos de infância, à Matheus Alves e ao Arthur Rodrigues, agradeço pela amizade verdadeira que atravessa os anos. Obrigado por serem o meu refúgio nos momentos de lazer, por dividirem comigo os desafios da vida e por sempre estarem presentes com palavras de incentivo. Ter o apoio de vocês, desde as nossas raízes até esta conquista acadêmica, é um privilégio.

À minha orientadora Luciana Cordeiro, sua dedicação exemplar e seu olhar atento foram as luzes que guiaram a construção deste trabalho e a realização deste sonho, estive me orientando não apenas no processo do meu TCC, mas em outras oportunidades ao longo desses cinco anos de graduação.

Aos meus amigos de faculdade, em especial à Joelmeson Cardoso e Ronilson Lavareda, por cada momento vivido, por estarem comigo durante os ensaios de laboratório para a produção desse trabalho, por cada gesto de apoio e por toda a força compartilhada nessa jornada que é cursar Engenharia Civil.

Aos amigos e companheiros de jornada acadêmica, agradeço por compartilharem comigo os desafios e as vitórias destes anos; a presença de vocês tornou o caminho muito mais leve. Deixo registrado também o meu sincero agradecimento aos professores.

# ESTUDO DO CONCRETO LEVE DE ALTA RESISTÊNCIA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR EPS: CORRELAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DE CARBONO(CO<sub>2</sub>)

Study of High-Strength Lightweight Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate by EPS: Correlation of Eco-efficiency and Carbon Intensity (CO<sub>2</sub>)

Diogo Matheus Corrêa da Cruz (1)

(1) Graduando em engenharia civil, UFPA, Belém, Brasil

## RESUMO

Este trabalho investiga o comportamento mecânico e a ecoeficiência do Concreto Leve de Alta Resistência (CLAR) com substituição parcial do agregado por Poliestireno Expandido (EPS) nos teores de 10%, 20% e 30%. A metodologia baseou-se no empacotamento de Andreasen Modificado e no cálculo das emissões de  $CO_{2-eq}$  para determinar o Índice de Intensidade de Carbono ( $C_i$ ). Os resultados demonstram que o traço com 10% de EPS atingiu resistência de 55,48 MPa e densidade inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>, caracterizando-se como concreto leve estrutural. Verificou-se que, embora teores elevados de EPS reduzam a emissão bruta por volume, o traço de 10% apresentou a melhor ecoeficiência, com a menor intensidade de carbono por unidade de força ( $kgCO_2/MPa$ ). Conclui-se que a dosagem de 10% de EPS é tecnicamente viável e fundamental para a descarbonização do setor, equilibrando performance estrutural e responsabilidade ambiental.

Palavras-chave: Concreto leve de alta resistência (CLAR); Poliestireno expandido (EPS); intensidade de Carbono.

## ABSTRACT

This study investigates the mechanical behavior and carbon eco-efficiency of High-Strength Lightweight Concrete (HSLC) with partial replacement of aggregate by Expanded Polystyrene (EPS) at 10%, 20%, and 30% levels. The methodology was based on Modified Andreasen particle packing and  $CO_{2-eq}$  emission calculations to determine the Carbon Intensity Index ( $C_i$ ). Results show that the 10% EPS mix achieved 55.48 MPa strength and density below 2000 kg/m<sup>3</sup>, characterizing it as structural lightweight concrete. Although higher EPS contents reduce gross volume emissions, the 10% mix showed the best eco-efficiency, with the lowest carbon intensity per unit of strength ( $kgCO_2/MPa$ ). It is concluded that the 10% EPS dosage is technically feasible and essential for industry decarbonization, balancing structural performance and environmental responsibility.

Keywords: High-Strength Lightweight Concrete (HSLC); Expanded Polystyrene (EPS); Carbon Intensity.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do programa experimental .....	12
Figura 2- Detalhamento do processo de mistura e produção do CLAR .....	15
Figura 3 – Registro fotográfico da realização do ensaio de absorção por capilaridade .....	17
Figura 4- Espalhamentos dos diferentes traços obtidos.....	19
Figura 5- Molde com concreto fresco não exsudado/segregado do traço com 10% de ESP .....	20
Figura 6- Espalhamentos dos diferentes traços obtidos .....	20

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização física e química do CP II-F-32 .....	13
Tabela 2: Caracterização do agregado miúdo.....	13
Tabela 3: Caracterização do EPS .....	14
Tabela 4 - Caracterização do aditivo superplastificante de terceira geração .....	14
Tabela 5- Dosagem dos Traços Referência, 10%, 20% e 30% de EPS .....	15
Tabela 6- Coeficientes de emissão de CO <sub>2</sub> .....	18
Tabela 7- Dados obtidos dos corpos de prova com diferentes teores de substituição de areia por EPS .....	21
Tabela 8- Emissões de CO <sub>2-eq</sub> estimadas por m <sup>3</sup> de CLAR .....	23
Tabela 9 - <i>Correlação entre resistência mecânica e intensidade de carbono (Ci) ....</i>	24
Tabela 10 - <i>Ensaio do estado fresco e endurecido do concreto realizados.....</i>	28
Tabela 11 - Índice de consistência dos traços CLAR .....	28

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	METODOLOGIA .....	11
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	12
2.1.1	CIMENTO PORTLAND.....	12
2.1.2	AGREGADO MIÚDO .....	13
2.1.3	SÍLICA ATIVA E FÍLER CALCÁRIO .....	13
2.1.4	AGREGADO LEVE (EPS).....	14
2.1.5	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	14
2.2	DOSAGEM DOS DIFERENTES TEORES DE EPS DO CLAR.....	14
2.3	PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO CLAR.....	15
2.4	AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DO CARBONO ( $C_i$ ).....	17
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
3.1	EFEITO DO EPS NAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	18
3.2	EFEITO DO EPS NAS PROPRIEDADES NO EESTADO ENDURECIDO .....	21
3.3	EMISSÕES DE $CO_2$ CLAR.....	22
4	CONCLUSÃO.....	24
5	REFERÊNCIAS .....	25
6	ANEXOS.....	28

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais de construção mais sustentáveis, eficientes e leves tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias no setor. Nesse cenário, o concreto leve de alta resistência (CLAR) se destaca por aliar baixa densidade a desempenhos estruturais satisfatórios. Entre os materiais utilizados como agregados leve, o Poliestireno Expandido (EPS) destaca-se por ser um material isolante térmico, leve devido sua baixa densidade, resistente, fácil de manusear e de baixo custo. (Rocha, 2016).

No entanto, a motivação para o desenvolvimento desses materiais transcende a performance técnica, encontrando respaldo na crise ambiental global. Aproximadamente 30% das matérias-primas disponíveis em nível global são consumidas pela indústria da construção civil, enquanto cerca de 25% da água do mundo é utilizada por esse setor (FAJARDO et al., 2024). Diante desse consumo massivo de recursos naturais, a construção civil se apresenta como uma alternativa estratégica para a destinação de resíduos, possibilitando a redução dos impactos sociais, econômicos e ambientais (SILVA; BRANDÃO, 2015 FAJARDO et al., 2024).

Com o objetivo de desenvolver concretos com maior resistência, durabilidade e menor impacto ambiental, o concreto tradicional tem passado por adaptações. Essas modificações são resultado do desenvolvimento de concretos especiais, como o Concreto de Alto Desempenho (CAD) e o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD), que utilizam aditivos superplastificantes e adições minerais para otimizar o empacotamento de partículas e a zona de transição interfacial (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Um dos métodos mais investigados dentro desta evolução tecnológica para a redução da densidade do material envolve a substituição parcial de agregados por poliestireno expandido (EPS), um material leve, de fácil incorporação e com potencial de reuso.

A utilização do EPS na composição do concreto oferece diversas vantagens. Além de ser um material leve, o poliestireno expandido possui propriedades como baixa densidade, isolamento térmico e alta disponibilidade. Essas características justificam sua aplicação como substituto parcial dos agregados convencionais, permitindo a obtenção de concretos com menor massa específica. Essa redução facilita o manuseio, o transporte e a execução, além de contribuir para a sustentabilidade do setor da construção civil, promovendo a gestão de resíduos sólidos.

Por outro lado, a introdução do EPS no traço do concreto pode impactar diretamente suas propriedades mecânicas, especialmente a resistência à compressão, a absorção de água e a densidade final do material. Desse modo, torna-se indispensável a realização de estudos que avaliem o equilíbrio entre a redução de peso e o desempenho estrutural, assegurando que o material resultante atenda às exigências normativas e às condições de uso específicas. Como os agregados leves apresentam valores do módulo de deformação relativamente baixos, os concretos leves apresentam valores de módulo de deformação inferiores aos observados para os concretos convencionais. (Rossignolo, 2009).

A adição de pérolas de poliestireno expandido (EPS) resulta na diminuição do módulo de elasticidade dinâmico da argamassa. Em outras palavras, quanto menor a densidade aparente do material, menor é o seu módulo, demonstrando uma relação diretamente proporcional entre essas duas propriedades. (Silva e Cordeiro, 2022).

Complementarmente à análise mecânica, a avaliação da ecoeficiência do carbono torna-se um requisito crítico na engenharia moderna. A incorporação de adições minerais e agregados leves deve ser quantificada não apenas pelo ganho de resistência, mas pela redução efetiva das emissões de  $CO_2$  equivalente ( $CO_2 - eq$ ). Estudos recentes demonstram que a substituição inteligente de materiais por resíduos ou subprodutos pode gerar reduções significativas nas emissões totais de gases de efeito estufa para a produção de compósitos cimentícios (Fajardo et al., 2024). Assim, este trabalho propõe correlacionar o consumo de materiais e o desempenho mecânico à intensidade de carbono, buscando identificar o traço que apresenta a melhor relação entre performance estrutural e ecoeficiência ambiental.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de concretos leves de alta resistência com substituição parcial do agregado miúdo por poliestireno expandido (EPS). Para isso, foram elaborados três traços experimentais com substituições volumétricas do agregado miúdo natural por EPS nos teores de 10%, 20% e 30%. Cabe destacar que os concretos foram formulados com base em uma matriz composta exclusivamente por

pós reativos, o que justifica a ausência de agregados graúdos em sua composição. Essa abordagem é característica de concretos de alto e ultra-alto desempenho, nos quais a otimização da granulometria e o empacotamento das partículas finas favorecem uma estrutura mais densa e homogênea, mesmo sem o uso de brita. Esse tipo de composição potencializa a trabalhabilidade, a coesão e a resistência mecânica, aspectos fundamentais para a análise proposta neste trabalho, conforme mostrado na Figura 1.



Figura 1 - Etapas do programa experimental (Autores, 2025).

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a confecção do Concreto Leve de Alta Resistência (CLAR), utilizou-se uma matriz de pós reativos visando a máxima compacidade. Os materiais selecionados foram:

### 2.1.1 CIMENTO PORTLAND

Utilizou-se o cimento CP II-F-32. Sua caracterização física seguiu as normas NBR 16605 (ABNT, 2024), NBR 16372 (ABNT, 2015) e NBR 16607 (ABNT, 2018). O filler calcário presente no cimento auxilia no empacotamento das partículas e na redução da porosidade inicial da matriz. Na tabela 1 tem-se a caracterização física e química fornecida pelo fabricante.

Tabela 1: Caracterização física e química do CP II-F-32

<b>Análise Física</b>					
Característica determinada		Método de ensaio		Resultados	
Massa específica		NBR 16605 (ABNT, 2017)		2,92 g/cm <sup>3</sup>	
Área de superfície Blaine		NBR 16372 (ABNT, 2015)		4000 – 4500 cm <sup>2</sup> /g (40 – 45 m <sup>2</sup> /kg)	
Tempo de pega		NBR 16607 (ABNT, 2018)		Início ≥ 60 minutos; Fim ≤ 600 minutos	
<b>Análise Química</b>					
Clínquer	Fíler Calcário	Cl	SO <sub>3</sub>	Perda ao fogo	Insolúvel
0,800 – 0,950	0,060 - 0,200	< 0,001	< 0,040	0,050	0,050

Fonte: Autor, 2025

### 2.1.2 AGREGADO MIÚDO

Areia natural de quartzo, caracterizada fisicamente segundo a NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021), garantindo que a distribuição granulométrica estivesse em conformidade com o método de dosagem adotado, como mostra a tabela 2.

Tabela 2: Caracterização do agregado miúdo

<b>Caracterização por faixa de areia</b>		
Característica determinada	Método de ensaio	Resultados
Massa unitária (MU)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,61 g/cm <sup>3</sup>
Índice de vazios		37%
Massa específica (ME)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,56 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor, 2025

### 2.1.3 SÍLICA ATIVA E FÍLER CALCÁRIO

Estas adições foram incorporadas para potencializar o efeito pozolânico e o efeito fíler. A sílica ativa, com sua elevada área superficial, atua no refinamento da zona de transição entre a pasta e as pérolas de EPS, aumentando a aderência e a resistência mecânica. Para a caracterização da massa específica das adições minerais adotou-se a NBR 16916 (ABNT, 2021), os resultados de fíler calcário e sílica foram respectivamente 6,65 g/cm<sup>3</sup> e 2,09 g/cm<sup>3</sup>.

#### 2.1.4 AGREGADO LEVE (EPS)

Poliestireno Expandido em pérolas (diâmetro de 3 a 5 mm). A caracterização do EPS seguiu as diretrizes da NBR 6508 (ABNT, 2016) para massa específica e NBR 16972 (ABNT, 2021) para massa unitária. A escolha do EPS justifica-se por sua baixíssima densidade aparente ( $10,5 \text{ kg/m}^3$ ), permitindo a obtenção de concretos com massa específica reduzida, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3: Caracterização do EPS

<b>Análise Física</b>		
<b>Índices Físicos</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultados</b>
Massa específica	NBR 6508 (ABNT, 2016)	$10,5 \text{ kg/m}^3$
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	$6,48 \text{ kg/m}^3$
Diâmetro médio das pérolas de EPS	Aproximado por inspeção visual com auxílio de régua	3 a 5 mm

Fonte: Autor, 2025

#### 2.1.5 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Utilizou-se um aditivo de terceira geração à base de éter policarboxílico para garantir a fluidez da mistura, permitindo trabalhar com uma relação água/cimento extremamente baixa ( $a/c = 0,22$ ), presente na tabela 4.

Tabela 4: Caracterização do aditivo superplastificante de terceira geração

<b>Análise química</b>		<b>Análise física</b>				
Base química	pH	Aspecto	Cor	Densidade	Sólidos	Viscosidade
Éter policarboxílico	5 - 7	Líquido	Amarelo claro âmbar	$1,05 - 1,1 \text{ g/cm}^3$	30 - 40 %	< 150 cps

Fonte: Autor, 2025

#### 2.2 DOSAGEM DOS DIFERENTES TEORES DE EPS DO CLAR

Foram elaborados traços de concreto com base no método de dosagem de Andreasen modificado (FUNK; DINGER, 1994), adaptado às características específicas dos materiais disponíveis na região amazônica. Três níveis de substituição parcial do agregado miúdo por poliestireno expandido (EPS) foram definidos: baixo teor (10%), médio teor (20%) e alto teor (30%). Para cada proporção de EPS, foram ajustadas as composições dos traços de forma a manter a trabalhabilidade e a relação água/cimento constante. As proporções dos materiais em massa para cada traço estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5: Dosagem dos Traços Referência, 10%, 20% e 30% de EPS

<b>Materiais constituintes</b>	<b>Referência</b>	<b>CLAR 10</b>	<b>CLAR 20</b>	<b>CLAR 30</b>
Cimento Portland	1	1	1	1
Areia	1,2	1,08	0,96	0,84
Sílica ativa	0,10	0,10	0,10	0,10
Fíler granítico	0,05	0,05	0,05	0,05
Pérolas de poliestireno	0,00	0,331	0,662	0,992
Aditivo Superplastificante	0,079	0,079	0,079	0,079
Água	0,22	0,22	0,22	0,22

Fonte: Autor, 2025

### 2.3 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO CLAR

A produção consistiu em misturar todos os materiais sólidos inicialmente, para garantir a homogeneidade e compacidade granular dos materiais, conforme conceituado por Tutikian et al. (2011). Após a combinação dos sólidos, a água e o aditivo superplastificante foram adicionados, e misturados em velocidade alta até obter uma consistência plástica, para assim adicionar o EPS conforme ilustrado na figura 2. Os corpos de prova foram submetidos a cura por 28 dias.



Figura 2 - Detalhamento do processo de mistura e produção do CLAR (Autor, 2025).

O ensaio de consistência foi realizado por meio do espalhamento do concreto fresco fundamentado nos procedimentos técnicos da NBR 13276 (2016). A escolha por esta metodologia, em detrimento de ensaios que demandam maiores quantidades de massa, justifica-se pelo caráter exploratório da pesquisa e pelo volume reduzido de material disponível para a moldagem dos traços experimentais. Tal abordagem permitiu uma caracterização reológica preliminar eficiente, garantindo a avaliação da trabalhabilidade e da fluidez do compósito em uma escala compatível com as limitações de insumos da fase laboratorial, sem comprometer a representatividade dos resultados obtidos.

Para medir a resistência mecânica do concreto leve de alto desempenho, foram realizados os processos de retificação dos corpos de prova e os ensaios de compressão axial aos 28 dias de cura conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), e assim avaliar a influência das diferentes proporções de substituição de areia por EPS no traço do concreto.

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado com base na NBR 15259 (ABNT, 2005), originalmente voltada para argamassas, mas adotada neste estudo devido à similaridade do concreto leve com EPS, que não utiliza agregados graúdos. Os corpos de prova (CPs) foram secos ao ar livre, em ambiente fechado, controlado e seco, uma vez que a utilização de estufa poderia comprometer a integridade do EPS. Em seguida, as bases foram lixadas para nivelamento e remoção da nata de cimento, conforme indicado pela norma. Após essa preparação, foram medidas as dimensões (altura e diâmetro) e a massa inicial (tempo zero). O ensaio foi conduzido com os CPs apoiados sobre uma grelha, posicionada em uma bandeja com lâmina d'água de 1,0 cm, tocando apenas a base dos corpos de prova.

As massas foram novamente medidas após 10 minutos e, posteriormente, aos 90 minutos de imersão, mostrado na figura 3, conforme os intervalos de tempo estabelecidos pela norma. A diferença de massa em cada intervalo permitiu o cálculo do coeficiente de absorção capilar. Ressalta-se que, devido à presença do EPS na composição do concreto estudado, não foi possível realizar a secagem em estufa, uma vez que o calor excessivo poderia comprometer a integridade do material polimérico, alterando suas propriedades físicas e químicas. Em razão disso, optou-se pela secagem natural em ambiente controlado, seco e livre de interferências

externas, garantindo assim que os corpos de prova atingissem massa constante sem prejuízos às características do concreto. Essa adaptação metodológica foi fundamental para preservar a representatividade dos resultados obtidos.



Figura 3 – Registro fotográfico da realização do ensaio de absorção por capilaridade (Autor, 2025)

#### 2.4 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E INTENSIDADE DO CARBONO ( $C_i$ )

Para quantificar o impacto ambiental das misturas desenvolvidas e estabelecer uma correlação direta com o desempenho mecânico, adotou-se o conceito de ecoeficiência por meio do Índice de Intensidade de Carbono ( $C_i$ ). Esta métrica é fundamental em pesquisas exploratórias de novos materiais, pois permite identificar se a redução de massa específica e o ganho de sustentabilidade (pelo uso do EPS) não comprometem a eficiência estrutural do compósito.

O cálculo da Intensidade de Carbono ( $C_i$ ) seguiu a metodologia proposta por Dantas et al. (2017), permitindo mensurar a eficiência do compósito através da quantidade de  $CO_2$  emitida para a obtenção de cada unidade de resistência (MPa).

A Intensidade de Carbono ( $C_i$ ) das amostras foi calculada utilizando a seguinte formulação:

$$C_i = E_{\text{total}} / f_{ck}$$

Onde:

- $C_i$ : Índice de Intensidade de Carbono, expresso em  $kgCO_{2\text{-eq}}/m^3$  por MPa ( $kgCO_2/MPa$ );

- $E_{total}$ : Emissão total de  $CO_2$  equivalente por metro cúbico de concreto ( $kgCO_{2-eq}/m^3$ );
- $f_{ck}$ : Resistência à compressão axial obtida aos 28 dias de cura (MPa).

Os parâmetros teóricos adotados para o cálculo de  $E_{total}$  fundamentaram-se nos coeficientes de potencial de aquecimento global (GWP) de cada insumo, conforme os dados consolidados por Fajardo et al. (2024). A carga ambiental de cada traço foi obtida pelo somatório do produto entre o consumo de material ( $kg/m^3$ ) e seu respectivo fator de emissão bibliográfico.

Dentre os parâmetros adotados, destacam-se os fatores para o Cimento Portland (0,892  $kgCO_{2-eq}/kg$ ), Aditivo Superplastificante (0,75  $kgCO_{2-eq}/kg$ ) e Sílica Ativa (0,00031  $kgCO_{2-eq}/kg$ ), conforme a tabela 6. A utilização do EPS foi considerada como fator de alívio ambiental, dado o seu baixíssimo coeficiente de emissão em massa e sua função de substituição volumétrica do agregado miúdo natural, o qual possui um impacto de 0,014  $kgCO_{2-eq}/kg$  (HABERT et al., 2013; FAJARDO et al., 2024). Esta correlação permite verificar que o traço com 10% de EPS, embora apresente emissão bruta similar aos demais por unidade de volume, destaca-se pela menor Intensidade de Carbono, otimizando a relação entre preservação ambiental e capacidade de carga estrutural.

Tabela 6: Coeficientes de emissão de  $CO_2$

<b>Materiais constituintes</b>	<b><math>CO_{2-eq}(kg/kg)</math></b>
Cimento Portland	0,892
Sílica ativa	0,00031
Fíler granítico	0,004587
Aditivo Superplastificante	0,75
Água	0,0003

Fonte: Fajardo et al., 2024

<b>Areia</b>	<b>0,014</b>
--------------	--------------

Fonte: Habert et al., 2024

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 EFEITO DO EPS NAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A avaliação reológica dos concretos leves de alto desempenho com substituição parcial de areia por poliestireno expandido (EPS) permitiu compreender os efeitos dessa modificação sobre a consistência, coesão e plasticidade das misturas.

No que tange a trabalhabilidade todos os traços apresentaram bom espalhamento, indicando adequada fluidez e consistência.

O traço com 10% de substituição apresentou o maior valor médio de espalhamento (230 mm), refletindo uma mistura mais fluida e de fácil escoamento. Já os traços com 20% e 30% apresentaram valores médios de 185 mm e 180 mm, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4 – Espalhamentos dos diferentes traços obtidos (Autor, 2025).

Apesar de os valores se manterem dentro de uma faixa considerada satisfatória, permitindo classificar as misturas como trabalháveis, foi possível observar, já durante o ensaio de consistência, o surgimento de falhas de coesão nos traços com maior teor de EPS. Essas falhas se manifestaram como tendência à segregação entre os componentes da mistura, perceptível visualmente na região externa da mancha de espalhamento. Tal comportamento está relacionado às características físicas do EPS, que, por possuir baixa densidade e superfície lisa, compromete o empacotamento dos materiais e dificulta a manutenção da homogeneidade da mistura durante o escoamento.

Portanto, embora os resultados indiquem boa fluidez geral, o ensaio revelou que teores mais elevados de EPS já comprometem parcialmente a coesão da mistura, sendo esse um aspecto crítico a ser considerado na análise do desempenho reológico do concreto leve.

A análise da coesão das misturas teve como objetivo verificar a integridade do concreto no estado fresco, observando possíveis sinais de exsudação ou segregação. Durante os ensaios de espalhamento, observou-se que as misturas não apresentaram exsudação, ou seja, não houve acúmulo de água livre na superfície. No entanto, nos traços com maiores teores de substituição por EPS, notadamente nos de 20% (CP20) e 30% (CP30), foi possível identificar segregação do material leve na matriz, conforme a figura 6. Essa segregação caracteriza um comportamento indesejado, pois indica que a distribuição dos componentes na mistura não foi homogênea, conforme evidenciado na figura 5.



Figura 5 – Molde com concreto fresco não exsudado/segregado do traço com 10% de EPS (Autor, 2025).



Figura 6 – Molde com concreto fresco não exsudado/segregado do traço com 20% e 30% de EPS (Autor, 2025).

A tendência à segregação, nesse caso, está relacionada à baixa densidade do EPS, que dificulta sua permanência uniforme ao longo da massa do concreto,

especialmente em proporções elevadas. Esse fenômeno compromete a estabilidade da composição no estado fresco e representa um indicativo negativo para a qualidade da mistura, podendo afetar tanto a resistência quanto a durabilidade do material no estado endurecido.

Portanto, embora os traços com EPS apresentem boa trabalhabilidade e espalhamento, é necessário destacar que, a partir de determinados teores, a presença de segregação passa a limitar sua aplicabilidade prática, exigindo ajustes de dosagem ou estratégias de adensamento e mistura que garantam maior coesão à composição.

### 3.2 EFEITO DO EPS NAS PROPRIEDADES NO EESTADO ENDURECIDO

Foram avaliados os efeitos da substituição parcial da areia natural por esferas de poliestireno expandido (EPS) nas propriedades mecânicas de concretos leves de alta resistência. Os valores obtidos de resistência à compressão, densidade e absorção por capilaridade aferidos nas diferentes composições estão organizados na Tabela 7, que sintetiza o comportamento dos concretos estudados frente à variação no conteúdo de EPS.

Tabela 7: Dados obtidos dos corpos de prova com diferentes teores de substituição de areia por EPS

<b>Percentual de substituição (%)</b>	<b>CLAR 10</b>	<b>CLAR 20</b>	<b>CLAR 30</b>
Resistência Obtida (MPa)	55,5	21,0	13,1
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1990	1890	1880
Absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (g/cm <sup>3</sup> )	0,011	0,024	0,012
Absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm <sup>3</sup> )	0,024	0,020	0,034
Coefficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> ·min <sup>0.5</sup> )	0,250	0,210	0,310

Fonte: Autor, 2025

Observa-se que todas as misturas analisadas apresentaram massa específica inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>, atendendo assim aos critérios estabelecidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015), que classifica concretos com esse nível de densidade como pertencentes à categoria de concretos leves. Essa classificação é importante porque a redução da massa específica é uma das principais características buscadas na

produção de concretos com adição de materiais leves, como o poliestireno expandido (EPS).

No que diz respeito ao comportamento mecânico, os resultados mostraram que somente a família com 10% de substituição de EPS em relação à massa de areia foi capaz de alcançar a resistência à compressão mínima desejada, que era superior a 50 MPa. Esse comportamento evidencia que, embora a adição de EPS contribua significativamente para a redução da densidade, há um limite de substituição que deve ser respeitado para não comprometer a resistência mecânica do material.

A baixa aderência entre as pérolas de EPS e a pasta de cimento foi identificada como a principal responsável pelo desempenho insatisfatório nas demais formulações. Isso ocorre devido à natureza hidrofóbica do EPS, que dificulta a formação de uma ligação eficaz entre as partículas do agregado leve e a matriz cimentícia. A Zona de Transição Interfacial (ZTI), que é a região de contato entre o EPS e a pasta de cimento, apresentou-se como o ponto crítico de fragilidade do sistema.

Com relação à capilaridade dos concretos com EPS, os resultados foram condizentes com o esperado: quanto maior o teor de EPS, maior foi a absorção de água, o mesmo comportamento foi observado por Silva e Cordeiro (2022). Isso se deve à maior porosidade introduzida pelo EPS e à sua baixa aderência à matriz cimentícia, o que favorece a formação de zonas de transição mais permeáveis. Embora os finos presentes contribuam para algum refino dessas regiões, não são suficientes para conter o aumento da absorção resultante do acréscimo de EPS.

Portanto, os resultados reforçam a necessidade de equilibrar a proporção de EPS nas misturas, buscando uma relação adequada entre redução de densidade e manutenção da resistência mecânica mínima exigida para o uso estrutural ou não estrutural do concreto leve.

### 3.3 EMISSÕES DE $CO_2$ CLAR

O comportamento reológico observado nas misturas possui uma correlação direta com a constituição química e física da matriz. Nos ensaios de espalhamento, o traço com 10% de EPS (C10) obteve a maior fluidez (230 mm), enquanto os traços com 20% (C20) e 30% (C30) registaram 185 mm e 180 mm, respectivamente. Esta

redução na trabalhabilidade está ligada à substituição volumétrica do agregado miúdo pelo EPS, que possui uma superfície lisa e baixa densidade, exigindo uma matriz de pós reativos mais coesa para evitar a segregação.

Do ponto de vista ambiental, a manutenção de um elevado consumo de cimento e sílica ativa em todos os traços, necessária para garantir a coesão no estado fresco e evitar a flutuação das pérolas de EPS, estabiliza a emissão bruta de  $CO_2$  em um patamar elevado. Contudo, a substituição progressiva da areia pelo EPS reduz ligeiramente a massa total de agregados por metro cúbico, gerando uma redução sutil nas emissões totais à medida que o teor de agregado leve aumenta. Assim, a trabalhabilidade adequada dos traços C20 e C30 é obtida com uma pegada de carbono volumétrica ligeiramente inferior à do traço C10, embora a estabilidade da mistura se torne mais crítica nestes níveis de substituição

A análise da ecoeficiência torna-se mais profunda ao correlacionar as emissões brutas com o desempenho mecânico através do Índice de Intensidade de Carbono ( $C_i$ ), que mede o custo ambiental por cada MPa de resistência obtido. O traço com 10% de EPS, apesar de apresentar a emissão total mais elevada por volume de material ( $725,32 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ), revelou-se o mais ecoeficiente devido à sua alta performance mecânica de 55,48 MPa. O seu índice  $C_i$  foi de apenas  $13,07 \text{ kgCO}_2/\text{MPa}$ , indicando que este material otimiza a utilização do cimento para a geração de força estrutural.

Tabela 8: Emissões de  $CO_{2\text{-eq}}$  estimadas por  $\text{m}^3$  de CLAR

<b>Componente</b>	<b>CLAR 10</b> <b>(<math>\text{kgCO}_2/\text{m}^3</math>)</b>	<b>CLAR 20</b> <b>(<math>\text{kgCO}_2/\text{m}^3</math>)</b>	<b>CLAR 30</b> <b>(<math>\text{kgCO}_2/\text{m}^3</math>)</b>
Cimento Portland	669,00	669,00	669,00
Areia	11,34	10,08	8,82
Sílica Ativa	0,02	0,02	0,02
Fíler Granítico	0,17	0,17	0,17
Superplastificante	44,25	44,25	44,25
EPS	0,49	0,99	1,48
Água	0,05	0,05	0,05
Emissão Total	725,32	724,56	723,79

Fonte: Autor, 2025

Em oposição, os traços com 20% e 30% de EPS demonstraram que a redução na emissão de carbono por metro cúbico (724,56 e 723,79  $kgCO_2/m^3$ ) não compensa a perda drástica de resistência mecânica, que caiu para 20,95 MPa e 13,13 MPa, respetivamente. Nestes casos, a intensidade de carbono disparou para 34,58 e 55,12  $kgCO_2/MPa$ , evidenciando que teores mais elevados de EPS tornam o material ambientalmente ineficiente para aplicações estruturais de alta carga, como mostrado na tabela 9. Portanto, conclui-se que o teor de 10% de EPS é o ponto de equilíbrio ideal, garantindo excelente trabalhabilidade no estado fresco e a melhor relação entre performance mecânica e emissões de  $CO_2$  segundo a bibliografia consultada.

Tabela 9: Correlação entre resistência mecânica e intensidade de carbono ( $C_i$ )

	<b>CLAR 10</b> ( $kgCO_2/m^3$ )	<b>CLAR 20</b> ( $kgCO_2/m^3$ )	<b>CLAR 30</b> ( $kgCO_2/m^3$ )
Resistência ( <b>MPa</b> )	55,48	20,95	13,13
Emissão Total ( $kgCO_2/m^3$ )	725,32	724,56	723,79
Intensidade de Carbono - <b><math>C_i(kgCO_2MPa)</math></b>	13,07	34,58	55,12

Fonte: Autor, 2025

#### 4 CONCLUSÃO

Conclui-se que a produção de Concreto Leve de Alta Resistência (CLAR) utilizando pérolas de EPS como substituto parcial do agregado miúdo é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, desde que respeitados os limites de dosagem otimizados.

No estado fresco, a metodologia de mistura e a adição tardia do EPS mostraram-se fundamentais para garantir a homogeneidade, embora teores acima de 10% tenham apresentado tendências de segregação e redução da fluidez. No estado endurecido, apenas o traço com 10% de EPS atingiu os requisitos de alta resistência estrutural (55,48 MPa), mantendo a massa específica abaixo de 2000  $kg/m^3$ .

Sob a ótica da ecoeficiência, a correlação baseada nos coeficientes de Fajardo et al. (2024) revelou que o traço CLAR 10 apresenta a maior ecoeficiência. Apesar de possuir uma emissão bruta ligeiramente superior por metro cúbico, este traço registrou a menor Intensidade de Carbono ( $C_i$ ), demonstrando que o ganho de resistência justifica o investimento ambiental nos pós reativos. Em suma, o uso de

10% de EPS representa o balanço ideal entre trabalhabilidade, leveza estrutural e descarbonização da construção civil.

## 5 REFERÊNCIAS

ANDREASEN, A.H.M. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid Zeitschrift*, v. 50, 1930.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM C150. West Conshohocken, PA, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Determinação da dureza Brinell. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16605: Cimento Portland – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16372: Cimento Portland – Determinação da área de superfície específica – Método de Blaine*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregado – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16916:2021 – Agregados – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT /NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio De Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 35 – Agregados Leves para Concreto Estrutural –Especificações*. Rio de Janeiro, 1995

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por classes, e pela resistência à compressão, por classes. Rio de Janeiro, 2015.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **15823**. Concreto auto-adensável – Determinação da deformação por espalhamento. Rio de Janeiro, 2010.

CATOIA, T. Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de EPS: Caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. Tese de doutorado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, A. M. D. S., GONZAGA, L. G. D. M., & RIBEIRO, D. F. (2018). Uso do poliestireno expandido como agregado em concreto leve: conceituação, aplicações e estado da arte. *Revista Vértices*, 20(3).

DANTAS, S. M. et al. Evaluation of the environmental impact of cement-based materials: a comparative study between conventional and alternative binders. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 120, p. 100-110, 2017.

FAJARDO, A. A. et al. Desenvolvimento de argamassa ecológica de alta performance com a adição de pó de gnaiss. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.

FENG, Yong; LI, Zehua; CHEN, Zhao; CHEN, Wang; FENG, Jingjie. Study on the properties of EPS composite concrete enhanced by silane coupling agent: Experiment and molecular simulation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, SAGE Publishing, 16 out. 2024.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. In: *Handbook of low carbon concrete*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 933-942, 2018.

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

ROCHA, B. F. de M.; FIGUEIREDO, F. B.; ALTRAN, D. A. Estudo das propriedades físicas, mecânicas e aplicação do concreto leve com a utilização de agregados de poliestireno expandido – EPS. *Colloquium Exactarum*, Presidente Prudente, v. 8, n. 3, p. 36–43, jul./set. 2016.

ROSSIGNOLO, João Adriano. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. São Paulo: Pini, 2009.

SANTOS, Camila de Oliveira; VIEIRA, Sheilla Pereira; OLIVEIRA, Douglas Ribeiro. Dosagem de concretos leves de alto desempenho com poliestireno expandido e escória leve de alto forno. *Revista Perquirere*, Patos de Minas, 2018.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. *Concreto: Ciência e Tecnologia*, 2011. n. 1990, p. 1283–1326

SILVA, Max Weverton Moreira da; CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. Potencial uso de pérolas de EPS em argamassas para a produção de placas cimentícias. *REVISTA MATÉRIA*, [S. l.], v. 27, n. 02, e13194, 2022.

SILVA, Max Weverton Moreira; CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. Use potential of EPS pearls in mortars for the production of cementitious panel. *Revista Materia*, v. 27, n. 2, 2022.

XAVIER, B. C.; BASSANI, F.; MENDES, A. S. Avaliação do concreto estrutural leve com EPS reciclado. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 12, n. 3, p. 59-75, 2016.

SANJUÁN, M. Á. et al. Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A spanish case study. *Applied Sciences*, v. 10, n. 1, 2020.

## 6 ANEXOS

Tabela 10: Ensaios do estado fresco e endurecido do concreto realizados

Estado do Concreto	Propriedade Avaliada	Ensaio / Avaliação	Norma Técnica Aplicável
Estado Fresco	Trabalhabilidade / Consistência	Espalhamento do concreto	<b>ABNT NBR 13276:2016</b> – Argamassas e concretos – Determinação do índice de consistência
Estado Fresco	Coesão / Estabilidade da mistura	Avaliação visual de segregação e exsudação	Avaliação qualitativa conforme procedimento experimental (apoio conceitual em <b>ABNT NBR 15823:2010</b> )
Estado Endurecido	Resistência à compressão axial (28 dias)	Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos	<b>ABNT NBR 5739:2018</b> – Concreto – Ensaio de compressão
Estado Endurecido	Massa específica / Densidade aparente	Classificação do concreto leve	<b>ABNT NBR 8953:2015</b> – Concreto para fins estruturais – Classificação por massa específica
Estado Endurecido	Absorção de água por capilaridade	Ensaio de absorção capilar aos 10 e 90 min	<b>ABNT NBR 15259:2005</b> – Argamassas – Determinação da absorção de água por capilaridade

Fonte: Autor, 2025

Tabela 11: Índice de consistência dos traços CLAR

Traço	Teor de EPS (%)	Índice de consistência (mm)	Relação a/c	Consumo de água*
<b>CLAR 10</b>	10%	230	0,22	0,22 kg de água / kg de cimento
<b>CLAR 20</b>	20%	185	0,22	0,22 kg de água / kg de cimento
<b>CLAR 30</b>	30%	180	0,22	0,22 kg de água / kg de cimento

Fonte: Autor, 2025