



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS MACEIÓ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESDRAS MÁRCIO ARAÚJO LIMA
ISABELLE SANTOS BARACHO

CONCRETO ECOEFICIENTE IMPERMEÁVEL COM GERAÇÃO DE
CRÉDITOS DE CARBONO

Maceió, Alagoas

2026

ESDRAS MÁRCIO ARAÚJO LIMA

ISABELLE SANTOS BARACHO

CONCRETO ECOEFICIENTE IMPERMEÁVEL COM GERAÇÃO DE CRÉDITOS
DE CARBONO

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Instituto Federal de Alagoas Maceió
como requisito parcial para obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Martins

Coorientador: Prof. MSc. Esdras Jonathan

Maceió, Alagoas

2026



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

691.343

L732c

Lima, Esdras Márcio Araújo.

Concreto ecoeficiente impermeável com geração de créditos de carbono [recurso eletrônico] / Esdras Márcio Araújo Lima, Isabelle Santos Baracho. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 18,8 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Prof. Dr. Manoel Martins.

Coorientação: Prof. Me. Esdras Jonathan

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, Maceió, 2025.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto ecoeficiente impermeável. 3. Sílica. 4. Créditos de carbono. I. Baracho, Isabelle Santos. II. Título.

ESDRAS MÁRCIO ARAÚJO LIMA
ISABELLE SANTOS BARACHO

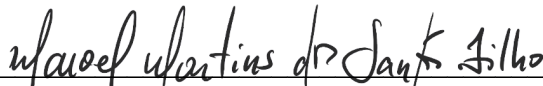
**CONCRETO ECOEFICIENTE IMPERMEÁVEL COM GERAÇÃO DE
CRÉDITOS DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Instituto Federal de Alagoas Maceió
como requisito parcial para obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

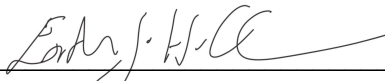
Aprovado em: 20/02/2026.

Nota: 8,5

Orientadores:




Prof. Dr. Manoel Martins dos Santos Filho (Orientador)
IFAL/ Campus Maceió



Prof. Msc. Esdras Jonathan Honorato Costa (Coorientador)
IFAL/ Campus Maceió

Banca examinadora:



Prof. Dr. Vinicius Dantas
IFAL/ Campus Maceió



Prof. Dr. Joao Gilberto Teixeira Silva
IFAL/ Campus Maceió

Aos nossos familiares, que nos ensinaram o valor das letras. Em especial:

Ao Givaldo dos Santos Araújo(in memoriam), por Esdras.

A Verônica, Valéria, Carolina, Aurélios (in memoriam), por Isabelle.

AGRADECIMENTOS: ESDRAS

Expresso publicamente meu agradecimento a Deus, pois sem ele acredito que não estaria aqui.

Ao meu Avô, Givaldo, por influenciar a gostar de números e entender a importância da educação.

A minha mãe, Márcia, a esta estendo a todos os meus familiares. Gratidão por todo apoio e suporte. Representa fortemente um ombro amigo que levanta, carrega, forja e aconselha.

A Isabelle e ao Jonas, gratidão por chegarem juntos nos desafios da vivência na engenharia.

Ao coorientador, Prof. Msc. Esdras Jonathan Honorato Costa, agradeço a parceria e a amizade gerada. Apesar de tantas responsabilidades pessoais e profissionais demonstrou priorizar toda construção das pesquisas até a definição do tema do TCC.

Ao orientador, Prof. Dr. Manoel Martins dos Santos Filho, expresso minha consideração pelo rigor e paciência ao longo das pesquisas.

Ao responsável pelos laboratórios, Sheldon Cristiano Souza da Silva, sempre em prontidão para desenvolver os ensaios e apoiar as pesquisas.

Ao Instituto Federal de Alagoas (IFAL), expresso minha sincera gratidão pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico, pessoal e profissional. Agradeço a todos os professores, técnicos, colegas de turma e colaboradores, cujo comprometimento e dedicação foram fundamentais para a concretização desta dissertação.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta realização.

AGRADECIMENTOS: ISABELLE

Em meados dos meus primeiros quatro anos de vida, eu ganhei um lego voltado à construção civil. Meu avô, Aurélio de Moraes Duarte, Engenheiro Civil, como um grande amante da mesma, cativava minha atenção com pequenas peças que se conectavam “magicamente” umas às outras e davam origem á grandes estruturas.

Aos cinco, fui presenteada com um Sudoku pela primeira vez. E, em meio a milkshakes e Game Station, era sempre pura diversão alocar os números junto a ele.

Aos sete, meu herói partiu. Mas deixou uma paixão no meu coração. E foi essa paixão que me trouxe até aqui, exatamente nesse momento.

Eu não tenho como escrever esses agradecimentos sem mencionar a pessoa que me guiou àquilo que se tornaria a minha vida: os números.

Aonde quer que esteja, obrigada, vô.

Aos 17, fui agraciada com a aprovação na UFAL (e no IFAL, ironicamente). E foi aí que a verdadeira jornada começou. Entre trancos e barrancos, engenhar foi uma das coisas mais desafiadoras que já fiz na vida.

Entretanto, no meio da saga, eu perdi meu segundo Aurélio.

Também não seria possível escrever esses agradecimentos sem nomear a pessoa que mais acreditava no meu potencial: Aurélio Gabriell Martins Baracho, meu irmãozinho. Obrigada por me enxergar com tão bons olhos. Você foi luz nos meus dias mais escuros e força quando eu pensei em desistir.

Apesar dos percalços, durante toda essa jornada — e em muitas outras que ainda virão — estiveram as pessoas que mais me motivaram, acolheram e aceitaram.

Ao nascer, as coisas eram difíceis. Mas eu sempre tive um anjo da guarda. Ou anja. Minha mãe jamais mediu esforços para me dar tudo o que me era necessário. Foi trabalhando de manhã e à tarde e fazendo faculdade à noite que ela construiu a nossa vida juntas. Ela era, é e sempre será o pilar da minha vida. Se hoje eu construo pontes,

prédios e sonhos, foi porque antes ela construiu, sozinha, o chão firme onde eu aprendi a engatinhar.

E o anjo da guarda tinha ajudantes. Tia Valéria me amou como filha desde o meu nascimento. Eu não sei de que material Deus esculpe as pessoas, mas ela e eu somos feitas da mesma coisa — eu tenho certeza. Tia Carol, a tia que me abraçou em seu seio e se fez de escudo sempre que a vida tentou me atacar. Tia Carol, que foi mãe quando eu precisei. Que foi pai quando precisei. Foi tia, ainda quando eu não merecia. Tia Carol foi, é e sempre será uma segunda mãe para mim e esteve ao meu lado durante toda a vida, sempre me fornecendo as armas necessárias para que eu estivesse à altura das batalhas nos dias difíceis. Elas foram cobertor nos meus dias frios e a certeza de que eu jamais estaria sozinha.

Minha avó, com sua elegância firme e amorosa, me ensinou que educação vai além dos livros que comprava para mim. Foi ela quem me deu aulas de etiqueta, mas, mais do que isso, me ensinou postura, respeito e dignidade — valores que levo comigo em cada espaço que ocupo. Tia Angélica foi ouvido durante as tempestades: ouviu minhas indignações, meus questionamentos adolescentes e meus desabafos sobre a vida, sempre com paciência. Minha irmã, com suas histórias das pequenas e grandes “besteiras” do dia a dia adolescente, trouxe leveza aos meus dias mais tensos e me arrancou sorrisos quando eu mais precisava. E minha priminha Cecília, com sua doçura e inocência encantadora, me lembra que a leveza ainda existe — e que crescer não significa deixar de sonhar.

Meu pai nunca foi uma relação simples para mim. Somos muito parecidos — por dentro e por fora, sou quase a cópia dele — e talvez por isso tenhamos vivido tantos embates. Brigamos, divergimos e, muitas vezes, nos confrontamos de frente. Mas foi justamente nessa intensidade que eu aprendi algumas das lições mais importantes da minha vida.

Com ele, aprendi sobre força, sobre persistência e sobre levantar depois de cada queda. Aprendi que amar também é atravessar as diferenças, é permanecer mesmo quando é difícil. Nossa relação nunca foi perfeita — foi real. E foi dentro dessa verdade que eu cresci.

Meu avô Vinícius foi presença serena ao longo de toda a minha vida. Ele ouviu minhas ponderações, minhas inquietações e meus questionamentos com uma leveza rara. Nunca diminuiu minhas dúvidas, nunca apressou minhas conclusões — apenas escutava, com sabedoria tranquila, como quem entende que crescer também é pensar em voz alta. Se hoje eu argumento, reflito e construo minhas próprias convicções, muito disso nasceu nas conversas calmas que tivemos ao longo dos anos.

Ao Esdras, gratidão por chegar junto nos desafios da vivência na engenharia.

Eu só tenho a agradecer a vocês. Vocês, família, são tudo para mim. Obrigada por me trazerem até aqui.

E, por fim, a todos que cruzaram meu caminho nessa jornada acadêmica, que acreditaram, incentivaram e caminharam comigo: este diploma não carrega apenas meu nome. Ele carrega histórias, memórias, lágrimas, superações e, acima de tudo, amor. Esse diploma não é meu, minha participação foi tão pouca. Ele pertence a vocês.

RESUMO

Diante do crescimento projetado da construção civil até 2030 e das diretrizes da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC) de 2025, esta pesquisa aborda a necessidade urgente de mitigar as emissões de CO₂ na produção de concreto. O objetivo geral consistiu em determinar a dosagem experimental de um concreto ecoeficiente impermeável, substituindo parcialmente o cimento Portland por sílica e incorporando aditivo cristalizante, visando a geração de créditos de carbono através da eficiência material. A metodologia adotou o método de dosagem ABCP para produzir e comparar dois grupos: o Concreto Convencional (CC) e o Concreto Ecoeficiente (CE) com 10% de substituição de cimento por sílica e 0,8% de aditivo impermeabilizante Penetron Admix. A validação tecnológica envolveu ensaios de resistência à compressão axial, absorção por capilaridade e análise microestrutural via MEV e EDS. Os resultados demonstraram a superioridade técnica do CE, que atingiu 35,29 MPa aos 28 dias, um incremento de 7,1% em relação ao convencional. Além de apresentar uma redução drástica de 80,25% na permeabilidade, validada pela formação de cristais na microestrutura. No âmbito ambiental, a estratégia de dosagem permitiu a economia de 44,44 kg de cimento por metro cúbico, resultando na mitigação de 0,02844 toneladas de CO₂/m³, o que viabiliza a geração de créditos de carbono equivalentes. A análise econômica indicou que, embora o custo inicial do CE (R\$ 832,97/m³) seja superior ao do CC (R\$ 562,36/m³), a solução se justifica pela durabilidade estendida e pelo alinhamento aos critérios ESG, transformando a eficiência técnica em um ativo financeiro e ambiental para o setor da construção civil.

Palavras-chave: concreto ecoeficiente; sílica; impermeabilizante; créditos de carbono; sustentabilidade.

ABSTRACT

Given the projected growth of the construction industry until 2030 and the guidelines of the National Circular Economy Strategy (ENEC) for 2025, this research addresses the urgent need to mitigate CO₂ emissions in concrete production. The overall objective was to determine the experimental mix design of an eco-efficient waterproof concrete, partially replacing Portland cement with silica fume and incorporating a crystallizing additive, aiming to generate carbon credits through material efficiency. The methodology adopted the ABCP mix design method to produce and compare two groups: Conventional Concrete (CC) and Eco-efficient Concrete (CE) with 10% cement replacement by silica and 0.8% Penetron Admix waterproofing additive. Technological validation involved axial compression strength tests, capillary absorption, and microstructural analysis via SEM and EDS. The results demonstrated the technical superiority of CE, which reached 35.29 MPa at 28 days, an increase of 7.1% compared to conventional concrete. In addition to presenting a drastic 80.25% reduction in permeability, validated by the formation of crystals in the microstructure, the dosage strategy allowed for savings of 44.44 kg of cement per cubic meter in environmental terms, resulting in the mitigation of 0.02844 tons of CO₂/m³, which enables the generation of equivalent carbon credits. The economic analysis indicated that, although the initial cost of CE (R\$ 832.97/m³) is higher than that of CC (R\$ 562.36/m³), the solution is justified by its extended durability and alignment with ESG criteria, transforming technical efficiency into a financial and environmental asset for the civil construction sector.

Keywords: eco-efficient concrete; silica; waterproofing agent; carbon credits; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais.....	32
Figura 2 – Detalhamento Condição C do método ABCP.....	35
Figura 3 – Representação da formulação para o cálculo da dosagem ABCP.....	36
Figura 4 – Micrografia MEV do concreto convencional (CC).....	43
Figura 5 – Micrografia MEV do concreto ecoeficiente(CE).....	44
Figura 6 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto convencional..... (CC).....	44
Figura 7 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto ecoeficiente(CE).....	45
Figura 8 – Logo de divulgação do 1º Congresso Nacional de Inovação Brasileira de Engenharia e Tecnologia (CONIBET).....	55
Figura 9 – Logo de divulgação do 1º Congresso Nacional de Engenharia (CONENG).....	55
Figura 10 – Logo de divulgação do 66º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)..	55
Figura 11 – Apresentação no 66º IBRACON.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela experimental para definição do slump.....	36
Tabela 2: Tabela experimental para dosagem da brita em volume.....	37
Tabela 3: Dosagem concreto convencional (CC) em m ³ segundo o método ABCP.....	38
Tabela 4: Traço do concreto convencional (CC) para o estudo.....	38
Tabela 5: Dosagem concreto ecoeficiente (CE) em m ³ segundo o método ABCP.....	39
Tabela 6: Traço do concreto ecoeficiente (CE).....	39
Tabela 7: Medições das massas do CC e CE(NBR 9779/2012).....	42
Tabela 8: Absorção de água por capilaridade do CC e CR (NBR 9779/2012).....	42
Tabela 9: Custos do Concreto Convencional - CC.....	50
Tabela 10 : Custos do Concreto impermeável (Cim).....	51
Tabela 11: Custos do Concreto Ecoeficiente - CE.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de crescimento relativa à compressão axial dos concretos CC e CE 40	
Gráfico 2 – Capilaridade do CC e CE(NBR 9779/2012).....	43
Gráfico 3 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto convencional (CC).....	45
Gráfico 4 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto ecoeficiente(CE).	46
Gráfico 5 – Custo CC x CIM x CE.....	52
Gráfico 6 – Publicações científicas que contribuíram para o tema.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CAA – Classe de Agressividade Ambiental
- CBE – Cotas Brasileiras de Emissão
- CBios – Créditos de Descarbonização
- CC – Concreto Convencional
- CE – Concreto Ecoeficiente
- CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
- Cim – Concreto Impermeável
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- CRVE – Certificado de Redução ou Remoção Voluntária de Emissões
- EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy* (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
- ENEC – Estratégia Nacional de Economia Circular
- ESG – *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança)
- fck – Resistência Característica do Concreto à Compressão
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)
- MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MPa – Mega Pascal
- NBR – Norma Brasileira
- RCE – Redução Certificada de Emissão
- REDD+ – Redução de Emissões provenientes de Desmatamento e Degradação Florestal
- SBCE – Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
- SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
- SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
- WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. JUSTIFICATIVA.....	20
3. OBJETIVOS.....	20
3.1. OBJETIVO GERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1 RECOMENDAÇÃO DE DOSAGENS PARA EXECUÇÃO DO TRAÇO ÓTIMO DO CONCRETO COM SÍLICA E IMPERMEABILIZANTE PENETRON ADMIX.....	21
4.2 IMPACTO DA SÍLICA E IMPERMEABILIZANTE AO CONCRETO.....	22
4.3 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM, NORMATIZAÇÃO E PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	22
4.3.1 Definição do método ABCP.....	22
4.3.1.1 <i>Definição da Resistência de Dosagem e Controle Estatístico.....</i>	22
4.3.1.2 <i>Critérios de Durabilidade e Relação Água/Cimento.....</i>	23
4.3.1.3 <i>Estimativa de Consumo de Água e Trabalhabilidade.....</i>	23
4.3.1.4 <i>O Método do Volume Absoluto para Agregados.....</i>	23
4.3.1.5 <i>Ajuste experimental do traço.....</i>	24
4.3.1.6 <i>Validação tecnológica.....</i>	24
4.3.2 Normatizações correlatas ao concreto.....	24
4.3.3 Produção do concreto convencional (CC) e concreto ecoeficiente (CE).....	25
4.4 COMPREENDENDO O CRÉDITO DE CARBONO E SUA APLICAÇÃO AO TEMA.....	26
4.4.1 Concreto e origem.....	26
4.4.2 Regulamentação e comercialização.....	27
4.4.3 Projetos e certificações.....	28
4.4.4 Intermediação e negociação.....	28
4.4.5 Elo com o tema.....	29
4.5 CONCRETO ECOEFICIENTE IMPERMEÁVEL COM GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....	30
4.5.1 Conceito de ecoeficiência.....	30
4.5.2 Ecoeficiência do concreto proposto.....	31
5. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	32
5.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	32
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	32
5.2.1 Agregado miúdo.....	32
5.2.2 Agregado graúdo.....	32
5.2.3 Cimento.....	33
5.2.4 Adição sílica	33
5.2.5 Aditivo impermeabilizante.....	33

5.2.6	Água.....	33
5.3	DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	33
5.3.1	Método de dosagem.....	33
5.3.2	Parâmetros.....	33
5.4	PROCEDIMENTOS DE PRODUÇÃO E CONTROLE.....	33
5.4.1	Normatização.....	33
5.4.2	Mistura.....	33
5.4.3	Controle no estado fresco - slump test.....	34
5.5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E MICROESTRUTURA.....	34
5.5.1	Ensaio físico-mecânico.....	34
5.5.1.1	Resistência à Compressão Axial.....	34
5.5.1.2	Absorção de Água por Capilaridade.....	34
5.5.2	Análise microestrutural.....	34
5.5.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	34
5.5.2.2	Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).....	34
5.6	ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA E VIABILIDADE.....	34
5.6.1	Redução de demanda e mitigação de CO ₂ quanto ao concreto ecoeficiente... 34	
5.6.2	Geração de créditos de carbono.....	35
5.6.3	Estudo de viabilidade.....	35
5.7	TRATAMENTO DE DADOS E PRODUÇÕES CIENTÍFICAS.....	35
5.7.1	Organização dos resultados.....	35
5.7.2	Publicação.....	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
6.1	DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL (CC) E DO CONCRETO ECOEFICIENTE (CE).....	36
6.2	ENSAIOS CONCRETO CC E CE.....	40
6.2.1	Resistência à compressão axial.....	40
6.2.2	Capilaridade.....	41
6.2.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	44
6.2.4	Slump test.....	47
6.3	A REDUÇÃO DE DEMANDA DO CIMENTO POR SÍLICA E A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....	47
6.4	ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DO CE.....	48
6.4.1	Viabilidade técnica.....	48
6.4.2	Viabilidade ambiental.....	49
6.4.3	Viabilidade econômica.....	49
6.5	PUBLICAÇÕES E APRESENTAÇÕES EM CONGRESSOS DAS PRODUÇÕES CIENTÍFICAS QUE CONTRIBUÍRAM PARA O TEMA.....	53
6.6	APROFUNDANDO SOBRE O MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO... 56	

6.6.1 Estrutura e segmentação do mercado.....	56
6.6.2 Precificação e mercado futuro.....	57
6.6.3 Rigor técnico e certificação.....	57
6.6.4 Riscos e desafios do investimento.....	57
6.6.5 O papel estratégico do Brasil.....	58
7. CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

Em referência ao potencial de crescimento da construção civil até 2030(WORLD ECONOMIC FORUM, 2025), mudanças na composição do concreto e a escassez de recursos naturais; propor soluções viáveis que priorizem ecoeficiência e benefício ao bem estar da população torna-se um desafio em tempos modernos. Nesse sentido, a Estratégia Nacional de Economia Circular-ENEC surge como possibilidade a utilização, reutilização e reciclagem de materiais alternativos, visando minimizar impactos ambientais e otimizar o uso de recursos naturais (BRASIL, 2025).

Em primeiro momento, a aplicação de materiais alternativos em substituição parcial do cimento portland promove redução da emissão de dióxido de carbono e do consumo da matéria-prima(JUNIOR; BARATA, 2022). Diante do exposto, e em alusão a um dos materiais construtivos mais comuns nas construções brasileiras: o concreto(QUATROQUE *et. al*, 2023), poder-se-á a utilização de sílica e impermeabilizante penetron ADMIX com rastreador no concreto. Desse modo, promovendo maior durabilidade, redução nos impactos ambientais, geração de créditos de carbono e viabilidade.

Por outro lado, segundo SILVEIRA e CALADO(2024) a adição mineral de sílica ou microssílica compõe-se majoritariamente de sílica. Por conseguinte, o aditivo impermeabilizante atua por cristalização integral e sua composição contém cimento portland, compostos químicos ativos e rastreador químico(PENETRON, 2025).

Para os autores Cardoso e Silva (2023) em estudos laboratoriais percebeu-se que a redução da porosidade da mistura endurecida do concreto melhora o desempenho mecânico. Desse modo, confirmando em ensaios em laboratório que a incorporação do aditivo impermeabilizante e a adição do estudo promovem maior resistência à compressão em relação ao concreto convencional (LIMA *et. al*, 2025). Além disso, contribui para maior durabilidade(LEMA *et. al*, 2024).

A substituição parcial do cimento pela adição mineral supracitada reduz a emissão de dióxido de carbono, pois gera uma menor demanda por cimento portland, assim, mitigando os impactos ambientais(SANTOS; ALBUQUERQUE; RIBEIRO, 2020). Diferente do cimento, cuja produção impõe a queima do clínquer, processo esse

que emite consideravelmente dióxido de carbono na atmosfera. Assim sendo, a sílica desta pesquisa é obtida pela captura de vapores exauridos na produção de ligas de silício, um processo que reaproveita esse subproduto industrial sem a necessidade da clínquerização térmica dedicada (HABERT *et. al*, 2023).

De acordo com a autora GUITARRARA (2025), crédito de carbono ou Redução Certificada de Emissão (RCE), é um certificado que comprova a diminuição por tonelada da emissão de gases de efeito estufa (inclusive o dióxido de carbono). Diante disso, a redução do CO₂ na produção do concreto ecoeficiente impermeável contribui para geração desses créditos pela redução da demanda do cimento (GAMA; SCALOPPE, 2023). Atualmente, um crédito de carbono no Brasil possui valor entre 5 a 10 dólares (EMISFERA, 2025). A análise de custos indiretos baseia-se no fator de emissão brasileiro, estimado em 0,64 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2021).

Na produção de concretos não convencionais, o teor de 10% de sílica é consolidado como o ponto de máxima eficiência. Estudos de Rao e Mithun (2024) e Vasudevan *et. al.* (2025) confirmam que essa dosagem otimiza a resistência e a durabilidade, superando o ganho de desempenho insuficiente de teores menores e mitigando os riscos de retração ou perda de trabalhabilidade associados a teores superiores.

Diante do exposto, o trabalho propõe determinar o traço de concreto com sílica e aditivo impermeabilizante que viabilize a geração de créditos de carbono, fundamentando-se na produção de dados científicos para o avanço da construção civil sustentável.

2. JUSTIFICATIVA

A pesquisa visou ampliar o conhecimento técnico-científico a respeito do concreto ecoeficiente com adição de sílica e aditivo impermeabilizante, além de obter informações que possam contribuir para a descarbonização da construção civil, otimização do uso de recursos naturais por meio da economia circular, bem como a conservação de insumos minerais e aumento da durabilidade das estruturas, a fim de verificar a viabilidade técnica e econômica da geração de créditos de carbono a partir da redução das emissões de CO₂ no setor produtivo. Cabe salientar também a importância de executar pesquisas voltadas à inovação tecnológica de materiais não convencionais, já que o canteiro de obras e a indústria da construção são locais de promoção de práticas de sustentabilidade global e desenvolvimento econômico sustentável.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Dosagem ou traço do concreto ecoeficiente impermeável com geração de créditos de carbono.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamento bibliográfico para fundamentar o traço do concreto proposto, os créditos de carbono e a solução proposta;
- Determinar dosagem do Concreto convencional (CC) e do concreto ecoeficiente (CE)
- Produzir concreto convencional e concreto ecoeficiente;
- Avaliar os concretos CC e CE quanto a: resistência à compressão axial, capilaridade, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS);
- Determinar a redução de demanda do cimento por sílica e a geração de créditos de carbono;
- Avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do CE;
- Organizar resultados em tabelas e gráficos;
- Publicar e apresentar em congressos produções científicas que contribuíram para o tema.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 RECOMENDAÇÃO DE DOSAGENS PARA EXECUÇÃO DO TRAÇO ÓTIMO DO CONCRETO COM SÍLICA E IMPERMEABILIZANTE PENETRON ADMIX

O estudo prévio do traço ótimo do concreto é imprescindível para garantir o desempenho estrutural, a durabilidade e a viabilidade econômica. A definição precisa das proporções entre cimento, agregados, água, adições e aditivos, os quais combinados permitem alcançar a resistência característica à compressão adequada (TUTIKIAN; HELENE, 2011) que é um dos principais parâmetros no dimensionamento de estruturas em concreto armado.

É notória a importância das adições e aditivos no concreto, contudo torna-se imprescindível entender as dosagens das adições adotadas atualmente. Os autores SOUZA (2022), além de COSTA, PINTO e SANTOS (2021), em seus estudos indicam que a dosagem ótima para a sílica seria de 10% em substituição do cimento portland. Sendo esse valor reforçado na pesquisa de SUGAMOSTO (2007).

O impermeabilizante contempla a dosagem ótima intrinsecamente ligada a recomendação do fabricante do insumo (CONSERTA EXPRESS, 2023). Uma exemplificação pertinente seria a recomendação da PENETRON (2025) quanto a dosagem ótima do seu impermeabilizante por cristalização integral ser de 0,8% da massa dos aglomerantes.

Complementando essas diretrizes, a ABNT NBR 12653/2014 define os requisitos para adições minerais ao concreto, como sílica. Essas adições visam melhorar o desempenho do concreto, especialmente em ambientes agressivos. Sua incorporação ao concreto, em dosagens entre 3% e 10% da massa de cimento, contribui para o aumento da resistência mecânica, redução da porosidade e maior durabilidade frente à penetração de íons cloreto e sulfatos (ABNT, 2014).

Nesse contexto, a busca por um concreto ecoeficiente e impermeável demanda a aplicação de indicadores de sustentabilidade que vinculem a resistência à economia de recursos. Segundo Damini *et. al.* (2010), a otimização da dosagem para reduzir a quantidade de cimento por m³ é o que permite mitigar o impacto ambiental sem comprometer a integridade da estrutura. Com a impermeabilidade da matriz e a incorporação ao concreto proposto, o traço não apenas amplia a resistência e durabilidade, mas também fundamenta a quantificação das emissões de CO₂ pela

quantidade reduzida de cimento do traço, transformando essa eficiência técnica no lastro necessário para a geração de créditos de carbono.

4.2 IMPACTO DA SÍLICA E IMPERMEABILIZANTE AO CONCRETO

Segundo Lima *et. al.* (2025) a sílica e impermeabilizante penetron admix promovem um aumento direto na resistência mecânica conforme cresce o teor dessas adições, no entanto, esse ganho é acompanhado por um aumento considerável nos custos de produção.

O aditivo impermeabilizante PENETRON ADMIX (PENETRON, 2025) possibilita ao concreto menor permeabilidade com a formação de uma camada cristalizada na estrutura do material (LIMA *et. al.*, 2025).

A sinergia entre a sílica e o aditivo cristalizante promove o refinamento da microestrutura, garantindo uma matriz de elevada compacidade e impermeabilidade (LIMA *et. al.*, 2025; PENETRON, 2025). Essa performance técnica define o concreto ecoeficiente, pois a ampliação da vida útil da estrutura reduz a demanda por futuras intervenções e novos insumos. Conseqüentemente, a mitigação das emissões de CO₂ com a redução do uso do cimento, assim possibilitando a geração de créditos de carbono, transformando a durabilidade superior em um ativo ambiental mensurável.

4.3 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM, NORMATIZAÇÃO E PRODUÇÃO DO CONCRETO

4.3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO ABCP

A dosagem do concreto, ou proporcionamento de misturas, consiste no processo de definição das quantidades ótimas de cimento, água e agregados para a obtenção de um material que atenda a requisitos específicos de trabalhabilidade no estado fresco e de resistência e durabilidade no estado endurecido. A metodologia analisada nos documentos baseia-se em princípios racionais, fundamentados no conceito de volumes absolutos e no ajuste experimental, alinhada às práticas do método ABCP, conforme as afirmações de Curti (2020).

4.3.1.1 Definição da Resistência de Dosagem e Controle Estatístico

O ponto de partida do método é a distinção entre a resistência de projeto e a resistência de dosagem. A literatura técnica estabelece que a mistura não deve ser

projetada para atingir apenas a resistência característica mínima especificada em projeto, mas sim um valor médio superior, denominado resistência de dosagem.

Este incremento de resistência visa garantir a segurança estrutural diante da variabilidade inerente ao processo de produção do concreto. A magnitude dessa margem de segurança é determinada estatisticamente, considerando um coeficiente de confiança normativa e o desvio padrão da produção. O desvio padrão, por sua vez, é uma variável teórica definida em função do rigor do controle tecnológico empregado na obra (condições de preparo, medição dos insumos e correção da umidade dos agregados).

4.3.1.2 Critérios de Durabilidade e Relação Água/Cimento

A determinação da relação água/cimento (a/c) não é regida unicamente pela resistência mecânica, mas também por critérios de durabilidade associados ao ambiente de exposição da estrutura. O método exige a verificação de dois parâmetros:

Requisito Mecânico: Utiliza-se a correlação clássica (Lei de Abrams) para identificar o fator a/c necessário para atingir a resistência de dosagem calculada.

Requisito Normativo: Considera-se a Classe de Agressividade Ambiental (CAA) do local da obra (seja urbana, marinha ou industrial).

As normas técnicas impõem um limite máximo para a relação a/c e um consumo mínimo de cimento para assegurar a proteção das armaduras e a vida útil da estrutura. Adota-se, invariavelmente, a condição mais restritiva (o menor fator a/c) entre o cálculo de resistência e a exigência normativa.

4.3.1.3 Estimativa de Consumo de Água e Trabalhabilidade

A quantidade de água por unidade de volume de concreto é estimada em função da trabalhabilidade desejada e das características físicas dos agregados. A consistência é definida pela classe de abatimento (slump test), selecionada de acordo com a complexidade da peça a ser concretada e os meios de transporte e lançamento.

O método utiliza tabelas empíricas que correlacionam esse abatimento com a dimensão máxima característica do agregado graúdo, pressupondo que agregados maiores demandam menos água para molhar sua superfície específica.

4.3.1.4 O Método do Volume Absoluto para Agregados

A determinação das proporções dos agregados é a etapa central do cálculo. O procedimento difere para o agregado graúdo e miúdo:

Agregado Graúdo (Brita): O volume de pedra é fixado para criar um esqueleto granular otimizado. Este volume é determinado através de tabelas que relacionam a dimensão máxima da brita com o módulo de finura da areia, buscando a máxima compactidade da mistura.

Agregado Miúdo (Areia): A quantidade de areia é calculada pelo princípio do volume absoluto. O método pressupõe que o concreto é um material sem vazios (após a compactação), de modo que a soma dos volumes de cimento, água, ar incorporado e brita é subtraída do volume unitário total (1 m^3). O espaço restante deve ser obrigatoriamente preenchido pela areia.

As massas finais são obtidas multiplicando-se os volumes calculados pelas massas específicas reais de cada material.

4.3.1.5 Ajuste experimental do traço

A literatura enfatiza que o cálculo teórico fornece apenas uma aproximação inicial, denominada "traço unitário". Devido às variações na forma e textura dos agregados locais, é mandatória a realização de uma mistura experimental.

O objetivo do traço é verificar se a consistência real corresponde à projetada. Caso o abatimento obtido no ensaio difira do desejado, deve-se corrigir o teor de água da mistura. Essa alteração modifica a relação a/c efetiva e exige o recálculo das proporções dos agregados e do cimento para manter o volume unitário constante. Nesta etapa, também podem ser introduzidos aditivos químicos (como plastificantes ou cristalizantes), dosados percentualmente sobre a massa do aglomerante.

4.3.1.6 Validação tecnológica

A etapa conclusiva do método consiste na validação do traço ajustado através de ensaios laboratoriais padronizados. São moldados corpos de prova cilíndricos para a realização de testes de resistência à compressão, tração por compressão diametral e absorção de água em diferentes idades de cura. O volume de concreto produzido para esses testes deve prever uma margem de perda técnica para garantir a moldagem de todos os exemplares necessários para a análise estatística dos resultados.

4.3.2 NORMATIZAÇÕES CORRELATAS AO CONCRETO

As produções dos concretos seguem as diretrizes da NBR 12655/2022 (Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação) e NBR 12653/2014

(Adições minerais para concreto de cimento Portland — Requisitos) , e os ensaios realizam-se conforme as normas brasileiras, incluindo o ensaio da NBR 16889/2020 (Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone). Ademais, a ABNT NBR 5739 (2018) estabelece o método para o ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos, sendo o principal parâmetro para determinar a resistência mecânica (f_{ck}) do concreto.

A norma NBR 12655/2022, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, estabelece os procedimentos para o controle tecnológico do concreto de cimento Portland. No que se refere ao preparo, a norma determina que a dosagem dos materiais deve ser realizada com base em estudos prévios que assegurem a resistência, durabilidade e trabalhabilidade do concreto, considerando fatores como tipo de cimento, agregados, aditivos e relação água/cimento (ABNT, 2022).

A homogeneização da mistura deve garantir uniformidade, com tempo de mistura ajustado conforme o equipamento utilizado. A norma também recomenda que a temperatura do concreto não ultrapasse 30 °C, especialmente em regiões de clima quente, como Maceió. O uso de aditivos é permitido, desde que compatível com os materiais e objetivos do projeto. Além disso, devem ser realizados ensaios de consistência, densidade, temperatura e resistência à compressão, com registro completo de todas as etapas para garantir rastreabilidade e controle de qualidade (ABNT, 2022).

A ABNT NBR 9779 (2012) fundamenta a análise da absorção de água por capilaridade, sendo o ensaio decisivo para validar a estanqueidade da matriz cimentícia. Na literatura, a eficácia dessa proteção é atribuída primordialmente à ação do aditivo impermeabilizante, que promove a cristalização dos poros e veda os canais condutores de umidade. No contexto de um concreto ecoeficiente impermeável, esse mecanismo de barreira é o que assegura a integridade da estrutura contra agentes agressivos. Consequentemente, ao garantir uma vida útil prolongada e reduzir a necessidade de manutenções futuras.

4.3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL (CC) E CONCRETO ECOEFICIENTE (CE):

Dentro da literatura técnica de dosagem experimental, a análise comparativa entre matrizes de diferentes naturezas é o procedimento padrão para validar a eficácia de novas adições minerais. Preconiza-se o Concreto convencional (CC) como uma

mistura convencional de cimento, água e agregados, isenta de modificadores químicos ou minerais. Em contrapartida, a literatura aponta que o desenvolvimento de um Concreto Ecoeficiente (CE), mediante a incorporação de sílica e aditivo impermeabilizante penetron admix, visa a superação das propriedades do CC através do refinamento da microestrutura e da redução da permeabilidade (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Sob o prisma do Concreto Ecoeficiente, essa contraposição teórica é fundamental, pois é a partir da superioridade técnica do CE em relação ao CR que se consubstancia a viabilidade para a geração de créditos de carbono.

4.4 COMPREENDENDO O CRÉDITO DE CARBONO E SUA APLICAÇÃO AO TEMA

4.4.1 CONCEITO E ORIGEM

Os créditos de carbono é um certificado digital que representa uma das ferramentas mais poderosas na luta contra as mudanças climáticas. Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de dióxido de carbono que deixou de ser emitida na atmosfera, diminuindo assim o efeito estufa e criando um sistema onde a sustentabilidade se torna financeiramente recompensadora (EMISFERA, 2025).

A gênese do mercado de créditos de carbono remonta à adoção do Protocolo de Kyoto (1997), estabelecido como resposta técnica à crise climática decorrente do efeito estufa antrópico. Esse fenômeno é intensificado pela emissão excessiva de Gases de Efeito Estufa (GEE), notadamente o Dióxido de Carbono (CO₂), o Metano (CH₄) e o Óxido Nitroso (N₂O), no geral provenientes de diversas atividades industriais e da queima de combustíveis fósseis. Tais emissões desequilibram o balanço térmico do planeta ao reterem calor na biosfera, gerando impactos globais severos, como o aquecimento global e a intensificação de eventos climáticos extremos. Diante da ineficácia de acordos voluntários prévios, o protocolo instituiu o primeiro instrumento jurídico vinculante em escala global, obrigando as nações do Anexo I (países industrializados) a reduzirem suas emissões em uma média de 5,2% em relação aos níveis de 1990.

Sob a ótica geopolítica, o tratado fundamentou-se no princípio de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, dividindo as obrigações entre as nações industrializadas e os países em desenvolvimento (Não-Anexo I), como Brasil, China e Índia. Nesse cenário, destaca-se o protagonismo brasileiro, sob a gestão de

Fernando Henrique Cardoso, na concepção e estruturação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Essa ferramenta foi essencial para permitir a conversão de projetos de mitigação em ativos transacionáveis, conferindo lastro financeiro e auditável à sustentabilidade técnica. Historicamente, essa evolução normativa possibilitou que a redução de emissões fosse quantificada e valorizada, fundamentando a atual transição de setores produtivos para o uso de tecnologias de baixo impacto ambiental, onde o desempenho de novos processos é convertido em um ativo financeiro mensurável.

4.4.2 REGULAMENTAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO

O mercado de créditos de carbono no Brasil é regido por dois sistemas complementares, sendo o mercado regulado estruturado pela Lei Federal nº 15.042/2024, a qual instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Esse arcabouço legal estabelece limites compulsórios para organizações que emitem acima de 25.000 toneladas de dióxido de carbono equivalente ao ano, exigindo a conciliação periódica de seus ativos climáticos para evitar sanções administrativas. Para as empresas que emitem entre 10.000 e 25.000 tCO₂ anuais, a legislação impõe obrigações de transparência que demandam o fornecimento de planos de monitoramento e relatórios de emissão detalhados, ainda que sem a obrigatoriedade imediata de redução compulsória de gases.

O descumprimento dessas normas sujeita os operadores a sanções administrativas que podem ser aplicadas de forma isolada ou cumulativa. As penalidades incluem advertências, multas, embargos de atividade e a suspensão parcial ou total de instalações. Para pessoas jurídicas, a multa não será inferior ao custo das obrigações descumpridas, limitada a 3% do faturamento bruto do ano anterior, podendo chegar a 4% em caso de reincidência. Além disso, a lei prevê restrições de direitos, como o cancelamento de registros, a perda de incentivos fiscais e a proibição de contratar com a administração pública por até três anos.

A conformidade ambiental nesse sistema é verificada por meio de uma equação de balanço contábil, na qual o volume total de emissões reais verificadas deve ser obrigatoriamente coberto pela soma das CBEs (Cotas Brasileiras de Emissão) e dos CRVEs (Certificados de Redução ou Remoção Voluntária de Emissões). A necessidade de compra surge quando as emissões reais da empresa ultrapassam o teto de cotas

distribuídas pelo governo, obrigando-a a adquirir ativos de terceiros para cobrir o excedente e manter-se dentro da legalidade.

A oportunidade de venda ocorre quando uma organização, através de eficiência tecnológica ou projetos de mitigação, emite menos do que o seu limite permitido, gerando um superávit de ativos comercializáveis. Essa dinâmica é sustentada por um mercado em franca expansão que deve movimentar trilhões de reais até 2050 (VALOR ECONÔMICO, 2025). Segundo o CEBDS (2024), esse sistema obrigatório promove não apenas a redução significativa das emissões, mas também a geração de novos ativos financeiros.

No cenário brasileiro, as maiores oportunidades concentram-se em projetos de conservação de florestas existentes REDD investimentos e tecnologias, transformando a preservação ambiental num ativo financeiro estrategicamente recompensador.

4.4.3 PROJETOS E CERTIFICAÇÕES

Os projetos de reflorestamento e agricultura regenerativa, além de iniciativas de eficiência energética que otimizam o consumo em processos industriais. De acordo com a EMISFERA (2025), cada crédito de carbono representa uma tonelada de dióxido de carbono que deixou de ser emitida, criando um sistema onde a preservação ambiental se torna financeiramente recompensadora.

Para assegurar a validade desses ativos, o processo de certificação segue padrões internacionais rigorosos, como o Verra (Verified Carbon Standard) e o Gold Standard. Esses protocolos exigem auditorias independentes e a validação de metodologias científicas para garantir que os créditos gerados sejam adicionais, mensuráveis e permanentes. Segundo o SEBRAE (2023), o fortalecimento desses marcos regulatórios e de certificação é essencial para que o Brasil consolide sua posição estratégica, visto que o país já ocupa o 7º lugar mundial em volume de emissões evitadas

4.4.4 INTERMEDIÇÃO E NEGOCIAÇÃO

Conforme dados do portal INVESTING.COM (2025), os contratos futuros de crédito de carbono com vencimento em 2025 atingiram patamares de aproximadamente 79 euros por tonelada em bolsas internacionais. Já no mercado voluntário brasileiro, os preços variam entre US\$ 5 e US\$ 10, com tendência de valorização acentuada à medida que as regulações climáticas avançam.

Para investidores iniciantes ou empresas que buscam compensações pontuais, a intermediação ocorre por meio de plataformas digitais que democratizam o acesso ao setor. Instituições como a BVRio e o sistema de CBios na bolsa brasileira (B3, 2025) figuram como ambientes consolidados para a transação de créditos, acompanhadas por soluções tecnológicas como Climate Vault e Moss.Earth. Essas ferramentas operam sob rigorosos critérios de rastreabilidade, assegurando que cada título negociado possua lastro ambiental verificado e livre de duplicidade.

Além do acesso direto, a negociação de créditos de carbono é viabilizada por meio de fundos de investimento especializados, que oferecem diversificação de carteira e gestão profissional de ativos. Estruturas como o Vitreo Carbono, o Trend Carbono Zero FIM da XP Investimentos e o BB Multimercado Carbono Longo Prazo do Banco do Brasil permitem que o capital privado seja direcionado a projetos de alto impacto. Segundo o SEBRAE (2023), essa sofisticação dos mecanismos financeiros é essencial para que o Brasil capitalize seu potencial estratégico, transformando passivos ambientais em oportunidades de rentabilidade e desenvolvimento tecnológico.

4.4.5 ELO COM O TEMA

O nexos fundamental entre a tecnologia do concreto e a governança climática reside na urgência de mitigar os impactos da indústria do cimento. Esse setor responde por aproximadamente 8% das emissões globais de carbono, o que representa três vezes mais do que as emissões de toda a indústria da aviação (GALDINO, 2026; OSAKA, 2023).

A tese central desta pesquisa sustenta que a adição de sílica permite uma redução considerável na demanda por cimento Portland na dosagem, sem comprometer o desempenho estrutural do material. Essa economia de ligante atua diretamente na origem do problema ambiental. Ao reduzir o consumo de clínquer, cuja produção é intensiva em energia e emissões, viabiliza-se a geração de créditos de carbono por meio da chamada emissão evitada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A eficácia dessa substituição é fundamentada na alta reatividade pozolânica da sílica, que otimiza a matriz cimentícia e permite atingir as propriedades de projeto com uma menor quantidade de cimento. Esse ganho de ecoeficiência transforma o concreto em um instrumento ativo de descarbonização.

Cada tonelada de cimento economizada resulta na redução proporcional de Gases de Efeito Estufa (GEE) lançados na atmosfera (MALHOTRA; MEHTA, 1996). Segundo o CEBDS (2024), a validação técnica dessas reduções é o que permite converter a performance do material em Certificados de Redução Voluntária de Emissões (CRVEs), conferindo lastro financeiro à inovação tecnológica.

Dessa forma, o projeto de um concreto impermeável e durável consolida-se como um ativo financeiro dentro da nova economia verde. Ao demonstrar que a sílica diminui a necessidade de cimento, a pesquisa insere o setor da construção civil no mercado de capitais ambientais.

4.5 CONCRETO ECOEFICIENTE IMPERMEÁVEL COM GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Conforme destacado pelo CEBDS (2024), a integração de novos materiais de baixo impacto é fundamental para que as empresas alcancem a conformidade ambiental e evitem as sanções previstas na legislação vigente. Portanto, o concreto ecoeficiente impermeável consolida-se como uma ferramenta de dupla vantagem, garantindo a integridade estrutural das edificações enquanto gera créditos de carbono. Essa abordagem promove a viabilidade técnica, ambiental e econômica no longo prazo, inserindo a construção civil em um modelo de economia verde (VALOR ECONÔMICO, 2025).

4.5.1 CONCEITO DE ECOEFICIÊNCIA

O conceito de ecoeficiência é um dos pilares da gestão ambiental moderna e fundamenta-se na premissa de que é possível fornecer bens e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, enquanto se reduz progressivamente o impacto ecológico e a intensidade de recursos ao longo de todo o ciclo de vida. Criado originalmente pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), este termo descreve a capacidade de "fazer mais com menos", promovendo o crescimento econômico e a redução da degradação ambiental. Segundo o CEBDS (2024), a ecoeficiência não deve ser vista apenas como uma estratégia de preservação, mas como uma ferramenta de competitividade empresarial que busca a eficiência máxima no uso de matérias-primas e energia, resultando em menor geração de resíduos e emissões.

Na indústria da construção civil, a aplicação deste conceito é crítica devido ao alto consumo de recursos naturais e à elevada pegada de carbono associada aos materiais convencionais. A ecoeficiência neste setor manifesta-se através da otimização das dosagens de materiais, da extensão da vida útil das estruturas e da substituição de insumos de alta intensidade energética por alternativas de menor impacto. Conforme apontam Mehta e Monteiro (2014), a busca por materiais ecoeficientes envolve o desenvolvimento de compósitos que ofereçam desempenho estrutural superior com uma demanda reduzida por cimento Portland, uma vez que a produção do clínquer é um processo ambientalmente oneroso.

4.5.2 ECOEFICIÊNCIA DO CONCRETO PROPOSTO

A ecoeficiência do concreto proposto fundamenta-se na simbiose entre o desempenho técnico superior e a minimização do impacto ambiental, materializada pela substituição estratégica de parte do cimento Portland por sílica. Diferente do cimento, cuja produção exige a queima do clínquer em altas temperaturas e a consequente descarbonatação do calcário. Nesse ínterim, um processo responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono, a sílica utilizada nesta pesquisa é obtida sem a necessidade de processos térmicos de clínquerização (HABERT *et. al.*, 2023). Essa característica intrínseca do material permite que a dosagem desenvolvida apresente uma pegada de carbono consideravelmente reduzida desde a fase de processamento de insumos, eliminando uma parte do passivo ambiental associado à queima industrial.

A eficácia desse concreto ecoeficiente reside na capacidade da sílica em atuar como um material pozolânico de alta reatividade, otimizando a estrutura de poros da matriz cimentícia através do efeito fíler e da formação de novos produtos de hidratação. Esse refinamento microestrutural garante menor permeabilidade e a proteção das armaduras contra agentes agressivos, o que estende a vida útil das estruturas mesmo com um consumo reduzido de ligante hidráulico (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O concreto torna-se impermeável com a blindagem devido a utilização do impermeabilizante Penetron Admix, estendendo ainda mais a vida útil das estruturas. (PENETRON, 2025).

5. METODOLOGIA DA PESQUISA

5.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Para fundamentar o traço proposto e a solução técnica, foram selecionados materiais com base em normas técnicas e literatura especializada (como Kihara, 1986 e SNIC, 2021), garantindo a viabilidade do concreto convencional (CC) e do concreto ecoeficiente (CE).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS



Figura 1 – Materiais
Fonte: autores, 2026

5.2.1 AGREGADO MIÚDO

Areia natural grossa (2 mm a 4,8 mm), obtida por dragagem no Rio Doce e estocada em local protegido.

5.2.2 AGREGADO GRAÚDO

Brita 1 (9,5 mm a 19 mm) de rocha gnaisse, proveniente de britagem em Maceió-AL.

5.2.3 CIMENTO

Cimento Portland composto com Fíler (CP II F – 32), selecionado para analisar o comportamento com diferentes adições.

5.2.4 ADIÇÃO SÍLICA

Sílica, adição pozolânica constituída essencialmente por sílica.

5.2.5 ADITIVO IMPERMEABILIZANTE

Penetron Admix, utilizado para promover a impermeabilização total por cristalização integral.

5.2.6 ÁGUA

Potável, fornecida pela concessionária local (BRK, Maceió-AL).

5.3 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM EXPERIMENTAL

A definição dos traços para o Concreto convencional (CC) e Concreto Ecoeficiente (CE) segue um método padronizado para garantir comparabilidade:

5.3.1 MÉTODO DE DOSAGEM

Foi adotado o método da ABCP apresentado por Curti(2020), uma adaptação da metodologia do ACI (American Concrete Institute).

5.3.2 PARÂMETROS

O método considera o tipo de cimento, a granulometria dos agregados, a relação água/cimento e as condições de produção para definir o traço ideal.

5.4 PROCEDIMENTOS DE PRODUÇÃO E CONTROLE

A etapa de execução experimental garante a padronização das misturas CR e CE:

5.4.1 NORMATIZAÇÃO

A produção segue as diretrizes da NBR 12821/2009.

5.4.2 MISTURA

Assegura-se a homogeneidade da mistura mediante utilização de betoneira.

5.4.3 *CONTROLE NO ESTADO FRESCO - SLUMP TEST*

Realização do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test) conforme a NBR 16889/2020 para verificar a consistência.

5.5 *AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E MICROESTRUTURA*

Os corpos de prova dos concretos CR e CE serão submetidos a ensaios rigorosos para validar as propriedades físico-mecânicas e microestruturais:

5.5.1 *ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS*

5.5.1.1 *Resistência à Compressão Axial*

Conforme NBR 5739/2018.

5.5.1.2 *Absorção de Água por Capilaridade*

Conforme NBR 9779/2012, para verificar a eficácia da impermeabilização.

5.5.2 *ANÁLISE MICROESTRUTURAL*

5.5.1.1 *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

Utilização de amostras secas e recobertas com ouro para obtenção de imagens detalhadas da microestrutura através de feixe de elétrons.

5.5.1.2 *Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)*

Identificação dos elementos químicos presentes (cálcio, silício, alumínio) para confirmar a composição aproximada das misturas.

5.6 *ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA E VIABILIDADE*

Nesta etapa, realiza-se o estudo comparativo para validar a redução de impacto ambiental e a viabilidade da solução:

5.6.1 *REDUÇÃO DE DEMANDA E MITIGAÇÃO DE CO₂ QUANTO AO CONCRETO ECOEFICIENTE*

Mensurar a redução do consumo de cimento por sílica. O cálculo utiliza o fator de emissão de 0,64 tCO₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2021).

5.6.2 GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Contabilização de um crédito de carbono para cada tonelada de dióxido de carbono mitigada por metro cúbico de concreto produzido.

5.6.3 ESTUDO DE VIABILIDADE

A integração dos resultados dos ensaios mecânicos (viabilidade técnica) com os cálculos da redução do cimento por sílica gera a mitigação de CO₂ (viabilidade ambiental) fundamentando a análise econômica do concreto proposto CE atrelada a orçamentos com estimativa de custos (viabilidade econômica).

5.7 TRATAMENTO DE DADOS E PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

Tratamento de Dados e Produção Científica: a etapa final consiste na sistematização e divulgação do conhecimento gerado:

5.7.1 ORGANIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Tabulação dos dados obtidos nos ensaios e elaboração de gráficos comparativos entre o concreto convencional e o ecoeficiente.

5.7.2 PUBLICAÇÃO

Elaboração de produções científicas baseadas nas evidências coletadas sobre a dosagem, desempenho e potencial de geração de créditos de carbono.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL (CC) E DO CONCRETO ECOEFICIENTE (CE)

O cálculo da dosagem pelo método ABCP inicia-se pela definição da resistência média necessária para garantir a segurança estrutural, compensando as variabilidades de execução. Utilizando a resistência característica à compressão (f_{ck}) de projeto de 25 MPa e o desvio padrão de 7,0 MPa referente à condição de preparo C (Figura 2), aplica-se a fórmula normativa onde o f_{cj} é igual a soma do f_{ck} com o produto de 1,65 pelo desvio padrão. Formulação representada na Figura 3.

Condição C $Sd = 7,0$ MPa	O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.
-------------------------------------	--

Figura 2 – Detalhamento Condição C do método ABCP
Fonte: Adaptado de Curti (2020) pelos autores, 2026

$$f_{cj-28 \text{ dias}} = f_{ck} + 1,65 \times sd$$

Onde

sd = desvio padrão que é definido teoricamente em função de como será preparado o concreto.

Figura 3 – Representação da formulação para o cálculo da dosagem ABCP
Fonte: Adaptado de Curti (2020) pelos autores, 2026

O resultado dessa operação define uma resistência alvo de 36,55 MPa. Com este valor, consulta-se a curva de Abrams para o cimento CP 32-F, identificando que a relação água/cimento necessária para atingir tal resistência é de 0,45. Este fator é verificado conforme a tabela de durabilidade da norma ABNT, que exige um valor máximo de 0,60 para a Classe de Agressividade II, validando assim o índice adotado.

Na sequência, determina-se o consumo de água com base na trabalhabilidade requerida e na granulometria dos agregados. Para um abatimento (slump) na faixa de 80 a 100 mm e agregado graúdo com dimensão máxima de 25 mm, a tabela experimental (Tabela 1) indica um consumo aproximado de 200 litros por metro cúbico.

O consumo de cimento é então derivado matematicamente, dividindo-se o consumo de água pela relação água/cimento estabelecida anteriormente. A divisão de 200 por 0,45 resulta em uma massa de 444,4 kg de cimento por metro cúbico de concreto.

Tabela 1: Tabela experimental para definição do slump

Consumo de água aproximada (l/m ³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de Curti (2020) pelos autores, 2026

O dimensionamento dos agregados começa pelo material graúdo, cujo volume é determinado pela interação com a areia. Relacionando o módulo de finura da areia de 2,60 com a dimensão máxima da brita de 25 mm na tabela do método ABCP(Tabela 2), obtém-se o volume de brita compactada correspondente a 0,715 m³. Para converter este volume em massa, multiplica-se o valor pela massa unitária da brita solta, que é de 1430 kg/m³, resultando em um consumo de 1022,5 kg de brita.

Tabela 2: Tabela experimental para dosagem da brita em volume

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
	(% de agregado graúdo (V _b))				
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de Curti (2020) pelos autores, 2026

Para definir a quantidade de areia, utiliza-se o método do volume absoluto, onde a areia ocupa o espaço restante no volume unitário de concreto. Primeiramente,

calculam-se os volumes absolutos dos materiais já definidos dividindo suas massas por suas massas específicas dos grãos: o cimento ocupa $0,143 \text{ m}^3$ ($444,4 \text{ kg} / 3100 \text{ kg/m}^3$), a brita ocupa $0,379 \text{ m}^3$ ($1022,5 \text{ kg} / 2700 \text{ kg/m}^3$) e a água ocupa $0,200 \text{ m}^3$ ($200 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3$). A soma desses volumes é subtraída de 1 m^3 , restando um volume de vazios de aproximadamente $0,28 \text{ m}^3$. Multiplicando-se esse volume pela massa específica dos grãos da areia de 2600 kg/m^3 , chega-se à massa de $722,66 \text{ kg}$ de areia. A tabela 3 apresenta as dosagens

Por fim, os consumos totais por metro cúbico são convertidos em um traço unitário em massa, dividindo-se todos os valores pelo consumo de cimento. As proporções teóricas resultantes foram 1 parte de cimento, 1,63 partes de areia e 2,30 partes de brita. A relação água/cimento, inicialmente calculada em 0,45, sofreu um ajuste prático durante a etapa experimental para garantir a consistência, sendo registrada como "água adotada" no valor de 240,2 litros equivalentes, o que elevou o fator a/c final para 0,54. O traço definitivo obtido para o estudo foi, portanto, $1 : 1,63 : 2,30 : 0,54$. Sendo esse traço correspondente ao concreto convencional (CC), conforme apresenta a tabela 4.

Tabela 3: Dosagem concreto convencional (CC) em m³ segundo o método ABCP

CC - Concreto Convencional (Sem adições e sem aditivos)								Volume recipiente 32x31,5x15cm (L)
								15,12
Materiais	1 (m ³)	Unit (kg)	1 saco (kg)	Volume (L)	Volume total para o estudo (kg)	massa específica dos sólidos (kg/L)	Quant.	Recipiente (variável: altura) (cm)
Cimento	444,4	1,00	50,0	50,00	21,8	-	21,8	kg (pesar)
Areia seca	722,66	1,63	81,3	54,20	35,4	1,50	24	2 x (32x31,5x11,9cm)
Brita 1	1022,5	2,30	115,0	80,44	50,1	1,43	35	3 x (32x31,5x11,6cm)
Água ADOTADA	240,2	0,54	27,02	27,02	11,8	-	10,0	10L

Fonte: autores, 2026

Tabela 4: Traço do concreto convencional (CC) para o estudo

Traço ajustado para o estudo - CC			
Cim(kg) :	Areia (kg) :	Brita 1 ou 3/4" (kg) :	Água/cim
1,00	1,63	2,30	0,54
1,00 ; 1,63 ; 2,30 ; 0,54			

Fonte: autores, 2026

Fundamentando-se nesses dados tabelados anteriormente é possível definir a tabela de dosagem do concreto ecoeficiente (CE), conforme apresentado na tabela 5 e a definição do traço do CE: 0,90 ; 0,10 ; 1,63 ; 2,30 ; 0,08 ; 0,54. Sendo “0,1” a proporção de adição de sílica que substitui parcialmente o cimento, correspondendo a 10% de substituição, e o “0,08” a proporção de aditivo impermeabilizante penetron admix da massa do aglomerante(cimento + sílica), correspondendo a 0,8%. O traço CE é representado na tabela 6.

Tabela 5: Dosagem concreto ecoeficiente (CE) em m³ segundo o método ABCP

CE - Concreto Ecoeficiente (com aditivo impermeabilizante e adição de sílica)									Volume recipiente 32x31,5x15cm (L)
									15,12
	Materiais	1 (m ³)	Unit (kg)	1 saco (kg)	Volume(L)	Volume total para o estudo (kg)	massa específica dos sólidos (kg/L)	Quant.	Recipiente (variável: altura) (cm)
	Cimento	444,4	1,00	50,0	50,00	19,6	-	19,6	kg (pesar)
	Areia seca	722,66	1,63	81,3	54,20	35,4	1,50	24	2 x (32x31,5x11,9cm)
	Brita 1	1022,5	2,30	115,0	80,44	50,1	1,43	35	3 x (32x31,5x11,6cm)
	Água ADOTADA	240,2	0,54	27,02	27,02	11,8	-	10,0	10L
0,8% da massa do cimento com adições	Aditivo impermeabilizante Penetron admix em pó	-	-	-	-	0,17	-	0,17	kg (pesar)
Subs. 10% cimento por	Sílica	-	-	-	-	2,18	-	2,18	kg (pesar)

Fonte: autores, 2026

Tabela 6: Traço do concreto ecoeficiente (CE)

Traço do concreto ecoeficiente - CE					
Cimento(kg) :	Sílica(kg):	Areia (kg) :	Brita 1 ou 3/4" (kg) :	Aditivo Penetron Admix(kg)	Água/cim
0,90	0,10	1,63	2,30	0,08	0,54
0,90 ; 0,10 ; 1,63 ; 2,30 ; 0,08 ; 0,54					

Fonte: autores, 2026

6.2 ENSAIOS CONCRETO CC E CE

6.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

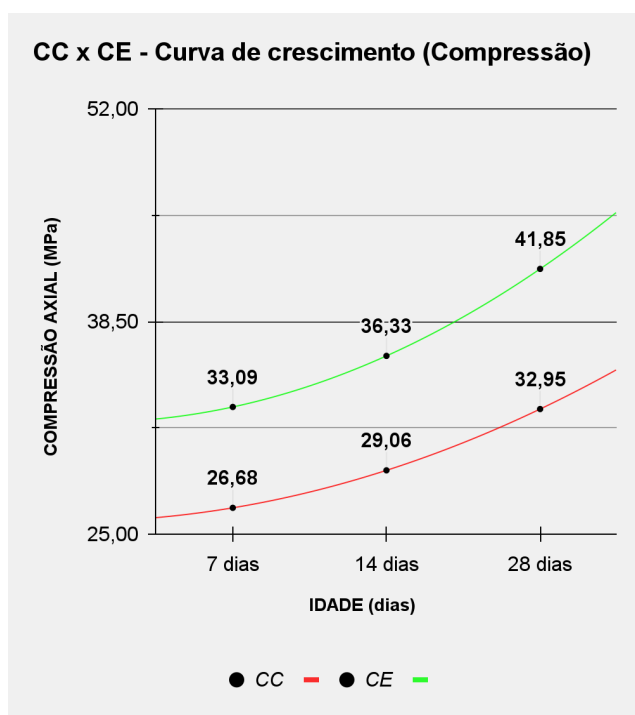
O método ABCP (Curti, 2020) se mostrou adequado, permitindo alcançar a resistência mínima requerida de 25 MPa. Ademais, conforme demonstra o gráfico 1, o desenvolvimento da resistência à compressão axial mostra que o Concreto Ecoeficiente (CE) supera o Concreto Convencional (CC) em todas as idades analisadas. Aos 7 dias, o CE atinge 33,09 MPa, valor consideravelmente superior aos 26,68 MPa do CC e, inclusive, superior à resistência que o concreto convencional alcança em seu marco final de 28 dias (32,95 MPa). Esse desempenho inicial decorre da adição de sílica, que atua no refinamento da microestrutura ao reduzir a porosidade da mistura e promover uma matriz cimentícia mais densa.

Aos 14 dias, o CE mantém o crescimento constante ao atingir 36,33 MPa, enquanto o CC registra 29,06 MPa. A manutenção dessa diferença evidencia que a redução dos vazios internos proporcionada pela sílica potencializa o ganho de resistência de forma contínua durante o processo de cura. No marco final de 28 dias, o CE alcança 41,85 MPa frente aos 32,95 MPa do CC, o que consolida um aumento de

aproximadamente 27%.

Esse resultado final quantifica o impacto direto da menor porosidade na capacidade de carga do material. A estrutura mais compacta do concreto ecoeficiente assegura uma resistência superior em comparação à composição convencional em todos os pontos da curva de crescimento, confirmando a eficácia da alteração granulométrica e química da mistura para o aumento do desempenho mecânico.

Gráfico 1 – Curva de crescimento relativa à compressão axial dos concretos CC e CE



Fonte: Autores, 2026

6.2.2 CAPILARIDADE

A análise dos dados obtidos pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, conduzido sob as diretrizes da NBR 9779/2012, evidencia uma distinção substancial na velocidade e na capacidade de transporte de umidade entre as amostras. O concreto convencional apresentou um comportamento higroscópico progressivo, atingindo uma absorção média de 1,00 g/cm² ao final de 72 horas. Em contrapartida, o concreto ecoeficiente demonstrou uma performance superior, limitando a absorção a apenas 0,20 g/cm² no mesmo intervalo, o que representa uma redução de 80,25% na permeabilidade em relação ao concreto convencional. Os dados estão apresentados nas tabelas 7, 8 e no gráfico 2.

Esta redução drástica na sucção capilar é resultado da ação combinada de dois agentes principais. Primeiramente, a incorporação da sílica contribui diretamente para a geração de créditos de carbono, uma vez que sua utilização como material cimentício suplementar permite a redução do consumo de clínquer, cuja produção é intensiva em emissões de CO₂. Do ponto de vista físico, a sílica promove redução da permeabilidade com refinamento da porosidade através do efeito filler e da reação pozolânica. Complementarmente, o aditivo impermeabilizante Penetron Admix atua na redução ainda mais acentuada dessa porosidade residual; ao entrar em contato com a umidade, o aditivo reage e gera cristais insolúveis que obstruem os microcanais da matriz.

Essa sinergia transforma a rede de poros, que no concreto convencional é contínua e majoritariamente permeável, em uma estrutura densificada e estanque no concreto ecoeficiente. Como resultado, a impermeabilidade da estrutura é elevada a níveis que garantem a proteção integral contra a entrada de agentes agressivos.

Tabela 7: Medições das massas do CC e CE(NBR 9779/2012)

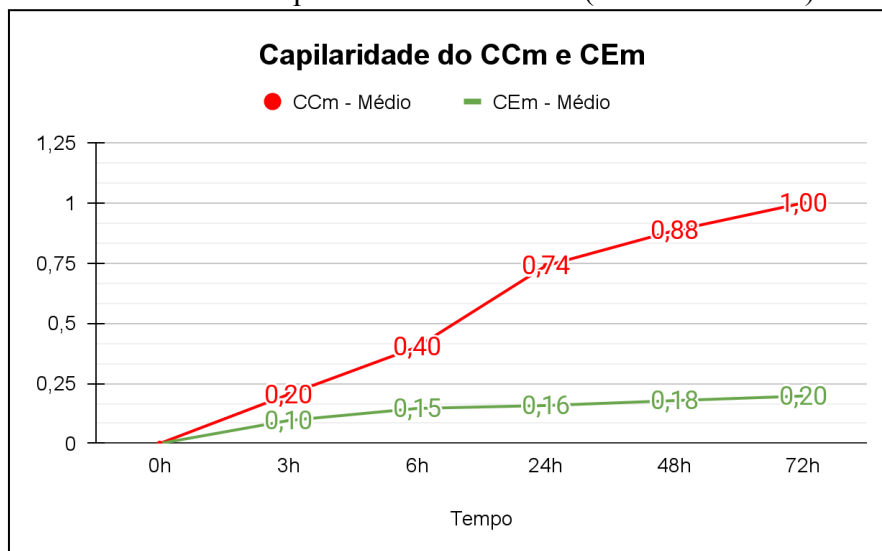
Medições das massas (g)							
Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779/2012)							
	Concreto convencional - CC			Concreto ecoeficiente - CE			
Tempo (h)	CC - CP 01 (g)	CC - CP 02 (g)	CR - Médio (g)	CE - CP 01 (g)	CE - CP 02 (g)	CE - Médio (g)	
B=	0h	3496	3567	3532	3312	3297	3305
A=	3h	3513	3582	3548	3320	3304	3312
A=	6h	3529	3597	3563	3324	3308	3316
A=	24h	3556	3623	3590	3325	3309	3317
A=	48h	3566	3636	3601	3327	3311	3319
A=	72h	3573	3647	3610	3328	3312	3320
S = 78,54 cm ²							

Fonte: Autores, 2026

Tabela 8: Absorção de água por capilaridade do CC e CR (NBR 9779/2012)

C = absorção de água por capilaridade (g/cm ²) Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779/2012)							
Tempo (h)	Concreto convencional - CC			Concreto ecoeficiente - CE			Capilaridade CEm (%)
	CC - CP 01 (g)	CC - CP 02 (g)	CRm - Médio (g)	CE - CP 01 (g)	CE - CP 02 (g)	CEm - Médio (g)	
0h	0	0	0,00	0	0	0,00	-
3h	0,22	0,19	0,20	0,10	0,09	0,10	- 53,13%
6h	0,42	0,38	0,40	0,15	0,14	0,15	- 63,65%
24h	0,76	0,71	0,74	0,16	0,15	0,16	- 78,62%
48h	0,89	0,88	0,88	0,18	0,17	0,18	- 79,86%
72h	0,98	1,02	1,00	0,20	0,19	0,20	- 80,25%
78,54				C = (A - B) / S A = corpo-de-prova úmido B = corpo-de-prova seco			

Fonte: Autores, 2026

Gráfico 2 – Capilaridade do CC e CE(NBR 9779/2012)

Fonte: Autores, 2026

6.2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) e ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

A análise da microestrutura mediante os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), As micrografias foram obtidas com campos de visão de 200 μm , conforme apresentada nas figuras 4 e 5.

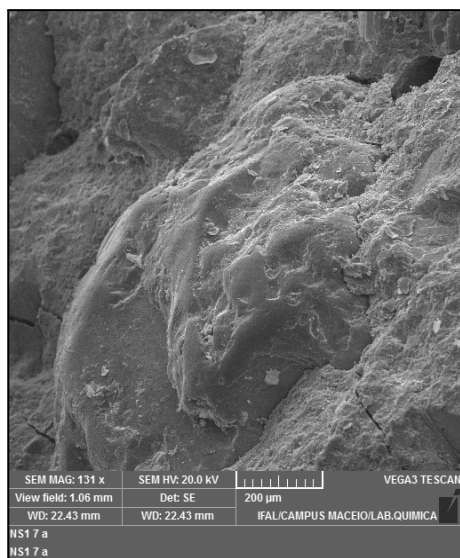


Figura 4 – Micrografia MEV do concreto convencional (CC)
Fonte: Autores, 2026

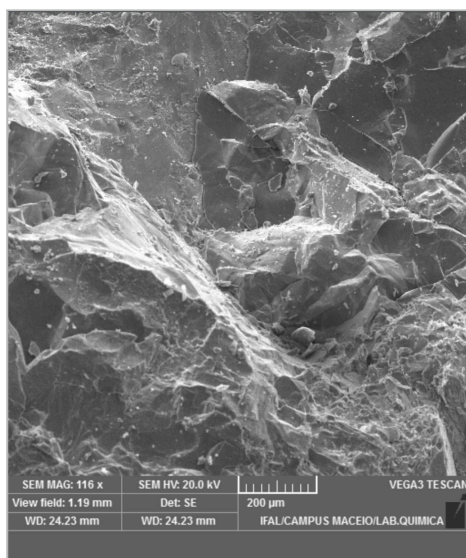


Figura 5 – Micrografia MEV do concreto ecoeficiente(CE)
Fonte: Autores, 2026

Ao fazermos um comparativo entre o CR e o CE percebe-se que no último tivemos uma camada cristalizada e com maior dificuldade de notar fissuras. Assim, indicando a presença de impermeabilizante no CE, reforçando a menor permeabilidade do concreto. A Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) evidencia-se na figura 6 e 4, e os seus respectivos gráficos 3 e 4:

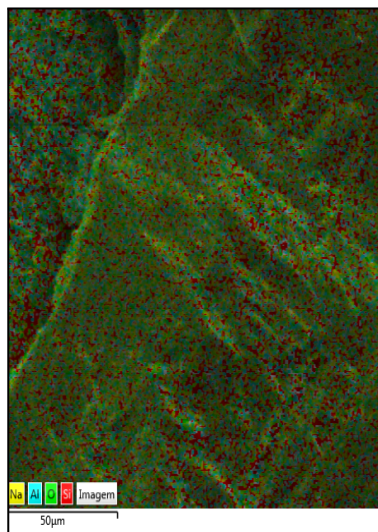
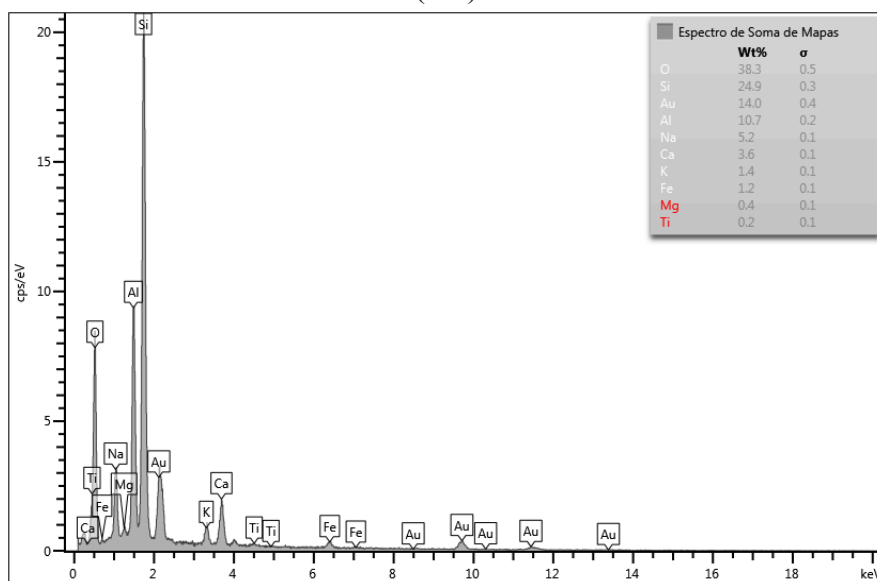


Figura 6 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto convencional (CC)
Fonte: Autores, 2026

Gráfico 3 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto convencional (CC)



Fonte: Autores, 2026

O elemento químico “Au” justifica-se pela metalização da amostra com esse material e o “O” devido ao vácuo gerado pelo equipamento na região da amostra. Elementos que apareceram no EDS do concreto ecoeficiente também. Em outra instância, segue o EDS do CE na figura 7 e gráfico 4 a seguir:

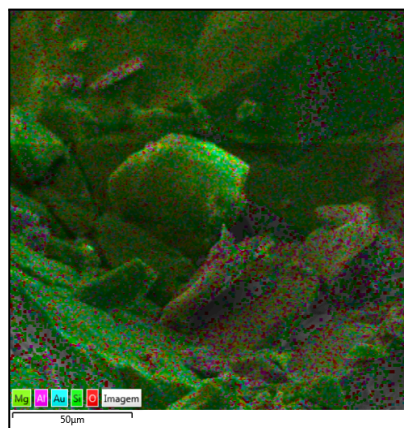
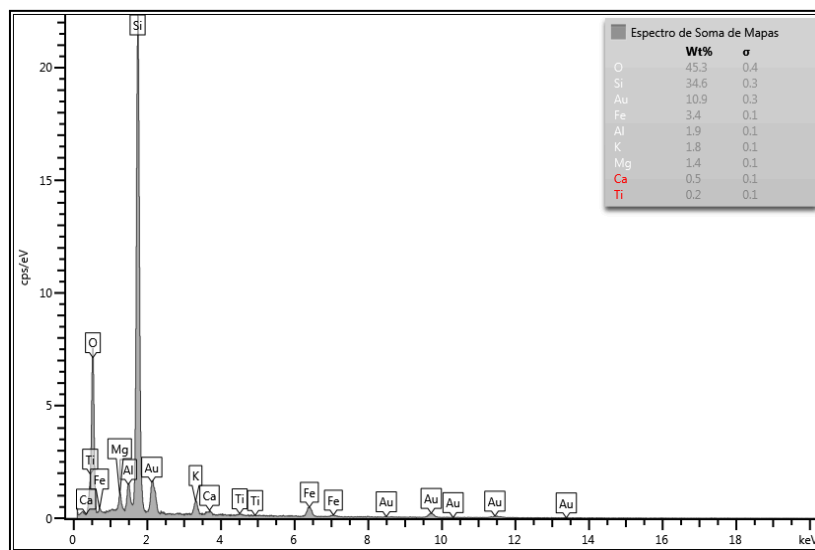


Figura 7 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto ecoeficiente(CE)
Fonte: Autores, 2026

Gráfico 4 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do concreto ecoeficiente(CE)



Fonte: Autores, 2026

Ao considerar os elementos químicos encontrados no EDS do CR e CE temos a sílica como componente majoritário, e em uma proporção minoritária: o ferro e o alumínio. Focando-se no elemento “Si” temos um valor superior no CE, justificando a adição da sílica. Considerou-se uma menor permeabilidade do concreto com aditivo impermeabilizante, justificando-se pela cristalização notada no MEV.

6.2.4 SLUMP TEST

Na sequência do estudo de dosagem, o consumo de água foi determinado visando atender aos parâmetros de trabalhabilidade estabelecidos para o estado fresco. Fixou-se um abatimento (slump) na faixa de 80 a 100 mm (Curti, 2020), intervalo este que assegura a fluidez necessária para os processos de lançamento e adensamento sem comprometer a coesão da mistura.

Ao realizar o ensaio de slump test durante a produção experimental, verificou-se que tanto o Concreto convencional (CC) quanto o Concreto Ecoeficiente (CE) atingiram um valor de 80 mm.

6.3 A REDUÇÃO DE DEMANDA DO CIMENTO POR SÍLICA E A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

A análise técnica do concreto convencional estabelece um consumo inicial de cimento de 444,4 kg/m³. Com a formulação do concreto ecoeficiente, que propõe a substituição parcial de 10% da massa de cimento por sílica, obtém-se uma economia direta de 44,44 kg de aglomerante para cada metro cúbico produzido. Para converter essa economia em benefício ambiental, aplica-se o fator de emissão brasileiro de 0,64 tCO₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2021). O cálculo resulta da multiplicação da massa economizada em toneladas (0,04444 t/m³) pelo fator de emissão (0,64), totalizando a mitigação de 0,02844 toneladas de CO₂ por m³ de concreto, o que evidencia a alta performance ambiental dessa mistura modificada.

Essa redução nas emissões de gases de efeito estufa permite que a produção desse concreto ecoeficiente viabilize a geração de 0,02844 créditos de carbono por metro cúbico, visto que cada crédito equivale a uma tonelada de CO₂ evitada. Sob a ótica financeira, fundamentada nos valores de referência da Emisfera (2020), essa redução representa uma valorização ambiental estimada entre US\$ 0,14 e US\$ 0,28 por m³. Tais números demonstram como a sustentabilidade técnica do material pode ser convertida em um ativo econômico tangível para o setor da construção civil, permitindo a monetização da eficiência produtiva.

Ao expandir essa análise para o cenário macroeconômico, utiliza-se o volume de 43 milhões de m³ de concreto produzido no Brasil em 2022, segundo Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem - ABESC (TOPCON, 2023). O

potencial de mitigação nacional de aproximadamente 1,22 milhão de toneladas de CO₂ anualmente é obtido multiplicando-se o benefício individual de cada metro cúbico (0,02844 tCO₂/m³) pelo volume total da produção brasileira (43.000.000 m³). Esse impacto massivo, decorrente da economia de escala, não apenas auxilia no cumprimento de metas climáticas internacionais, mas também fortalece a competitividade da indústria nacional perante os rigorosos critérios ESG (Ambiental, Social e Governança), agregando valor reputacional à cadeia produtiva.

Do ponto de vista financeiro, a valoração desse volume global de créditos é calculada aplicando-se os preços de mercado (entre US\$ 5,00 e US\$ 10,00) sobre o total de 1,22 milhão de créditos gerados, resultando em um ativo econômico entre US\$ 6,11 milhões e US\$ 12,22 milhões por ano. Ao converter esse montante para a moeda nacional, utilizando a cotação atual do dólar de R\$ 5,28 (janeiro de 2026), chega-se a uma receita potencial situada entre R\$ 32,29 milhões e R\$ 64,57 milhões anuais. Assim, a adoção do concreto ecoeficiente, amparada pela substituição mineral por sílica, consolida-se como uma estratégia de alta viabilidade econômica e profunda responsabilidade socioambiental.

6.4 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DO CE

6.4.1 VIABILIDADE TÉCNICA

A viabilidade técnica do concreto ecoeficiente proposto é comprovada pelo incremento sistemático em seu desempenho mecânico e durabilidade. Os ensaios de resistência à compressão axial demonstraram que a substituição de 10% da massa de cimento por sílica, aliada ao aditivo impermeabilizante, permitiu ao Concreto Ecoeficiente (CE) superar o Concreto Convencional (CC) em todas as idades analisadas. Aos 28 dias, o CE atingiu 41,85 MPa frente aos 32,95 MPa do CC, o que representa um ganho real de 8,90 MPa e um aumento percentual de aproximadamente 27%. Adicionalmente, a análise de capilaridade revelou uma redução de 80,25% na permeabilidade do material em relação ao convencional. Esse desempenho é validado pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), que evidenciou uma matriz densificada e a formação de camadas cristalizadas devido ao aditivo. Tais resultados asseguram que o traço atende com ampla margem aos requisitos de projeto (f_{ck} maior ou igual a 25 MPa) e amplia a vida útil da estrutura.

6.4.2 VIABILIDADE AMBIENTAL

A performance ambiental da mistura fundamenta-se na estratégia de descarbonização por meio da redução da demanda por cimento Portland. Ao substituir 10% do aglomerante por sílica, que é um material pozolânico que não requer os processos térmicos de clínquerização intensivos em CO₂, obteve-se uma economia direta de 44,44 kg de cimento por metro cúbico. Aplicando o fator de emissão brasileiro de 0,64 tCO₂ por tonelada de cimento, a pesquisa quantificou a mitigação de 0,02844 toneladas de CO₂ por metro cúbico de concreto. Essa redução, somada à alta impermeabilidade que protege a estrutura contra agentes agressivos, insere o material nas diretrizes da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), transformando a durabilidade superior em um ativo ambiental mensurável e sustentável.

6.4.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise comparativa de custos demonstra que o desenvolvimento de materiais de alta performance e ecoeficientes exige um investimento inicial superior. Conforme detalhado na Tabela 9, o custo de produção do concreto convencional (CC) é de R\$ 562,36 por metro cúbico. No entanto, é fundamental destacar que o CC atua apenas como uma base de referência global, visto que sua composição não contempla aditivos impermeabilizantes, ao contrário das demais misturas analisadas. Por serem considerados concretos especiais, com propriedades técnicas superiores e funções específicas de proteção, o Concreto Impermeável (Cim) e o Concreto Ecoeficiente (CE) devem ser o foco da avaliação de custo-benefício.

O Cim, apresentado na Tabela 10, possui o custo de R\$ 692,30, enquanto o CE, detalhado na Tabela 11, registra R\$ 832,97. O incremento de 20,3% do concreto ecoeficiente em relação ao concreto impermeável é justificado pela incorporação da sílica, que além de densificar a matriz cimentícia, permite a mitigação de 0,028 toneladas de CO₂ por metro cúbico. Essa redução de emissões viabiliza a geração de créditos de carbono, permitindo uma dedução direta no custo de produção (Dedução Z na Tabela 12) de R\$ 1,13, baseada em um preço de referência de R\$ 40,00 por crédito. O gráfico 5 consegue representar simplificada os custos de cada concreto.

A relevância dessa dedução torna-se evidente ao considerar que o setor de serviços de concretagem no Brasil opera com margens de lucro extremamente reduzidas, tratando o concreto comum como uma commodity de baixo valor agregado.

Em um mercado de alta competitividade, pequenos diferenciais de custo ou novas fontes de receita são vitais para a sobrevivência das empresas. A dedução por crédito de carbono, embora pareça pequena em valores absolutos, representa um mecanismo essencial para a participação da empresa no mercado de capitais verdes, transformando um passivo ambiental em um ativo financeiro.

Portanto, o valor agregado do CE reside na durabilidade e no posicionamento estratégico. A redução de 80,25 por cento na permeabilidade verificada nesta pesquisa garante estruturas com menor necessidade de manutenção corretiva. O custo adicional do CE em relação ao Cim e ao concreto convencional é compensado pela extensão da vida útil da estrutura e pelo alinhamento aos rigorosos critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Esse diferencial não apenas valoriza o empreendimento no mercado imobiliário, mas também facilita o acesso a linhas de financiamento sustentáveis, agregando valor reputacional a toda a cadeia produtiva(SCOTTA, 2025).

Portanto, o valor agregado do Concreto Ecoeficiente (CE) reside na superioridade de seu desempenho mecânico quanto a compressão axial, na durabilidade e no seu posicionamento estratégico. Embora apresente um acréscimo de 20,3% em seu custo de produção quando comparado ao Concreto Impermeável (Cim), esse investimento é amplamente justificado pelo expressivo ganho de 27,0% na resistência à compressão em relação ao Cim, atingindo 41,85 MPa aos 28 dias.

Esse aperfeiçoamento superior do CE, aliada à redução de 80,25% na permeabilidade verificada nesta pesquisa, garante estruturas mais robustas e com menor necessidade de manutenção corretiva. O custo adicional do concreto ecoeficiente é, portanto, compensado pela extensão da vida útil da estrutura e pelo pleno alinhamento aos rigorosos critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Esse diferencial não apenas valoriza o empreendimento no mercado imobiliário, mas também facilita o acesso a linhas de financiamento sustentáveis, agregando valor reputacional a toda a cadeia produtiva.

Tabela 9: Custos do Concreto Convencional - CC

Estimativa de custo Concreto Convencional - CC (Sem adições e aditivos)						
Concreto fck = 25mpa, traço 1:2,3:2,7 (em massa seca de cimento/ areia grossa/ brita 1) - preparo mecânico com betoneira 400 l. af_05/2021						
CÓDIGO	FONTE	INSUMOS	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
201	ORSE	Areia grossa adquirida em depósito, frete incluso (Areia Grossa Comercial)	m ³	0,72	R\$ 100,00	R\$ 72,29
1379	SINAPI	Cimento portland composto cp ii-32	kg	362,66	R\$ 0,88	R\$ 319,14
308	ORSE	Brita 1 (9,5 a 19,0 mm) - inclusive frete	m ³	0,59	R\$ 137,75	R\$ 81,74
88831	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chi diurno. af_05/2023	chi	0,71	R\$ 0,44	R\$ 0,31
88830	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chp diurno. af_05/2023	chp	0,75	R\$ 1,98	R\$ 1,49
					TOTAL Material(X):	R\$ 474,97
CÓDIGO	FONTE	MÃO DE OBRA	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
88316	SINAPI	Servente com encargos complementares	h	2,31	R\$ 21,70	R\$ 50,16
88377	SINAPI	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	1,46	R\$ 25,43	R\$ 37,22
BASE:		94965/ SINAPI	ORSE DEZ/25 e SINAPI DEZ/25		TOTAL Mão de Obra(Y):	R\$ 87,39
					VALOR TOTAL(X + Y):	R\$ 562,36

Fonte: Autores, 2025

Tabela 10 : Custos do Concreto impermeável (Cim)

Estimativa de custo Concreto impermeável (com aditivo impermeabilizante)						
Concreto fck = 25mpa, traço 1:2,3:2,7 (em massa seca de cimento/ areia grossa/ brita 1) - preparo mecânico com betoneira 400 l. af_05/2021						
CÓDIGO	FONTE	INSUMOS	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
201	ORSE	Areia grossa adquirida em depósito, frete incluso (Areia Grossa Comercial)	m ³	0,72	R\$ 100,00	R\$ 72,29
1379	SINAPI	Cimento portland composto cp ii-32	kg	326,39	R\$ 0,88	R\$ 287,23
1-Leroy, 2-Penetron 3-central	MERCAD O	Penetron ADMIX impermeabilizante	kg	2,90	R\$ 43,07	R\$ 124,91
308	ORSE	Brita 1 (9,5 a 19,0 mm) - inclusive frete	m ³	0,59	R\$ 200,00	R\$ 118,68
88831	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chi diurno. af_05/2023	chi	0,71	R\$ 0,44	R\$ 0,31
88830	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chp diurno. af_05/2023	chp	0,75	R\$ 1,98	R\$ 1,49
					TOTAL Material(X):	R\$ 604,91
CÓDIGO	FONTE	MÃO DE OBRA	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
88316	SINAPI	Servente com encargos complementares	h	2,31	R\$ 21,70	R\$ 50,16
88377	SINAPI	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	1,46	R\$ 25,43	R\$ 37,22

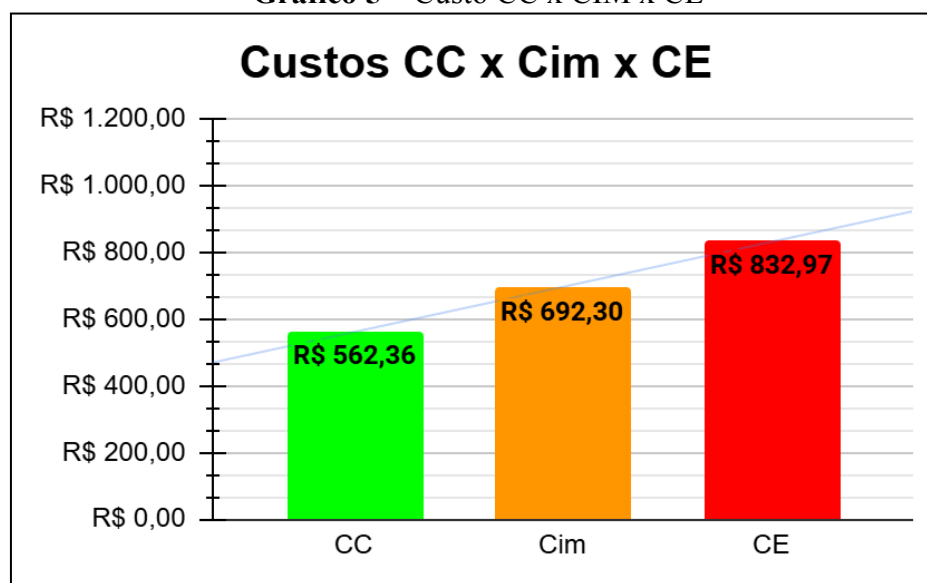
BASE: 94965/ SINAPI	ORSE DEZ/25 e SINAPI DEZ/25	TOTAL Mão de Obra(Y):	RS 87,39
		VALOR TOTAL(X + Y):	RS 692,30

Fonte: Autores, 2026

Tabela 11: Custos do Concreto Ecoeficiente - CE

Estimativa de custo Concreto Ecoeficiente - CE (Com Sílica e aditivo impermeabilizante)						
Concreto fck = 25mpa, traço 1:2,3:2,7 (em massa seca de cimento/ areia grossa/ brita 1) - preparo mecânico com betoneira 400 l. af_05/2021						
CÓDIGO	FONTE	INSUMOS	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
201	ORSE	Areia grossa adquirida em depósito, frete incluso (Areia Grossa Comercial)	m³	0,72	RS 100,00	RS 72,29
1379	SINAPI	Cimento portland composto cp ii-32	kg	326,39	RS 0,88	RS 287,23
1-MB, 2-Ideal 3-solução	MERCADO	Silica para adição em concreto e argamassa	kg	36,27	RS 3,91	RS 141,80
1-Leroy, 2-Penetron 3-central	MERCADO	Penetron ADMIX impermeabilizante	kg	2,90	RS 43,07	RS 124,91
308	ORSE	Brita 1 (9,5 a 19,0 mm) - inclusive frete	m³	0,59	RS 200,00	RS 118,68
88831	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chi diurno. af_05/2023	chi	0,71	RS 0,44	RS 0,31
88830	SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chp diurno. af_05/2023	chp	0,75	RS 1,98	RS 1,49
					TOTAL Material(X):	RS 746,71
CÓDIGO	FONTE	MÃO DE OBRA	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
88316	SINAPI	Servente com encargos complementares	h	2,31	RS 21,70	RS 50,16
88377	SINAPI	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	1,46	RS 25,43	RS 37,22
BASE: 94965/ SINAPI		ORSE DEZ/25 e SINAPI DEZ/25		TOTAL Mão de Obra(Y):		RS 87,39
CÓDIGO	FONTE	DEDUÇÃO EM CRÉDITOS DE CARBONO	UNID	COEFICIENTE	PREÇO UNIT.	TOTAL
-	EMISFERA	0,028 Créditos de carbono por m³ de concreto (1 crédito equiv. aprox. 40 reais)	RS	1,00	1,13	1,13
					TOTAL Dedução em Créditos...(Z):	1,134
					VALOR TOTAL(X + Y - Z):	RS 832,97

Fonte: Autores, 2026

Gráfico 5 – Custo CC x CIM x CE

Fonte: Autores, 2026

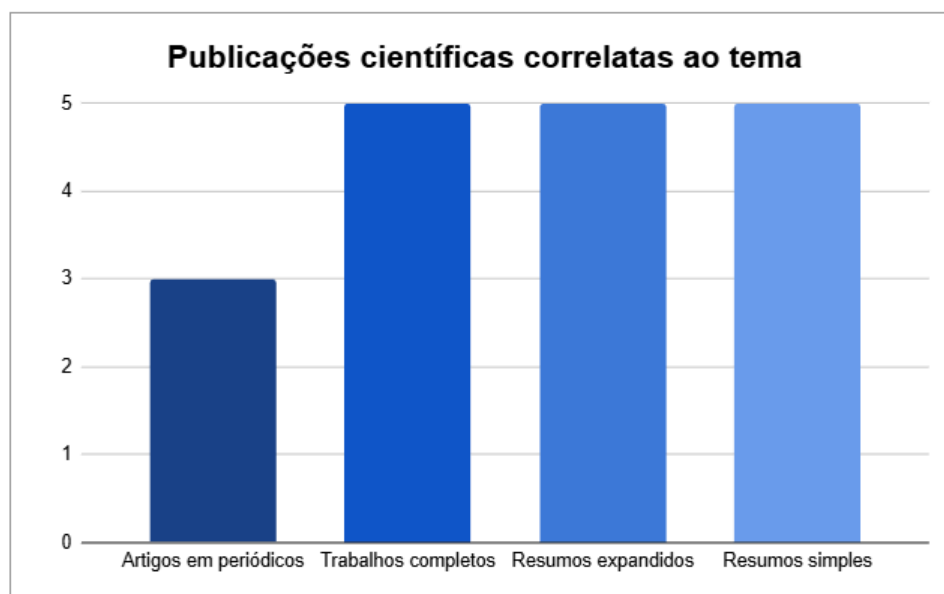
A relevância dessa dedução torna-se evidente ao considerar que o setor de serviços de concretagem no Brasil opera com margens de lucro extremamente reduzidas, tratando o concreto comum como uma commodity de baixo valor agregado. Em um mercado de alta competitividade, pequenos diferenciais de custo ou novas fontes de receita são vitais para a sobrevivência das empresas. A dedução por crédito de carbono, embora pareça pequena em valores absolutos, representa um mecanismo essencial para a participação da empresa no mercado de capitais verdes, transformando um passivo ambiental em um ativo financeiro.

Portanto, o valor agregado do CE reside na durabilidade e no posicionamento estratégico. A redução de 80,25 por cento na permeabilidade verificada nesta pesquisa garante estruturas com menor necessidade de manutenção corretiva. O custo adicional do CE em relação ao Cim e ao concreto convencional é compensado pela extensão da vida útil da estrutura e pelo alinhamento aos rigorosos critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Esse diferencial não apenas valoriza o empreendimento no mercado imobiliário, mas também facilita o acesso a linhas de financiamento sustentáveis, agregando valor reputacional a toda a cadeia produtiva.

6.5 PUBLICAÇÕES E APRESENTAÇÕES EM CONGRESSOS DAS PRODUÇÕES CIENTÍFICAS QUE CONTRIBUÍRAM PARA O TEMA

Os resultados quantitativos demonstram produções científicas consolidadas, totalizando 18 publicações distribuídas entre diferentes categorias de registro técnico. A estratificação dos dados revela a existência de 3 artigos em periódicos, 5 trabalhos completos, 5 resumos expandidos e 5 resumos simples, o que evidencia um esforço documental contínuo para o registro formal das metodologias e dos resultados obtidos ao longo de toda a investigação acadêmica. Além de serem publicações que somaram para chegar ao tema em questão. Para o acesso aos títulos das publicações acessar o currículo lattes do Esdras Márcio(as publicações de forma majoritaria possuem DOI): <http://lattes.cnpq.br/5072184098731816>. O gráfico 5 demonstra graficamente as produções por categoria.

Gráfico 6 – Publicações científicas que contribuíram para o tema



Fonte: Autores, 2026

A consolidação do tema central deste trabalho é fruto de uma trajetória acadêmica enriquecida por experiências e trocas de conhecimento em eventos científicos. A participação ativa no 1º Congresso Nacional de Inovação Brasileira de Engenharia e Tecnologia - CONIBET(Figura 8) e no I Congresso Nacional de Engenharia - CONENG(Figura 9) proporcionou a base necessária para a compreensão de tecnologias inovadoras, contribuindo diretamente para o amadurecimento das ideias e a delimitação do escopo desta pesquisa.

Adicionalmente, as vivências obtidas durante o Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON(Figura 10), em Curitiba, foram determinantes para o aprofundamento técnico necessário. A apresentação(Figura 11) de estudos e a imersão nas discussões deste fórum permitiram alinhar os conceitos teóricos às práticas de engenharia mais atuais, convergindo as experiências adquiridas para a elaboração final deste estudo sobre concreto ecoeficiente.



Figura 8 – Logo de divulgação do 1º Congresso Nacional de Inovação Brasileira de Engenharia e Tecnologia (CONIBET)

Fonte: Autores, 2026



Figura 9 – Logo de divulgação do 1º Congresso Nacional de Engenharia (CONENG)

Fonte: Autores, 2026



Figura 10 – Logo de divulgação do 66º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)

Fonte: Autores, 2026



Figura 11 – Apresentação no 66º IBRACON
Fonte: Autores, 2026

6.6 APROFUNDANDO SOBRE O MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

O mercado de créditos de carbono transcende a simples compensação ambiental, consolidando-se como um mecanismo financeiro complexo e promissor, fundamental para a economia de baixo carbono. Este tópico aprofunda-se na dualidade dos mercados (regulado e voluntário), na precificação de ativos futuros e na riqueza técnica das certificações.

6.6.1 ESTRUTURA E SEGMENTAÇÃO DO MERCADO

Para compreender a profundidade deste setor, é essencial distinguir seus dois sistemas operacionais principais:

Mercado regulado: estabelecido por políticas governamentais, impõe limites de emissões às empresas. Quem ultrapassa o teto deve adquirir créditos, enquanto quem emite menos pode vendê-los. No Brasil, o marco regulatório (Decreto 11.075/22)

estabelece as bases para este mercado, com previsão de operacionalização total até o final de 2025.

Mercado Voluntário: Movido pela responsabilidade corporativa (ESG) e sem exigência legal imediata. É onde o Brasil se destaca atualmente, permitindo que empresas e indivíduos compensem suas pegadas de carbono voluntariamente para se posicionarem como líderes sustentáveis.

6.6.2 PRECIFICAÇÃO E MERCADO FUTURO

O crédito de carbono comporta-se como um *commodity* financeiro, sujeito à volatilidade e especulação.

Valor e Tendência: Atualmente, no cenário brasileiro, o preço por tonelada varia entre US\$ 5 e US\$ 10. Contudo, o mercado futuro indica uma valorização robusta: contratos com vencimento para dezembro de 2025 já são negociados na bolsa ICE a patamares de € 79,01 (aprox. R\$ 490,00), demonstrando a expectativa de alta demanda com o avanço das regulações climáticas.

Potencial econômico: estima-se que o mercado global cresça 15 vezes até 2030, movimentando trilhões de reais até 2050.

6.6.3 RIGOR TÉCNICO E CERTIFICAÇÃO

A credibilidade do ativo depende estritamente da validação científica. Não basta plantar árvores; é necessário provar a remoção efetiva do CO₂.

Padrões internacionais: a integridade dos créditos é assegurada por auditorias independentes e metodologias como Verra (Verified Carbon Standard) e Gold Standard.

Critérios de qualidade: para ser comercializável, o crédito deve ser adicional (a redução não ocorreria sem o projeto), mensurável, verificável e permanente.

6.6.4 RISCOS E DESAFIOS DO INVESTIMENTO

O aprofundamento no tema exige a análise crítica dos riscos envolvidos:

Volatilidade: os preços flutuam conforme mudanças regulatórias e condições econômicas globais.

Incerteza regulatória: as regras globais ainda estão em evolução, o que gera incertezas sobre padrões futuros.

Integridade dos projetos: existe o risco de projetos fraudulentos ou "não certificados", bem como riscos físicos (incêndios ou pragas) que podem comprometer a geração dos créditos prometidos.

6.6.5 O PAPEL ESTRATÉGICO DO BRASIL

O Brasil possui uma vantagem competitiva única devido à sua extensão territorial e biodiversidade, especialmente na Amazônia. O país tem potencial para liderar a oferta global de créditos de alta qualidade através de projetos de REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação) e agricultura regenerativa, transformando passivos ambientais em ativos financeiros.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo desenvolveu e avaliou um concreto ecoeficiente impermeável com potencial de geração de créditos de carbono, comprovando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. A substituição parcial do cimento Portland por sílica, associada ao uso de aditivo impermeabilizante cristalizante, resultou em material com desempenho superior ao concreto convencional.

O Concreto Ecoeficiente (CE) atingiu resistência à compressão axial de 41,85 MPa aos 28 dias, superando expressivamente o concreto convencional (32,95 MPa), mesmo com a redução do consumo de cimento. Além disso, apresentou redução de 80,25% na absorção por capilaridade, evidenciando consideravelmente o aumento da estanqueidade e o potencial de ampliação da vida útil estrutural. As análises microestruturais confirmaram o refinamento da matriz cimentícia e a maior compacidade interna, validando tecnicamente os resultados obtidos nos ensaios físicos.

Sob o aspecto ambiental, a economia de aproximadamente 44,44 kg de cimento por metro cúbico proporcionou mitigação estimada de 0,028 toneladas de CO₂ por m³ de concreto produzido, caracterizando redução mensurável de emissões e fundamentando o potencial de geração de créditos de carbono.

Quanto à viabilidade econômica, a comparação foi estabelecida entre o Concreto Impermeável (CIm) e o Concreto Ecoeficiente (CE), por atenderem à mesma finalidade funcional de impermeabilização estrutural. O CIm apresentou custo de R\$ 692,30/m³, enquanto o CE registrou R\$ 832,97/m³. O acréscimo de aproximadamente 20,3% no custo de produção é compensado pelo ganho de 27% na resistência à compressão axial devido a adição da sílica e pelo benefício ambiental agregado. Considerando o valor de referência de R\$ 40,00 por crédito de carbono, a mitigação obtida permite uma dedução estimada de R\$ 1,13 por metro cúbico.

Embora a dedução financeira seja modesta em termos absolutos, sua relevância estratégica se destaca em um setor caracterizado por margens reduzidas e elevada competitividade. A monetização das emissões evitadas representa mecanismo adicional de geração de receita e inserção no mercado de capitais verdes, convertendo redução ambiental em ativo econômico.

Conclui-se que o concreto ecoeficiente desenvolvido apresenta desempenho estrutural superior, maior durabilidade e potencial de valorização ambiental,

demonstrando que é tecnicamente possível integrar engenharia, sustentabilidade e viabilidade econômica em uma única solução construtiva. O material não apenas melhora o desempenho da estrutura, mas também posiciona a atividade de concretagem dentro das diretrizes contemporâneas de descarbonização e critérios ESG.

Recomenda-se a ampliação dos estudos para idades avançadas, diferentes classes de agressividade ambiental e certificação formal das emissões evitadas, de modo a consolidar sua aplicação no mercado de carbono e ampliar sua inserção na prática construtiva.

REFERÊNCIAS

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Agregado graúdo - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Adições minerais para concreto de cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

B3. Negociação de CBIOs na B3 soma R\$ 2,88 bilhões no primeiro semestre de 2025. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.b3.com.br/pt_br/noticias/creditos-de-descarbonizacao.htm. Acesso em: 02 jan. 2026.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**. Plano Nacional de Economia Circular 2025–2034. Brasília: MDIC, 2025. Disponível em:

https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2013-2034_03-06-2025.pdf. Acesso em: 01 de fev. 2026.

BRASIL. **Lei Federal nº 15.042**, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2024.

CARDOSO, B. R.; SILVA, N. R. **Análise de porosidade e resistência à compressão do concreto usando visão computacional**. I WORKSHOP DO PPGE, 2023, Catalão. Anais do I Workshop do PPGE. Catalão: Universidade Federal de Catalão, 2023.

CEBDS. **Mercado de Carbono no Brasil: o que é e por que é importante?** Rio de Janeiro: CEBDS, 2024.

CONSERTA EXPRESS. **Aditivo impermeabilizante no concreto: como funciona e como aplicar**. Blog Conserta Express, 2023. Disponível em: <https://blog.consertaexpress.com.br/aditivo-impermeabilizante-no-concreto>. Acesso em: 9 out. 2025.

COSTA, Y. N. C.; PINTO, T. A.; SANTOS, A. H. A. **Estudo da influência da microssilica no concreto auto adensável**. Perspectivas Online: Exatas & Engenharia, Campos dos Goytacazes, v. 11, n. 34, p. 1-17, dez. 2021.

CURTI, R. **Dosagem do Concreto pelo Método ABCP**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP, 2020. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonline_22.07.2020.pdf. Acesso em: 02 fev. 2026.

DAMINELI, B. L. *et. al.* **Measuring the eco-efficiency of cement use**. Cement and Concrete Composites, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 555-562, set. 2010.

EMISFERA AGRO. **Créditos de carbono: sustentabilidade e mercado**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://emisfera.com.br/>. Acesso em: 02 jan. 2026.

GALDINO, E. **Emissões de carbono: construção civil, cimento e aço, impactos ambientais**. Nexo Jornal, São Paulo, 9 fev. 2026. Expresso. Disponível em:

<https://www.nexojornal.com.br/expresso/2026/02/09/emissoes-de-carbono-construcao-civil-cimento-e-aco-impactos-ambientais>. Acesso em: 01 fev. 2026.

GAMA, P. H. V.; SCALOPPE, L. M. **As emissões de gases de efeito estufa e o crédito de carbono**. Revista Humanidades & Inovação, v. 10, n. 3, p. 1–18, 2023.

GUITARRARA, Paloma. **Crédito de carbono**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/creditos-carbono.htm>. Acesso em 01 de jan. 2026.

HABERT, G. *et. al.* **Environmental impact of silica fume in concrete: a life cycle assessment**. Journal of Cleaner Production, v. 382, p. 135-149, jan. 2023.

INVESTING.COM. **Crédito de Carbono Futuros: cotação e gráfico em tempo real**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 05 fev. 2026.

JUNIOR, E. S. A.; BARATA, M. S. **Cimento de baixo impacto ambiental a partir dos resíduos caulínicos da Amazônia**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, n. 1, p. e12410, 2022.

KIHARA, Y. **Microssílica: uma nova pozolana artificial**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, Instituto de Geociências - USP, 1986. (Trabalho nº346).

LEMA, D.; MORAES, E. F. S.; OURIVES, C. N. **Durabilidade das estruturas pela impermeabilização por cristalização integral do concreto**. Revista da ABECE, 2024. Disponível em: <https://site.abece.com.br/wp-content/uploads/2024/01/Documento-Revista-REVISADO-6rev.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.

LIMA, E. M. A.; FILHO, M. M. S. ; VIEIRA, V. A. ; SILVA, S. C. S. . **Construindo um mundo mais sustentável: estudo de viabilidade da incorporação de microssílica, metacaulim e aditivo impermeabilizante na produção de concretos ecoeficientes de cimento portland**. In: 66º Congresso Brasileiro do Concreto, 2025, Curitiba. IBRACON 66º, 2025. v. 66.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996. 191 p. (Advances in Concrete Technology, v. 1).

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

MOURA, C. P. **A evolução do mercado de carbono**. Revista de Política Agrícola, Brasília, DF, v. 15, n. 1, p. 5-13, jan./mar. 2006.

OSAKA, S. **A indústria de cimento emite tanto CO₂ quanto a Índia: quais são os desafios enfrentados?** GBC Brasil, [S. l.], 5 set. 2023. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/a-industria-de-cimento-emite-tanto-co2-quant-a-india-quais-sao-os-desafios-enfrentados/>. Acesso em: 01 fev. 2026.

PENETRON. **Penetron ADMIX com rastreador**. Penetron Brasil, 2025. Disponível em: <https://penetron.com.br/produtos/penetron-admix-com-rastreador>. Acesso em: 01 fev. de 2026.

QUATROQUE, M. *et. al.* **Concreto no Brasil: Breve história, desafios atuais e propostas para um futuro sustentável**. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 57-71, 2023. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/3603. Acesso em: 8 fev. 2026.

RAO, B. R.; MITHUN, B. M. **Performance of silica fume as a partial replacement on cement concrete strength**. International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), [s. l.], v. 6, n. 3, p. 1-7, maio/jun. 2024.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades e aplicações**. São Paulo: Pini, 2004.

SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. **Efeito da adição do metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland**. v. 13, n. 1, p. 10–18, 2020.

SCOTTA. **Conheça os diferenciais que tornam um empreendimento realmente sustentável**. Florianópolis, 19 mar. 2025. Disponível em: <https://scottaempreendimentos.com.br/conheca-os-diferenciais-que-tornam-um-empredimento-realmente-sustentavel/>. Acesso em: 01 fev. 2026.

SEBRAE. **O Mercado Global e o Potencial do Brasil**. Brasília, DF: SEBRAE, 2023.

SILVA, I. P. C. **Influência da resistência característica do concreto (fck) no dimensionamento e custo de pilares em edifícios residenciais em concreto armado**. Projeto Final de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020. Disponível em: <https://rii.ufam.edu.br/handle/prefix/8605>.

SILVA, J. M.; OLIVEIRA, R. A.; SOUZA, M. A.; SANTOS, L. M. **Potencial uso de pérolas de EPS em argamassas para produção de placas cimentícias**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. e12701, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GTcr7fGHFv9d3fdbz8KWZdJ/?format=html>. Acesso em: 09 out. 2025.

SILVEIRA, E. C. V.; CALADO, C. R. **Desenvolvimento de geopolímeros porosos aplicando rejeito de alumínio, como gerador de poros**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ed. 09, Vol. 01, pp. 27-42, 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2021**. Rio de Janeiro: SNIC, 2021.

SOUZA, G. V. **Análise de resistência à compressão do concreto utilizando microsilica em substituição ao cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2022.

SUGAMOSTO, J. **Comparativo entre concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama**. 2007. Monografia (Especialização em Patologia das Obras Civas) – Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2007.

TOPCON. **Revolução na Construção Civil: Inovação, Eficiência e Sustentabilidade na Gestão do Concreto Brasileiro**. São José do Rio Preto: Topcon, 2023. Disponível em: <https://topconsuite.com/revolucao-na-construcao-civil-nacional/>. Acesso em: 01 fev. 2026.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 12, p. 415-451.

VALOR ECONÔMICO. **Mercado de Carbono 2050**. São Paulo: Valor Econômico, 2025.

VASUDEVAN, G.; Muniyandi, S. K.; Hock, L. E. **Effects of Incorporating Silica Fume and Rice Husk Ash as Partial Cement Replacement**. Springer, 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Future of Jobs Report 2025**. Geneva: World Economic Forum, 2025. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/>. Acesso em: 17 fev. 2026.